

ИНЖЕНЕРНЫЕ ИЗЫСКАНИЯ И ОБСЛЕДОВАНИЕ ЗДАНИЙ

УДК 681.5 + 699.8

DOI: 10.22227/2305-5502.2017.3.2

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ И МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ УНИКАЛЬНЫХ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

Н.Г. Серегин, Б.И. Гиясов*

Мытищинский филиал Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (НИУ МГСУ в г. Мытищи), 141006, г. Мытищи, Олимпийский пр-т, д. 50;

**Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26*

АННОТАЦИЯ. Изложены задачи диагностики и мониторинга технического состояния уникальных зданий и сооружений. Приведены требования к уникальным зданиям и сооружениям. Рассмотрены вопросы диагностики и мониторинга технического состояния уникальных зданий и сооружений. Приведены различные схемы устройств, входящих в состав измерительных систем. Подробно рассмотрены виды и схемы первичных преобразователей на основе волоконно-оптических датчиков. Рассмотрена распределенная система термометрии и описан распределенный датчик температуры на основе комбинационного рассеяния. Представлены результаты проведения испытаний по деформации крепежного устройства, оборудованного чувствительным элементом. Чувствительный элемент крепежного устройства выполнен в виде волоконно-оптического датчика линейных перемещений на основе интерферометра Фабри—Перо.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: уникальные здания и сооружения, мониторинг технического состояния, крепежный элемент, деформация, измерительные системы, волоконно-оптический датчик, чувствительный элемент, интерферометр Фабри—Перо

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Серегин Н.Г., Гиясов Б.И. Измерительные системы диагностики и мониторинга технического состояния уникальных зданий и сооружений // Строительство: наука и образование. 2017. Т. 7. Вып. 3 (24). Ст. 2. Режим доступа: <http://nso-journal.ru>.

MEASURING SYSTEM FOR DIAGNOSTIC OPERATION AND MONITORING OF TECHNICAL CONDITION OF UNIQUE BUILDINGS AND STRUCTURES

N.G. Seregin, B.I. Giyasov*

Mytishchi branch Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (Mytishchi branch MGSU), 50 Olimpiyskiy prospekt, Mytishchi, 141006, Russian Federation;

**Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation*

ABSTRACT. The tasks of diagnostic operation and monitoring of the technical condition of unique buildings and structures are outlined. The requirements for unique buildings and structures are presented. The problems of diagnostic operation and monitoring of technical condition of unique buildings and structures are considered. Various schemes of devices and appliances making up the measuring systems are presented in the paper. The types and schemes of primary transducers based on fiber-optic sensors are considered in greater details. A distributed thermometry system is described as well as a distributed temperature sensor based on Raman scattering. The results of deformation testing of a fastening device equipped with a sensor element are presented. The sensitive element of the fastening device is made in the form of a fiber-optic sensor of linear displacements based on the Fabry—Perot interferometer.

KEY WORDS: unique buildings and structures, monitoring of technical condition, fastening element, deformation, measuring systems, fiber-optic sensor, sensor element, Fabry—Perot interferometer

FOR CITATION: Seregin N.G., Giyasov B.I. Izmeritel'nye sistemy diagnostiki i monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya unikal'nykh zdaniy i sooruzheniy [Measuring System for Diagnostic Operation and Monitoring of Technical Condition of Unique Buildings and Structures]. Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie [Construction: Science and Education]. 2017, vol. 7, issue 3 (24), paper 2. Available at: <http://nso-journal.ru>. (In Russian)

К уникальным зданиям и сооружениям относятся те, на которые в проектной документации предусмотрена хотя бы одна из следующих характеристик [1]:

- использование конструкций и конструктивных систем, требующих применения нестандартных методов расчета, либо разработки специальных методов расчета, либо требующих экспериментальной проверки на физических моделях, а также применяемых на территориях, сейсмичность которых превышает 9 баллов;

- высота более 100 м;
- пролет более 100 м;
- вылет консолей более 20 м;

- заглубление подземной части ниже планировочной отметки земли более чем на 10 м.

К уникальным зданиям и сооружениям следует относить также зрелищные, спортивные, культовые сооружения, выставочные павильоны, многофункциональные офисные, торгово-развлекательные комплексы с максимальным расчетным пребыванием более 1000 человек внутри объекта или более 10 000 человек вблизи объекта.

Самым ярким уникальным сооружением на земном шаре является небоскреб Бурдж-Халифа высотой 828 м, построенный в 2010 г. в Дубае ОАЭ (рис. 1).



Рис. 1. Небоскреб Бурдж-Халифа в Дубае, ОАЭ

Мониторингом называется непрерывный процесс наблюдения и регистрации параметров объекта, сравнения их с заданными критериями. Мониторингом критически важных и опасных объектов, к которым относятся уникальные здания и сооружения, называется процесс инструментального автоматизированного круглосуточного наблюдения за отдельными параметрами объектов. Целью его является предупреждение чрезвычайных ситуаций и повреждения или разрушения объектов. Основным отличием этого вида мониторинга является то, что в процессе мониторинга отслеживаются деформации и сдвиги объекта и отдельных его элементов, что позволяет предотвратить наступление негативного события, а не проинформировать экстренные службы об уже случившемся чрезвычайном происшествии. Мониторинг критически важных и опасных объектов осуществляется с помощью оптических, лазерных и геофизических методов и инструментов.

Мониторинг технического состояния оснований и строительных конструкций уникальных зданий и сооружений проводят с целью обеспечения их безопасного функционирования, его результаты являются основой эксплуатационных работ на этих объектах. При мониторинге осуществляют контроль над процессами, протекающими в конструкциях объектов и в грунте. Мониторинг проводят для своевременного обнаружения на ранней стадии тенденций негативного изменения напряженно-деформированного состояния конструкций и оснований, которое может повлечь переход объекта в ограниченно работоспособное или аварийное состояние, а также для получения необходимых данных для разработки мероприятий по устранению возникших негативных процессов.

Состав работ по мониторингу технического состояния оснований и строительных конструкций уникальных зданий и сооружений регламентируется индивидуальными программами проведения измерений и анализа состояния несущих конструкций в зависимости от технического решения здания или сооружения и его деформационного состояния.

В эксплуатируемом уникальном здании или сооружении доступ к большей части несущих конструкций существенно ограничен, а работы по традиционному обследованию технического состояния конструкций трудоемки и дороги. Для таких объектов применяют специальные методы и технические средства раннего выявления и локализации мест изменения напряженно-деформированного состояния конструкций с последующим обследованием технического состояния выявленных опасных участков конструкций.

Для проведения контроля и ранней диагностики технического состояния оснований и строительных конструкций уникального здания или сооружения устанавливают автоматизированную

стационарную систему (станцию) мониторинга технического состояния, которая должна обеспечивать в автоматизированном режиме выявление изменения напряженно-деформированного состояния конструкций с локализацией их опасных участков, определение уровня крена здания или сооружения, а в случае необходимости — и других параметров (деформации, давление и др.). Настройку автоматизированной стационарной системы (станции) мониторинга осуществляют с помощью заранее разработанной математической модели для проведения комплексных инженерных расчетов по оценке возникновения и развития дефектов в строительных конструкциях.

Автоматизированная стационарная система (станция) мониторинга технического состояния оснований и строительных конструкций должна:

- проводить комплексную обработку результатов проводимых измерений;
- проводить анализ различных измеренных параметров строительных конструкций (динамических, деформационных, геодезических и др.) и сравнение с их предельными допустимыми значениями;
- предоставлять достаточную информацию для выявления на ранней стадии тенденции негативного изменения напряженно-деформированного состояния конструкций, которое может привести к переходу объекта в ограниченно работоспособное или аварийное состояние.

При выявлении мест изменения напряженно-деформированного состояния конструкций проводят дополнительное обследование этих частей и по результатам обследования делают выводы о техническом состоянии конструкций, причинах изменения их напряженно-деформированного состояния и необходимости принятия мер по восстановлению или усилению конструкций.

По результатам мониторинга технического состояния оснований и строительных конструкций уникальных зданий и сооружений выдают заключение, форма которого должна быть разработана при проектировании станции мониторинга технического состояния оснований и строительных конструкций.

Мониторинг системы инженерно-технического обеспечения уникальных зданий и сооружений проводят с целью обеспечения ее безопасного функционирования. Его результаты являются основой работ по обеспечению безопасной эксплуатации этих объектов. При мониторинге осуществляется контроль над работоспособностью и результатами работы системы инженерно-технического обеспечения для своевременного обнаружения на ранней стадии негативных факторов, угрожающих безопасности уникальных зданий и сооружений.

Для проведения контроля и ранней диагностики технического состояния системы инженерно-технического обеспечения конкретного уникального

здания или сооружения устанавливают систему мониторинга инженерно-технического обеспечения.

При мониторинге технического состояния уникальных зданий и сооружений по решению местных органов исполнительной власти, органов, уполномоченных на ведение государственного строительного надзора, или собственника объекта проводят мониторинг общей безопасности этих объектов (с комплексной оценкой риска) на случай возникновения аварийных воздействий природного и техногенного характера.

Мониторинг технического состояния уникальных зданий и сооружений регламентирует ГОСТ 32019-2012¹. Стандарт устанавливает правила проектирования и установки стационарных станций для проведения мониторинга технического состояния уникальных зданий и сооружений. Для проведения мониторинга технического состояния уникальных зданий на них устанавливают станции мониторинга технического состояния здания.

При мониторинге осуществляют контроль над процессами, протекающими в конструкции уникального здания, с целью своевременного обнаружения на ранней стадии тенденции негативного изменения напряженно-деформированного состояния конструкции, которое может повлечь за собой переход объекта в ограниченно работоспособное или аварийное состояние, а также получения необходимых данных для разработки мероприятий по устранению возникших негативных процессов. Результаты мониторинга являются основой для проведения эксплуатационных работ на этих объектах.

Также ГОСТ 32019-2012 регламентирует порядок проектирования станций мониторинга технического состояния строительных конструкций уникальных зданий и сооружений. Установка станций начинается с монтажа измерительной системы, и порядок представления результатов проведения вышеназванного мониторинга.

В строительной отрасли широкое распространение получили станции мониторинга технического состояния строительных конструкций на базе волоконно-оптических датчиков (ВОД), обладающие следующими преимуществами [2]:

- высокая помехозащищенность от электромагнитных полей;
- высокая чувствительность измерений;
- малые габариты и вес;
- высокая коррозионная и радиационная стойкость;
- высокая электроизоляционная прочность, обеспечивающая независимость ВОД от неблагоприятных погодных условий.

В частности, фасады зданий нуждаются в мониторинге своего технического состояния, как и

любой другой компонент зданий [3]. Это контроль динамики напряженного состояния, включающий измерение пространственного и временного распределения механических напряжений, деформации, смещения, температуры, влажности, а также вентилируемости конструкции.

Поэтому для мониторинга технического состояния, например, фасадов зданий целесообразно применить станции мониторинга, базирующиеся на ВОД, так как главным преимуществом любых ВОД является возможность осуществления дистанционного контроля на расстоянии нескольких километров. При этом световод может исполнять роль кабеля для передачи оптического излучения к чувствительному элементу, расположенному в зоне измерений, а также может одновременно являться чувствительным элементом датчика.

Немаловажным фактором является то, что, будучи изготовленным из кварцевого стекла, световод не боится климатического воздействия и является инертным по отношению к агрессивным компонентам городской атмосферы. Отсутствие электрического питания и каких-либо электрических цепей в световоде определяет возможность эксплуатации ВОД без риска создания пожароопасной ситуации. ВОД представляют собой класс уникальных элементов, имеющих широкий спектр измеряемых параметров, конструктивную мобильность и адаптивность к различным условиям установки, малые геометрические параметры, возможность измерения в условиях воздействия мощных электромагнитных полей без потери заданной точности.

Очень важным в современных условиях является то, что выбор ВОД, определяемый отечественным и зарубежным рынком измерительной техники, позволяет найти адекватное соотношение между ценой прибора и его качеством, включающим в себя количество измеряемых параметров с заданной точностью. Тем более, на сегодняшний день уже сформировался практический отечественный опыт производства и применения ВОД [4]. В основе технических решений изготавливаемых ВОД лежат две технологии по их производству: точечные ВБР-датчики и распределенные датчики на основе комбинационного рассеяния света в оптических волокнах (эффект Рамана).

Чувствительными элементами точечных ВБР-датчиков являются волоконные брэгговские решетки (ВБР). Такие решетки записаны в оптическом волокне при помощи ультрафиолетового лазера и представляют собой участок световода с периодическим изменением показателя преломления вдоль оси. ВБР каждого датчика отражает свет определенной волны с шириной спектра 0,2 нм.

При механическом и температурном воздействии изменяются период и показатель преломления решетки, вследствие чего наблюдается смещение длины волны отраженного света. Измеряя это

¹ ГОСТ 32019-2012. Мониторинг технического состояния уникальных зданий и сооружений. Правила проектирования стационарных систем (станций) мониторинга.

смещение, можно определить относительную деформацию и изменение температуры. Для того чтобы разделять эти величины, необходимо применять одновременно две решетки, одна из которых не подвергается механическим воздействиям. По ней фиксируют сдвиги длины волны вследствие температурных изменений. Это позволяет учесть влияние температуры на вторую решетку, а также тепловое расширение материала, к которому прикреплен датчик и, таким образом, измерять деформацию. В одной оптоволоконной линии может быть объединено множество решеток, каждая из которых дает отклик на своей длине волны. При этом расстояние между решетками может быть от 10 мм до нескольких километров.

Распределенная система термометрии — это система, предназначенная для непрерывного измерения температуры протяженных сложных объектов. Чувствительным элементом системы является малогабаритный волоконно-оптический кабель длиной до 8 км, не требующий электрического питания. Система отличается широким диапазоном измерения температуры от -55 до $+300$ °С, высокой точностью и высоким пространственным разрешением до 0,5 м.

Распределенный датчик температуры на основе комбинационного рассеяния включает следующие основные элементы: импульсный лазер и подключенное к источнику оптическое волокно, которое является чувствительным элементом [5]. Суть рамановского рассеяния состоит в обмене энергией между падающим фотоном и молекулой вещества. Если молекула переходит из основного колебательного состояния в возбужденное, то рас-

сеянный фотон смещается по частоте в красную область спектра и, таким образом, генерируется стоксова компонента. Возможен также и обратный процесс, когда структурная молекула теряет энергию и перерассеянный фотон с более высокой энергией генерирует антистоксову линию в синей области спектра относительно линии накачки. Очевидно, что заселенность возбужденного уровня напрямую зависит от температуры вещества, а следовательно, интенсивность антистоксовой компоненты будет проявлять температурную зависимость. Таким образом, регистрируя временную динамику интенсивности антистоксовой компоненты при зондировании импульсным излучением, с помощью такого сенсора можно проводить измерения температуры вдоль всего волокна.

При помощи вышерассмотренных технологий реализовано множество проектов в области строительства, энергетики, нефтегазовой промышленности, авиастроения, композиционных материалов. Например, автоматизированная измерительная система мониторинга технического состояния, установленная в г. Новосибирске на стадионе «Заря» (рис. 2), позволяет следить за техническим состоянием объекта в режиме реального времени при минимальном участии человека [4].

Автоматизированная измерительная система включает в себя 119 ВОД, в т.ч. 85 ВОД деформации и 32 ВОД температуры, установленные на наиболее нагруженных элементах металлоконструкции с помощью точечной сварки. А также два ВОД смещения, установленные на фундаменте. Для опроса ВОД применен анализатор сигналов с восьмиканальным оптическим мультиплексором.



Рис. 2. Стадион «Заря» в г. Новосибирск, оборудованный автоматизированной измерительной системой мониторинга технического состояния

Показания ВОД снимаются каждые шесть часов. Для каждого ВОД заданы два критических уровня измеряемых значений: желтый и красный. При превышении критических уровней измеряемых значений система оповещения подает звуковой сигнал тревоги и выводит сообщение на сигнальный монитор в диспетчерской, после чего частота опроса ВОД увеличивается до одного раза в 30 мин. Программное обеспечение позволяет удаленно просматривать показания всех ВОД в виде графиков относительной деформации, температуры и перемещения.

Кроме точечных ВБР-датчиков и распределенных датчиков на основе комбинационного рассеяния света в оптических волокнах (эффект Рамана), в автоматизированных измерительных системах мониторинга технического состояния уникальных зданий и сооружений широко применяют ВОД на основе интерферометра Фабри—Перо.

Принципиальная схема ВОД температуры, который можно рассматривать как ВОД линейных перемещений на основе интерферометра Фабри—Перо, показана на рис. 3 [6].

В капилляре 1 закреплены два оптических волокна 2 и 3 с зеркально полированными и обращенными навстречу друг к другу торцами, образующими интерферометр Фабри—Перо. Расстояние d является его базой. Оптическое волокно 2 является проводником светового пучка от широкополосного оптического источника 4 и приемником отраженного сигнала от зеркального торца оптического волокна 3.

Схема установки, реализующей спектральный метод низкокогерентной интерферометрии [7], состоит из источника излучения, волоконно-оптической линии с разветвителем и спектрометра, содержащего отражательную дифракционную решетку, объектив и ПЗС-матрицу (рис. 4).



Рис. 3. Принципиальная схема ВОД на основе интерферометра Фабри—Перо

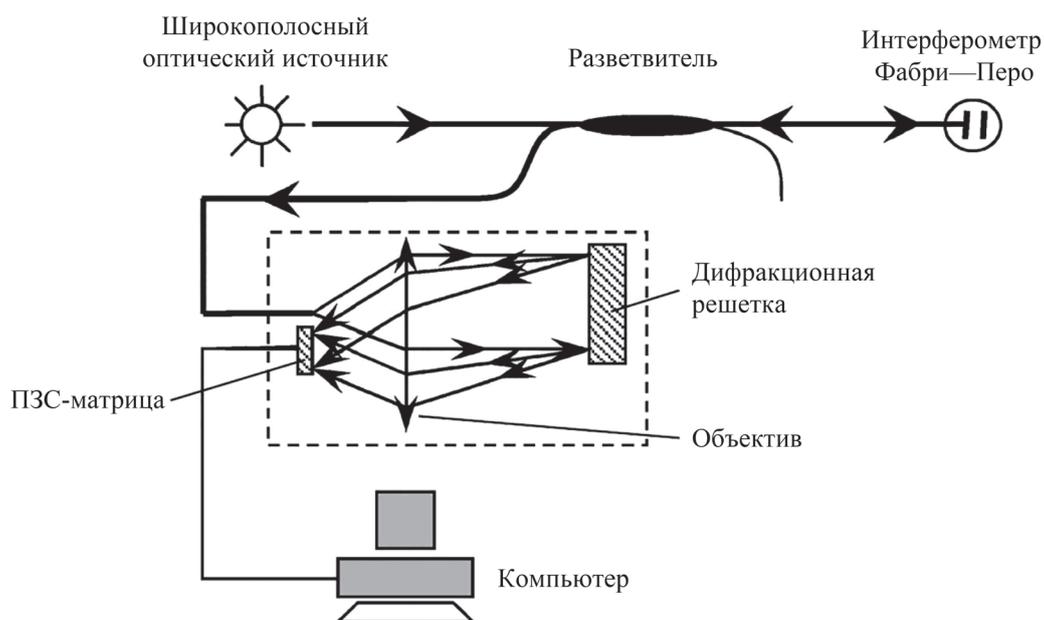


Рис. 4. Схема установки для измерения базы интерферометра Фабри—Перо

Излучение от широкополосного оптического источника по оптическому волокну попадает на интерферометр Фабри—Перо, сформированный на торце волокна (рис. 3). Отраженный от интерферометра Фабри—Перо сигнал через разветвитель попадает на вход спектрометра (рис. 5).

В спектрометре по оптическому волокну 1 проходит сигнал и направляется через объектив 2 на дифракционную решетку 3, на которой он раскладывается на дифракции нескольких порядков. Затем первый и второй порядки дифракции через ПЗС-матрицу по кабелю 4 в виде информационного сигнала поступают на компьютер.

Интенсивность отраженного сигнала будет описываться произведением функции отражения интерферометра Фабри—Перо и гауссовой функции источника. Точность измерения d и чувствительность метода измерения определяется точностью измерения длины волны и ширины спектра излучения, т.е. спектральными характеристиками прибора, в т.ч. характеристиками ПЗС-матрицы и отношением сигнал/шум.

Разработана технология изготовления и проведены испытания чувствительных элементов ВОД температуры, выполненных на основе интерферометра Фабри—Перо [8], показавшие их надежность и перспективность применения в автоматизированных измерительных системах.

Практическое применение ВОД в составе автоматизированных измерительных систем мониторинга технического состояния уникальных зданий

и сооружений рассмотрим на примере применения метода волоконно-оптической низкокогерентной интерферометрии для контроля деформации крепежного элемента строительной конструкции в процессе ее эксплуатации [9].

Контроль деформации крепежного элемента при изменении нагрузки на него осуществляется следующим образом: излучение от широкополосного оптического источника по оптическому волокну через волоконный разветвитель подается на чувствительный элемент ВОД, смонтированного в крепежном элементе. После воздействия света на чувствительный элемент ВОД, представляющий собой интерферометр Фабри—Перо, отраженный световой сигнал подается на спектрометр, который регистрирует спектр этого сигнала. Затем в блоке обработки производится анализ и путем преобразования Фурье из этого спектра вычисляется база интерферометра Фабри—Перо, т.е. расстояние d между торцами вкладыша и оптического волокна.

Спектр сигнала и база d интерферометра зависят от напряженного состояния крепежного элемента, а именно от величины его продольной деформации от напряжений сжатия или растяжения.

На рис. 6 приведены значения спектра отражения интерферометра Фабри—Перо при отсутствии нагрузки на крепежный элемент.

На рис. 7 приведены значения спектра отражения интерферометра Фабри—Перо при растяжении крепежного элемента.

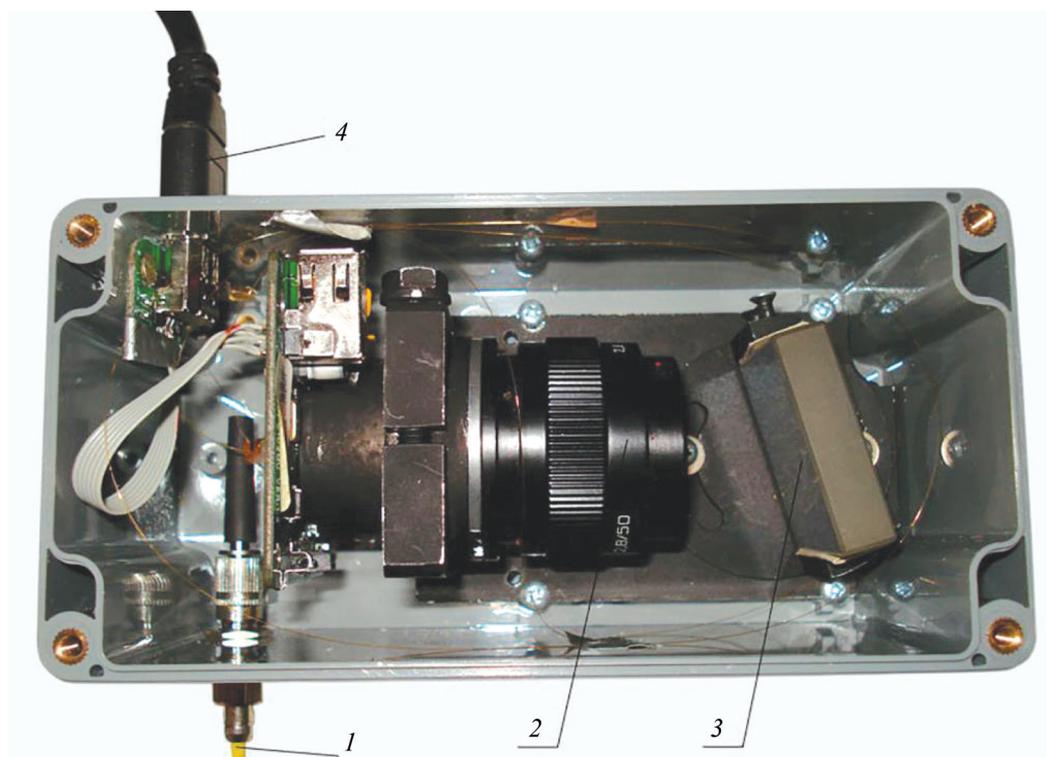


Рис. 5. Спектрометр

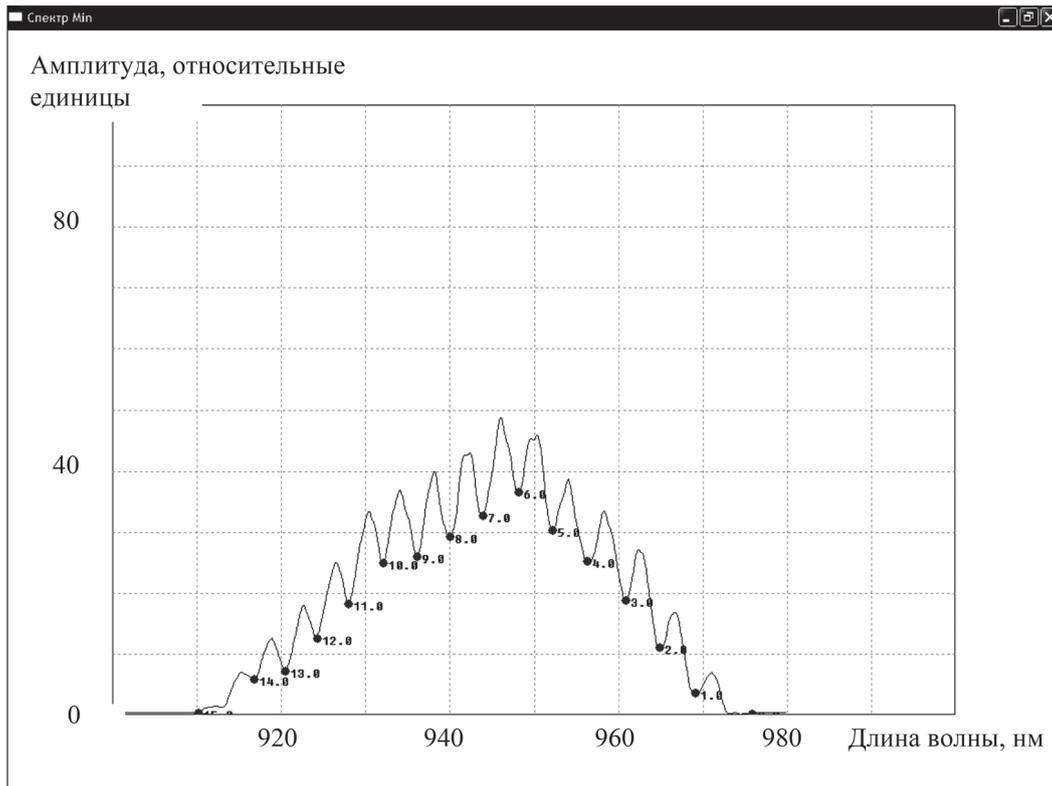


Рис. 6. Спектр отражения интерферометра Фабри—Перо при отсутствии нагрузки на крепежный элемент

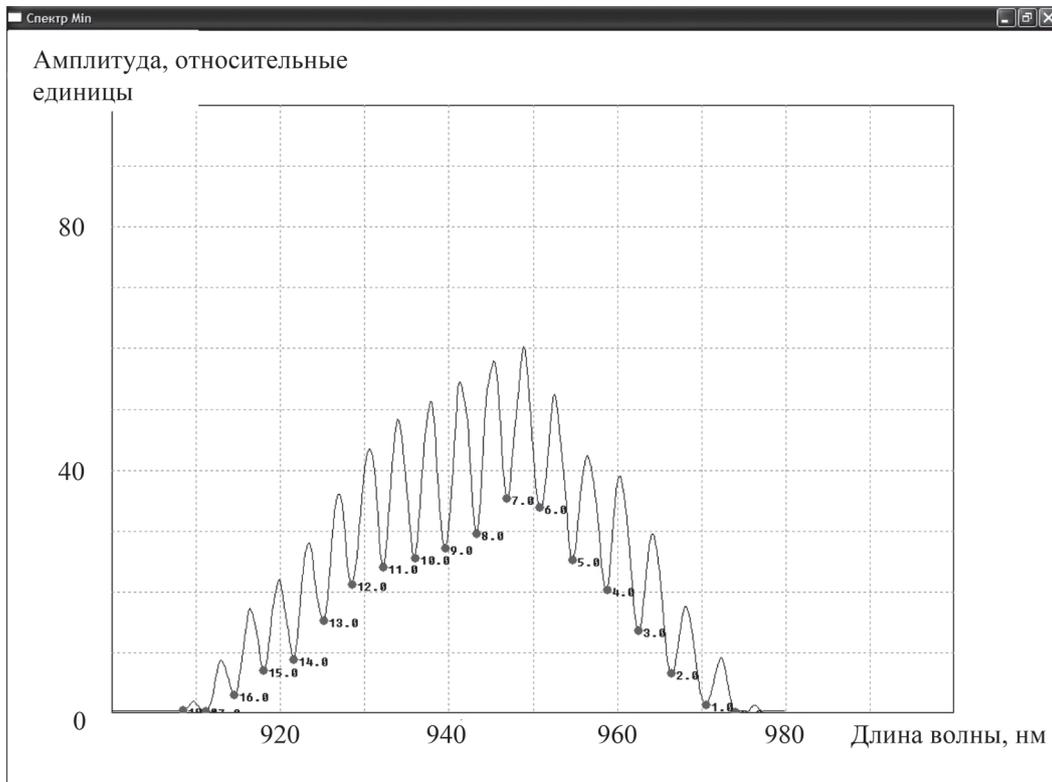


Рис. 7. Спектр отражения интерферометра Фабри—Перо при растяжении крепежного элемента

При сравнении спектров отражения интерферометра Фабри—Перо, представленных на рис. 6 и 7, очевидны их существенные различия. Обработка этих сигналов путем преобразования Фурье дает возможность вычислять величину d с высокой степенью точности и, тем самым, контролировать удлинение крепежного элемента при его упругой деформации в пределах от 0 до 300 мкм с точностью до ± 30 нм, что позволяет определять пороги допустимых нагрузок в процессе эксплуатации строительных конструкций.

Проведенные исследования ВОД на основе интерферометра Фабри—Перо также подтверждают его точность и надежность работы: так как база интерферометра d значительно меньше длины кре-

пежного элемента, примерно в 10^3 раз, то влияние изменения температуры окружающего воздуха на изменение базы d ничтожно, составляя доли нанометров на 100°C .

Таким образом, применение метода волоконно-оптической низкокогерентной интерферометрии позволяет обеспечивать высокую точность и надежность контроля деформаций крепежных элементов строительных конструкций в процессе их эксплуатации, что позволяет рекомендовать применение ВОД на основе интерферометра Фабри—Перо в качестве первичных преобразователей (датчиков) в составе измерительных систем мониторинга технического состояния уникальных зданий и сооружений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гиясов Б.И., Серегин Н.Г. Конструкции уникальных зданий и сооружений из древесины. М.: Изд-во АСВ, 2014. 88 с.
2. Серегин Н.Г., Сорокин С.В. Внедрение волоконно-оптических датчиков в систему тарировки и испытаний устройств измерительной техники // Лесной вестник. 2012. № 6 (89). С. 107–109.
3. Рубцов И.В., Неугодинов А.П., Егоров Ф.А., Поспелов В.И. Организация системы мониторинга фасадных конструкций на базе волоконно-оптических датчиков // Технологии строительства. 2004. № 5 (33). С. 12–13.
4. Шишкин В.В., Гранев И.В., Шелемба И.С. Отечественный опыт производства и применения волоконно-оптических датчиков // Прикладная фотоника. 2016. Т. 3. № 1. С. 61–75.
5. Кузнецов А.Г., Бабин С.А., Шелемба И.С. Распределенный волоконный датчик температуры со спектральной фильтрацией направленными волоконными ответвителями // Квантовая электроника. 2009. Т. 39. № 11. С. 1078–1081.
6. Серегин Н.Г., Беляков В.А., Сорокин С.В., Яковлев А.В. Применение волоконно-оптического датчика для контроля, поверки и тарировки датчиков температуры // Инженерный вестник. 2014. № 06. С. 526–533.
7. Потапов В.Т., Жамалетдинов М.Н., Жамалетдинов Н.М. и др. Волоконно-оптическое устройство для измерения абсолютных расстояний и перемещений с нанометрическим разрешением // Приборы и техника эксперимента. 2013. № 5. С. 103–107.
8. Шауруин В.Д., Потапов В.Т., Серегин Н.Г. и др. Технология изготовления и результаты испытаний чувствительных элементов волоконно-оптических датчиков температуры // Машиностроитель. 2016. № 5. С. 34–41.
9. Шауруин В.Д., Потапов В.Т., Серегин Н.Г. и др. Применение метода волоконно-оптической низкокогерентной интерферометрии для контроля деформаций крепежных элементов строительных конструкций в процессе эксплуатации // Машиностроитель. 2016. № 8. С. 13–19.

Поступила в редакцию в мае 2017 г.

Принята в доработанном виде в июне 2017 г.

Одобрена для публикации в августе 2017 г.

Об авторах: **Серегин Николай Григорьевич** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры архитектурно-строительного проектирования, **Мытищинский филиал Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (НИУ МГСУ в г. Мытищи)**, 141006, г. Мытищи, Олимпийский пр-т, д. 50, seregin54@yandex.ru;

Гиясов Ботир Иминжонович — кандидат технических наук, заведующий кафедрой архитектурно-строительного проектирования, **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, dandy@mail.ru.

As unique buildings and structures could be regarded those that in their construction project drawings and specifications include one of the following parameters [1]:

- the use of structures and structural systems that require non-conventional design approach, working out specific methods of design or performance tests on physical models, and also for the structures located in

the areas of construction with seismic activity not exceeding magnitude 9;

- the height of a structure exceeding 100 m;
- the length of a span exceeding 100 m;
- the length of a cantilever exceeding 20 m;
- digging of underground part below grade elevation for more than 10 m.

As unique buildings and structures could also be regarded sport and leisure venues, religious buildings, exhibition pavilions, multifunctional business, shopping and recreation centers with maximum estimated occupancy exceeding 1000 people inside one structure or more than 10000 people in the areas adjacent to a structure.

The Burj Khalifa tower with a total height of 828 m built in 2010 in Dubai, United Arab Emirates, is considered to be the most unique remarkable structure in the world (fig. 1).

Monitoring is a continuous process of observing and registration of object parameters in comparison with specified criterion.

Monitoring critical and hazardous objects, including unique buildings and structures, is the process of instrumental automated round-the-clock monitoring discreet parameters of construction sites. The purpose of monitoring critical and hazardous sites is prevention of emergency situations, structural damages and decay. The main distinctive feature of this type of monitoring



Fig. 1. The Burj Khalifa with a total height of 828 m in Dubai, United Arab Emirates

is the fact that during the monitoring process deformations and displacement of structure and its substructures and units are being observed. This allows forecasting and preventing emergency situations instead of just informing emergency services of rapid response about an accident occurred. Monitoring critical and hazardous sites is carried out by means of optical, laser and geophysical engineering tools and methods.

Monitoring technical conditions of foundations and structures of unique buildings is implemented with the purpose of their safe performance; the results of such monitoring represent the base for maintenance works on these sites. When monitoring, the control of processes in structures and soils is implemented. Monitoring is done for the purpose of timely detection of the tendency of negative changes in stress-strain behavior of structures and foundations on the early stages which might lead to a restricted or failure state of structure maintenance; the other purpose of monitoring is obtaining the necessary data for elaborations of actions on elimination of negative processes.

The list of works related to monitoring technical condition of foundations and structural steel of unique buildings and structures is subject to individual programs of measurement and analysis of condition of load-bearing structures depending on the engineering solutions of building or structure and its stress state.

In the operated unique building or structure the access to the most of load-bearing structures is significantly restricted; while the works on traditional survey of technical condition of structures are labor-consuming and costly. For such buildings, specific methods and technical methods of early detection and localizing negative changes in stress-strain behavior of structures are applied with sequent monitoring technical condition of detected hazardous structural units.

With the purpose of control and early diagnostic operation of technical condition of foundations and structural steel of unique building or structure, the automated stationary system (station) for monitoring technical condition is installed which is designed to detect negative changes in stress-strain behavior of structures in automated mode with localizing their hazardous units, determination of the tilt level of building and structure. If necessary, it can also measure other parameters (e.g. stress, pressure, etc.).

Customization and adjustment of a stationary monitoring system (station) is carried out with the help of the pre-engineered mathematical model for complex engineering calculations designed for assessment of defects appearance and development in structures.

An automated stationary system (station) for monitoring technical condition of foundations and structures must:

- carry out complex elaboration of measurement results;

- implement analysis of various measured parameters of structures (dynamic, stress, geodetic and others) and their comparison with tolerance values;

- provide sufficient information for early detection of the tendencies of the negative changes in stress-strain behavior of structures which may result in restricted or failure state of structure maintenance.

When detecting the place of changes in stress-strain behavior of structures, the additional monitoring of substructures is undertaken; according its results, the conclusion is made regarding technical condition of structures, causes of the change of stress-strain state and the necessity of elaboration of actions on structure restoration and strengthening.

According to the results of monitoring technical condition of foundations and structures of unique buildings and structures, technical estimation is issued; its form should be worked out when designing automated stationary system (station) for monitoring technical conditions of foundations and structures.

Monitoring the maintenance engineering system of unique buildings and structures is implemented with the purpose of their safe performance; the results of such monitoring represent the base for safety of maintenance works on these sites. When monitoring, efficiency check and control of the performance results of maintenance engineering system is implemented with the purpose of timely detection of negative factors on the early stages threatening safety of unique buildings and structures.

For monitoring control and early diagnostic operation of technical condition of the maintenance engineering system of the specified unique building and structure, the system of monitoring maintenance engineering is installed.

When monitoring technical condition of unique buildings and structures, upon decision of local authorities and executive bodies authorized for implementation of building supervision, or the owner of the property, monitoring general safety of such construction sites (with complex risks assessment) is done in case of arising accidental exposures of natural and anthropogenic origin.

Monitoring technical condition of unique buildings and structures is regulated by the All-Union State Standard 32019-2012 [2]. The Standard states the regulations for design and installation of stationary station designated for monitoring technical condition of unique buildings and structures. For monitoring technical condition of unique buildings, the stations of monitoring technical condition of buildings are installed.

During monitoring, the control of the processes in structures of unique buildings is carried out, with the purpose of timely detection of negative changes in stress-strain behavior of a structure on the early stages which may lead to a restricted or failure state of structure maintenance, as well as obtaining necessary data for elaboration of actions for elimination of faced nega-

tive processes. The results of monitoring serve as the base for sites maintenance.

Also the All-Union State Standard 32019-2012 regulates the procedure of design of stations for monitoring technical condition of structural steel of unique buildings and structures. The assembly of such stations usually begins with mounting measuring system and with procedure of presentation of the above-mentioned monitoring results.

Stations for monitoring technical conditions of structures on the base of fiber-optic sensors (FOS) are wide spread in construction industry as their performance shows the following advantages [3]:

- high interference resistance to electromagnetic field;
- high measurement sensitivity;
- small dimensions and weight;
- high fastness to staining and radiation;
- high electro insulating strength ensuring independence of fiber-optic sensors on unfavorable weather conditions.

Thus, building facades require regular monitoring of technical condition as well as any other building unit [4]. This is the control of stress state dynamics which includes measuring tridimensional and time distribution of mechanical stresses, deformation, displacement, temperature, moisture content, and also structure ventilation.

Due to this, for monitoring technical condition, e.g. buildings facades, it's recommended to use monitoring stations based on FOS. The main advantage of any FOS is the possibility of remote control and monitoring from the distance of few kilometers. Along with this, a light wave guide cable may serve as a cable for transmitting light emission to a sensing element located in the measurement zone as well as a sensing element of a sensor.

It's important to mention that a light wave guide cable made of fused quartz glass is resistant to climatic action and is inert to aggressive urban atmosphere.

A light wave guide cable has neither electrical supply, nor electrical circuits, which determines possibility of FOS maintenance without risk of fire hazardous situations. FOS represent the type of unique elements characterized by the wide range of measured parameters, structural mobility and adaptability to various settings, small dimensions, possibility of measuring under the action of powerful electromagnetic fields without required accuracy loss.

Under current conditions, it's important to mention that FOS selection determined by domestic and foreign market of measurement technology allows finding adequate quality-value relationship of a device including a number of measured parameters with required accuracy. Moreover, at the present time practical domestic experience of manufacturing and application of FOS has been gained [5]. Two manufacturing technologies form the base for technical solutions of produced

FOS, namely Fiber Bragg Grating (FBG) sensors and distributed sensors based on combinational (Raman) light scattering in optical fibers (the Raman Effect).

Fiber Bragg Gratings (FBG) serve as sensor elements in the point FBG-sensors. Such gratings are recorded in optical fiber with the use of ultraviolet laser and form the part of a light wave guide cable with cycling of refraction index along the axis. FBG of each sensor reflects the light of discreet wave with spectrum width of 0.2 nm.

Under mechanical and temperature action, the period and index of grading refraction are changed which leads to displacement of wave-length of reflected light. By measuring the length of such displacement, it's possible to determine unit strain and temperature change. In order to distinguish these values, it's necessary to apply two gratings simultaneously, whilst one of the gratings should not be exposed to mechanical loads. This grating is used for fixation of wave-length displacement caused by temperature changes. This helps to account for influence of temperature on the second grating and also temperature expansion of material with an attached sensor, and therefore to measure strain. In one optic fiber line various gratings could be arranged, each of which responds to particular wave-length. Along with this, the distance between gratings could vary from 10 mm to few kilometers.

Distributed system of thermometry is the system designated for continuous measurement of temperature of extended complex objects.

A small-sized fiber-optic cable with the length reaching up to 8 kilometers serves as a sensor element of a system without the need for electrical supply. The system is defined by the wide range of temperature measurement ranging from -55 to $+300$ °C, with high accuracy and sampling resolution reaching 0.5 m.

A distributed temperature sensor based on combination light scattering consists of the following main elements: pulsing laser and a sensor element — optic fiber connected to the source [6]. Essentially, combination light (Raman) scattering represents the energy exchange between an incident photon and a molecule of substance. If a molecule moves from the basic vibrating state into the excited one, an incident photon is wandered into the red spectrum region, thus, generating stokes component. An inverse process is also possible when a structural molecule loses its energy and a rescattered photon with a higher energy level generates anti-stokes component in the blue spectrum region in relation to a pump line. It's obvious that if an excited level population corresponds directly to substance temperature and, consequently, the intensity of stokes component will show temperature dependence. Thus, adjusting temporary dynamics of stokes component intensity by pulsed light sounding it's possible to measure temperature along the whole fiber with the use of this sensor.

By applying the above-mentioned technologies a number of projects in the sphere of construction, power, oil and gas industry, aircraft construction and composite materials have been realized. For example, the automated measuring system for monitoring technical condition installed in Novosibirsk at the Zarya stadium (fig. 2) allows real-time monitoring technical condition of the site with minimal human intervention [5].

The automated measuring system comprises 119 FOS including 85 strain and 32 temperature sensors installed on the steel structural members subjected to the maximum load by means of spot welding. There are also the displacement FOS-sensors installed on foundation. For FOS scanning signal analysis with eight-channel an optical multiplexer is used. FOS readings are taken every six hours. For each sensor two critical levels of measurable parameters are set: yellow and red levels. If exceeded critical levels of measurable parameters, the warning system gives acoustic alarm sound and displays the message on a signal monitor in the control room. Then the frequency of FOS scanning in-

creases up to once every 30 minutes. Software permits to view parameters of all FOS remotely in the form of unit strain, temperature and displacement graphs.

Apart of spot FBG-sensors and distributed sensors based on combinational light scattering in optical fibers (Raman Effect), FOS on the base of the Fabry—Perot interferometer are widely spread in automated measuring systems for monitoring technical condition of unique buildings and structures.

The layout diagram of temperature FOS which can be considered as FOS of linear displacement on the base of the Fabry—Perot interferometer is shown at the fig. 3 [7].

In the needle 1 two optical fibers 2 and 3 are fixed with mirror-finished end surfaces facing each other and forming the Fabry—Perot interferometer. The distance d is its base. The optical fiber 2 works as a conductor of the light beam from the broad-band optical source 4 and the receiver of reflected signal from the mirror end surface of the optical fiber 3.



Fig. 2. Zarya stadium in Novosibirsk equipped with the automated measuring system for monitoring technical condition



Fig. 3. The layout diagram of FOS on the base of the Fabry—Perot interferometer

The layout diagram of the apparatus applying the spectral method low-coherence interferometry [8] consists of the emitting source, fiber-optic line with splitter and spectrometer comprising the reflecting diffraction grid, objective lens and charge-coupled device (CCD) matrix (fig. 4).

From the broad-band optic source emission along the optical fiber reaches the Fabry—Perot interferometer formed on the fiber end surface (fig. 3). The signal

reflected from the Fabry—Perot interferometer reaches the spectrometer input via splitter (fig. 5).

In the spectrometer along the optic fiber 1 the signal is sent to the diffraction grid 3 via the objective lens 2 where it's split into diffraction of several orders. Then the first and the second diffraction levels along the cable 4 and via CCD-matrix are received at the computer in the form of an information signal.

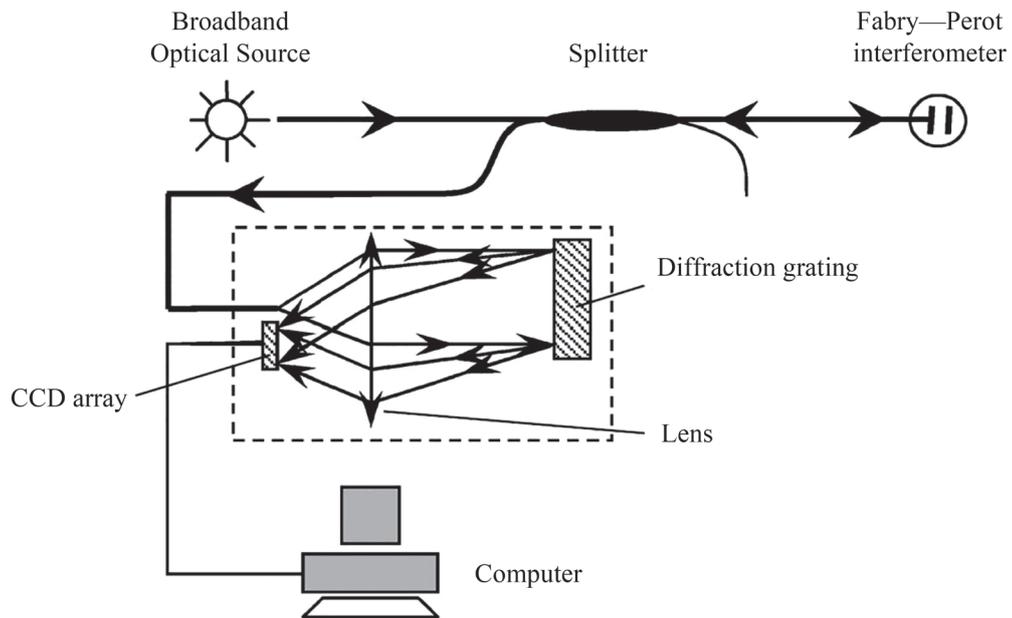


Fig. 4. The layout diagram of the apparatus for measuring the base of the Fabry—Perot interferometer

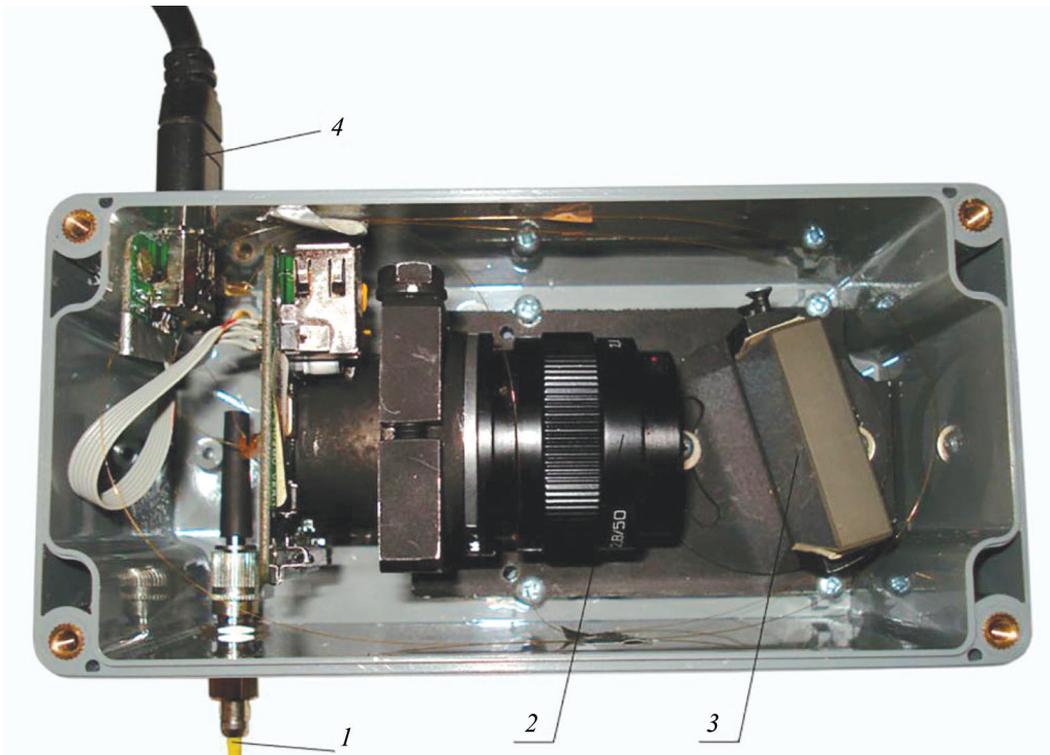


Fig. 5. Spectrometer

Intensity of reflected signal will be described by products of functions of reflection of the Fabry—Perot interferometer and Gaussian function of a source. Measurement accuracy d and sensitivity of measurement method is determined by accuracy of measuring wavelength and emission bandwidth, i.e. spectrum characteristics of a device including parameters of CCD-matrix and signal-to-noise ratio.

The manufacturing technology has been designed and the sensing elements of temperature FOS based on the Fabry—Perot interferometer [9] have been tested. The test results proved their reliability and prospects for application in automated measuring systems.

Practical application of FOS making up the part of automated measuring systems for monitoring technical condition of unique buildings and structures could be exemplified by application of the method of fiber-optic low-coherence interferometry for control of fastening element strain of a structure while in operation [10].

Fastening element strain control under changing load is carried out in the following manner. From the broad-band optic source emission along the optic fiber and via fiber coupler reaches the sensor element FOS mounted in the fastening element. When the sensor element FOS, which is basically the Fabry—Perot interferometer, has been exposed to light, reflected light signal is received by the spectrometer registering signal spectrum. Then signal processing unit implements the analysis and calculates the base of the Fabry—Perot interferometer from this spectrum by means of Fourier

transformation, i.e. the distance d between the ending surfaces of liner and optic fiber.

Signal spectrum and the base d of the interferometer depend on strain state of a fastening element, more specifically on the value of its lengthwise deformation arising due to compression or tensile stress.

Fig. 6 gives the value of reflection spectrum of the Fabry—Perot interferometer when the fastening element is unloaded.

Fig. 7 provides the values of reflection spectrum of the Fabry—Perot interferometer when the fastening element is under tension.

When comparing reflection spectrums of the Fabry—Perot interferometer in the figures 6 and 7, considerable differences have been revealed. Signal processing by means of Fourier transformation allows calculating the value d with high precision of accuracy and by that, controlling fastening element elongation under tensile stress within the range 0–300 micrometres and accuracy up to ± 30 nm. By doing so, the thresholds of accepted loads for structure operation could be determined.

The undertaken studies of FOS on the base the Fabry—Perot interferometer also verify its accuracy and reliability. As far as the base of the interferometer d is significantly lower than the length of a fastening element, about 10^3 times, the influence of temperature change of ambient air on the base d change is insignificant, more specifically, the fractions of nanometres per 100°C .

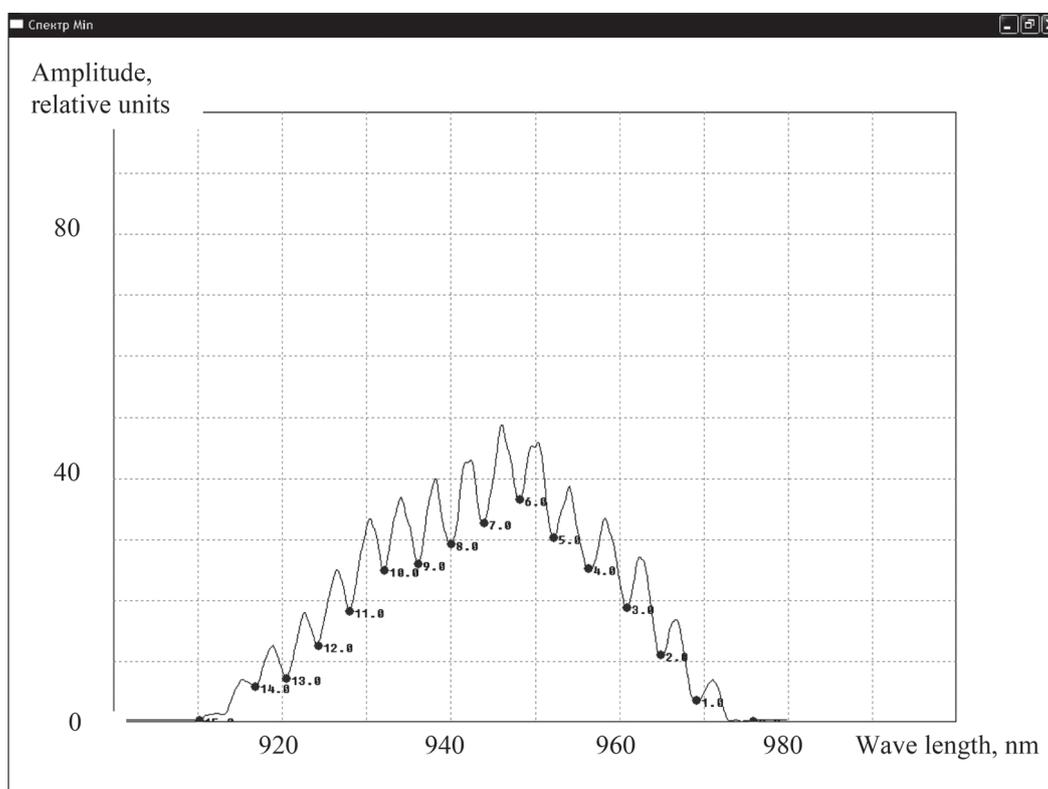


Fig. 6. Reflection spectrum of the Fabry—Perot interferometer with unloaded fastening element

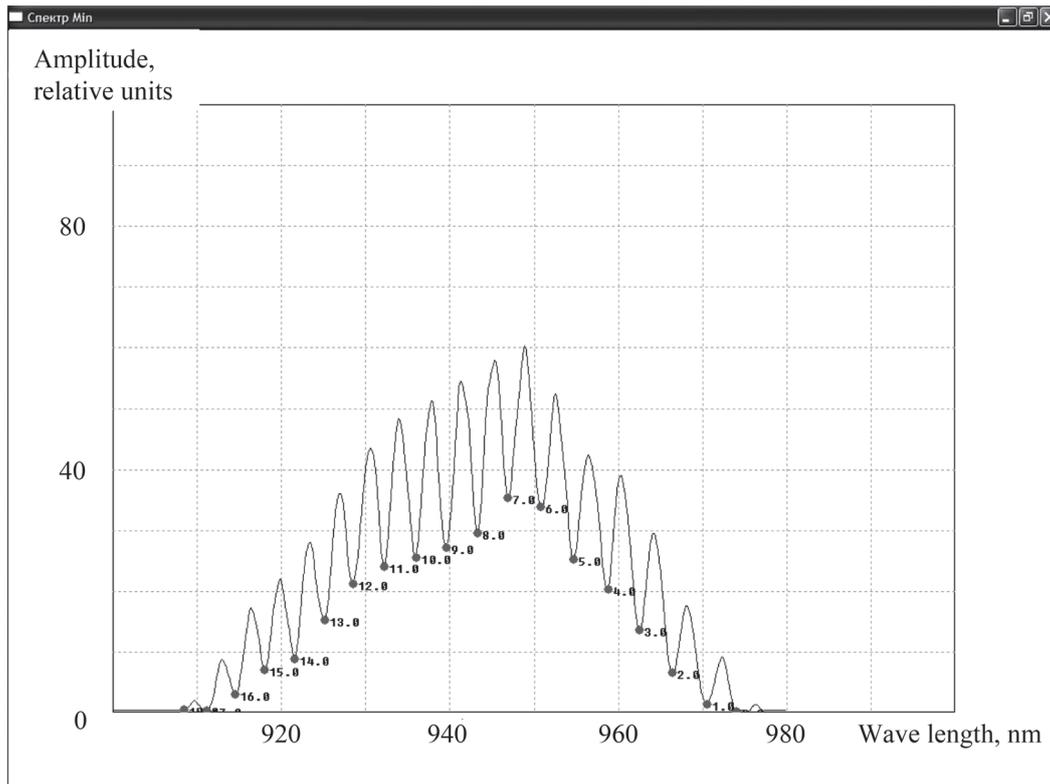


Fig. 7. Reflection spectrum of the Fabry—Perot interferometer when the fastening element is under tension

In summary, application of the method of fiber-optic low-coherence interferometry enables obtaining high accuracy and reliability of stress control in fastening structural elements while in service. Thus, the authors recommend application of FOS on the base

of the Fabry—Perot interferometer as primary transducers (sensors) being a part of measuring systems for monitoring technical condition of unique buildings and structures.

REFERENCES

1. Giyazov B.I., Seregin N.G. *Konstruktsii unikal'nykh zdaniy i sooruzheniy iz drevesiny* [Constructions of Unique Wooden Buildings and Structures]. Moscow, ASV Publ., 2014, 88 p. (In Russian)
2. Seregin N.G., Sorokin S.V. Vnedrenie volokonno-opticheskikh datchikov v sistemu tarirovki i ispytaniy ustroystv izmeritel'noy tekhniki [Introduction of Fiber-optic Sensors in the System of Calibration and Measuring Equipment Testing]. *Lesnoy vestnik* [Forestry Bulletin]. 2012, no. 6 (89), pp. 107–109. (In Russian)
3. Rubtsov I.V., Neugodnikov A.P., Egorov F.A., Pospelov V.I. Organizatsiya sistemy monitoringa fasadnykh konstruktsiy na baze volokonno-opticheskikh datchikov [Configuration Management of a System for Monitoring Facade Structures on the Base of Fiber-optic Sensors]. *Tekhnologii stroitel'stva* [Construction Technologies]. 2004, no. 5 (33), pp. 12–13. (In Russian)
4. Shishkin V.V., Granev I.V., Shelemba I.S. Otechestvennyy opyt proizvodstva i primeneniya volokonno-opticheskikh datchikov [Domestic Experience of Manufacturing and Application of Fiber-optic Sen-
5. Kuznetsov A.G., Babin S.A., Shelemba I.S. Raspredeleennyy volokonnyy datchik temperatury so spektral'noy fil'tratsiyey napravlennymi volokonnyimi otvettivelyami [Distributed fiber temperature sensor with spectral filtration by directional fiber coupler]. *Kvantovaya elektronika* [Quantum Electronics]. 2009, vol. 39, no. 11, pp. 1078–1081. (In Russian)
6. Seregin N.G., Belyakov V.A., Sorokin S.V., Yakovlev A.V. Primeneniye volokonno-opticheskogo datchika dlya kontrolya. Poverki i tarirovki datchikov temperatury [Application of Fiber-Optic Sensor for Control, Adjustment and Calibration of Temperature Sensors]. *Inzhenernyy vestnik* [Engineering Bulletin]. 2014, no. 6, pp. 526–533. (In Russian)
7. Potapov V.T., Zhamaletdinov M.N., Zhamaletdinov N.M. et al. Volokonno-opticheskoe ustroystvo dlya izmereniya absolyutnykh rasstoyaniy i peremeshcheniy s nanometricheskim razresheniem [Fiber-optic Device for Measurement of Absolute Distances and Movements with Nanometer Resolution]. *Pribory i*

tekhnika eksperimenta [Instruments and Experimental Techniques]. 2013, no. 5, pp. 103–107. (In Russian)

8. Shashurin V.D., Potapov V.T., Seregin N.G. et al. Tekhnologiya izgotovleniya i rezultaty ispytaniy chuvstvitel'nykh elementov volokonno-opticheskikh datchikov temperatury [Technology of Manufacturing and the Results of Testing Sensor Elements of Fiber-optic Temperature Sensors]. *Mashinostroitel'* [Machine Builder]. 2016, no. 5, pp. 34–41. (In Russian)

9. Shashurin V.D., Potapov V.T., Seregin N.G. et al. Primenenie metoda volokonno-opticheskoy nizkokogerentnoy interferometrii dlya kontrolya deformatsiy krepezhnykh elementov stroitel'nykh konstruksiy v protsesse ekspluatatsii [Application of the Method of Fiber-optic Low-coherence Interferometry for Strain Control of Fastening Elements of Structures While in Service]. *Mashinostroitel'* [Machine Builder]. 2016, no. 8, pp. 13–19. (In Russian)

Received in May 2017.

Adopted in revised form in June 2017.

Approved for publication in August 2017.

ABOUT THE AUTHORS: **Seregin Nikolay Grigorievich** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Architectural and Construction Design, **Mytishchi branch Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (Mytishchi branch MGSU)**, 50 Olimpiyskiy prospekt, Mytishchi, 141006, Russian Federation; seregin54@yandex.ru;

Giyasov Botir Iminzhonovich — Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Architectural and Construction Design, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; dandyr@mail.ru.