

УДК 621.372.8

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ С ЦЕЛЬЮ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЙ

Рябцев В.Н.

Командно-инженерный институт МЧС Республики Беларусь

e-mail: v.reabtsev@gmail.com

В работе рассмотрены вопросы обеспечения пожарной безопасности высотных зданий с учетом специфики их проектирования и строительства в Республике Беларусь. Рассмотрены проблемы внедрения систем строительного мониторинга напряженно-деформированного состояния несущих конструкций высотных зданий на стадиях строительства и эксплуатации. Предложена структура и принципы функционирования волоконно-оптического векторного интерферометрического датчика смещений и напряжений.

In the paper discusses the issues of fire hazard features of high-rise buildings with the specifics of their engineering and construction in the Republic of Belarus. The problem of introducing systems construction monitoring of the stress-strain state of load-bearing structures of tall buildings on the construction and operation stages are reviewed. The structure and operation principles of vector optical fiber interferometric sensor of displacements and stresses are proposed.

(Поступила в редакцию 30 сентября 2014 г.)

Введение. Проектирование высотных зданий в Республике Беларусь ведется сравнительно недавно. Под высотными зданиями согласно [1] понимаются многоэтажные здания жилого назначения высотой от 75 до 100 метров включительно, общественного и многофункционального назначения высотой от 50 до 200 метров включительно. Такие здания относятся к объектам повышенного уровня ответственности, поэтому особое внимание при их проектировании, строительстве и эксплуатации уделяется требованиям безопасности. В настоящее время в Республике Беларусь в различной стадии реализации находится ряд проектов по строительству высотных комплексов [2]. Строительство высотных зданий в нашей республике осуществляется по специальным техническим условиям (СТУ) согласно требованиям [3]. СТУ являются нормативно-технической базой для проектирования каждого высотного здания и учитывают его индивидуальные особенности с целью конкретизации требований к архитектурно-планировочным и конструктивным решениям, противопожарных требований, требований к инженерным системам зданий, системам мониторинга состояний здания при эксплуатации и т. п.

О повышенной опасности (в т. ч. пожарной) высотных зданий свидетельствуют примеры пожаров, произошедших в мире [2]. В настоящее время для обеспечения пожарной безопасности проектирование строительных конструкций базируется на критерии предела огнестойкости. Этого не всегда достаточно, так как предел огнестойкости характеризуется признаками наступления предельных состояний конструкций во время отдельного единичного пожара, в то время как их достижение возможно в процессе длительной эксплуатации здания при неоднократном высокотемпературном воздействии на разные части конструкции, что является недопустимым.

Известно, что при продолжительном воздействии высоких температур на железобетонные конструкции уменьшается прочность бетона, увеличивается площадь текучести арматуры, происходит образование пластичных зон, а в дальнейшем разрушение конструкции. Время с момента начала возгорания до полного разрушения варьируется в зависимости от состояния, срока эксплуатации железобетонных конструкций, применения

огнезащитных составов и теплоизолирующих материалов, а также от интенсивности и продолжительности температурного воздействия.

Обрушение строительных конструкций вследствие потери прочности или устойчивости приводит к огромному числу человеческих жертв. Поэтому в части пожарной безопасности на стадии проектирования необходимо учитывать дополнительное требование безопасности для конструкций, при соблюдении которого будет обеспечена возможность их дальнейшей безопасной эксплуатации в течение определенного срока после пожара при заданном пределе огнестойкости без конструктивного усиления [4]. Оценить фактическую пригодность конструкции высотного здания к дальнейшей эксплуатации без конструктивного усиления после пожара в настоящее время не представляется возможным по причине значительных размеров строительных конструкций и отсутствия или затрудненном доступе к ним для обследования на стадии эксплуатации.

Контроль напряженно-деформированного состояния несущих конструкций с целью обеспечения безопасности при эксплуатации высотных зданий. С целью исключения возможности обрушения высотных зданий при пожаре необходимо обеспечить сохранность несущих конструкций и после пожара. Данная задача решается на стадии проектирования расчетом соответствия несущих строительных конструкций нормируемому пределу огнестойкости с учетом различных коэффициентов. Однако расчет не показывает фактического состояния несущей конструкции после пожара. Поэтому сегодня наиболее эффективным способом прогнозирования и предупреждения аварийных ситуаций является мониторинг технического состояния зданий и сооружений, проводящийся на регулярной или постоянной основе, на стадиях их строительства и эксплуатации [5].

В настоящее время в Республике Беларусь создается необходимое нормативно-методическое обеспечение разработки и внедрения систем строительного мониторинга. В частности, [1] регламентирует оснащение системами мониторинга состояния несущих конструкций всех проектируемых высотных зданий, которые должны работать совместно с другими системами мониторинга и управления, образуя единую автоматизированную систему управления зданием. Данная система позволяет в режиме реального времени передавать информацию в дежурно-диспетчерские службы для оценки, предупреждения и ликвидации последствий дестабилизирующих факторов с целью своевременного оповещения и управления эвакуацией находящихся в здании людей.

Нормативное техническое состояние конструкций объекта в значительной степени определяется неизменностью и стабильностью их геометрических параметров (пространственное положение, пролеты, прогибы, перемещения). Контроль деформаций объекта традиционно осуществляется путем определения развития в основном вертикальных осадок по контуру самого объекта в уровне основания с помощью геометрического нивелирования. При этом очевидно, что учет только вертикальных осадок в уровне основания не отражает реальной картины пространственной деформации всего объекта и изменения напряженно-деформированного состояния его конструкций, в том числе при изменении физико-механических и геометрических характеристик во время и после пожара. Неточности в измерении этих характеристик могут быть особенно велики при значительных габаритах и большой этажности сооружений, когда невозможен доступ к необходимому количеству точек для геометрического нивелирования в нужном объеме [5].

При сложном пространственном очертании объекта неравномерные деформации несущих конструкций, вызывая пространственные деформации всего здания, сопровождаются повреждениями элементов его несущих конструкций по всему объему. В подобных случаях полностью выявить характер деформирования конструкций инструментально практически невозможно, также как и численно оценить его влияние на напряженно-деформированное состояние несущих конструкций в комплексе.

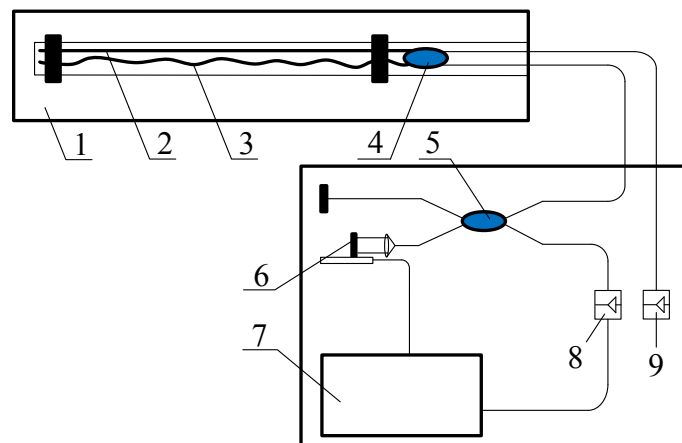
В связи с этим важнейшей проблемой безопасной эксплуатации высотных зданий

является контроль напряженно-деформированного состояния несущих конструкций. Следует отметить, что в уже построенном, эксплуатируемом высотном здании, доступ к большей части несущих конструкций существенно ограничен, в связи, с чем возникают определенные трудности контроля состояния этих конструкций с помощью традиционных методов визуального и инструментального обследования. Кроме того, в высотных зданиях, в отличие от зданий меньшей этажности, существенное влияние на напряженно-деформированное состояние несущих конструкций оказывают ветровые нагрузки, создающие значительную рассеянность мест накопления деформационных повреждений в этих конструкциях.

Мониторинг напряженно-деформированного состояния несущих конструкций высотных зданий предполагает установку датчиков на элементах конструкций для определения степени влияния физического (влажность, температура) и силового (статическая и динамические нагрузки) воздействий.

Для осуществления мониторинга состояния несущих конструкций предлагается оптический датчик, позволяющий измерять направление, величину и локализацию изгибов и напряжений несущих конструкций, на основе волоконно-оптических интерферометров. Небольшие изменения параметров интерферометра приводят к заметному изменению структуры и формы интерференционной картины. Параметры оптических волноводов и волоконно-оптических интерферометров меняются под влиянием внешних воздействий (давлений, напряжений, сдвигов и перемещений, и т. д.) пропорционально их величине. Внедрив волоконно-оптические сенсоры в структуру сооружений, можно отслеживать изменение их состояния в течение времени, собирая на центральном пункте слежения большое число непрерывных измерений.

Структурная схема и принципы функционирования волоконно-оптического интерферометрического датчика смещений и напряжений. Структурная схема датчика представлена на рис. 1.



1 – исследуемая структура; 2 – измерительное волокно; 3 – опорное волокно; 4–5 – разветвители; 6 – подвижное зеркало; 7 – блок обработки данных; 8 – фотодиод; 9 – светодиода

Рисунок 1 – Структурная схема волоконно-оптического датчика

Датчики на основе волоконно-оптических интерферометров представляют собой несколько волокон, объединенных разветвителями. Волокна помещены в защитную трубку, их длина зависит от исследуемой конструкции и варьируется от 25 см до 20 м [6]. Одно или несколько волокон (измерительные волокна) жестко связаны с измеряемым объектом и следуют за всеми его деформациями. Еще одно волокно, расположено в трубке свободно, таким образом, что любые перемещения структуры не вызовут его деформаций, служит в качестве опорного. Возникновение изгибов или напряжений в объекте приводит к изменению оптической длины измерительных волокон и, соответственно, к смещению интерференционной картины суммарного излучения после разветвителя.

Свет от источника с помощью разветвителя делится в равном соотношении и направляется по оптическим волокнам. Пройдя по волокнам, свет отражается зеркалами на концах волокон. Отражательные элементы, измерительное и опорное волокна и разветвитель 4 образуют интерферометр Майкельсона с подвижными зеркалами, что позволяет довольно точно определять разницу оптического пути света между опорным и измерительными волокнами. Интерференционный сигнал подается на второй интерферометр Майкельсона, образуемый оптическими волокнами, объединенными разветвителем 5. Длина одного из плеч второго интерферометра изменяется с помощью подвижного зеркала. Интерференционный сигнал со второго интерферометра регистрируется фотодетектором и передается для анализа на блок обработки данных. В результате перемещения подвижного зеркала формируется интерференционная картина с тремя пиками когерентности (рис. 2). Центральный пик образуется при равновесии двух плеч интерферометра Майкельсона, т. е. при отсутствии разности оптического пути. Боковые пики соответствуют двум положениям подвижного зеркала, при которых разность оптических длин плеч второго интерферометра соответствует оптической разности хода в первом интерферометре. Таким образом, разность между положением центрального и одним из боковых пиков соответствует разности плеч первого интерферометра, т. е. смещению измеряемого объекта. Положение пиков может быть определено с точностью до 2 мкм по длине волокна [6].

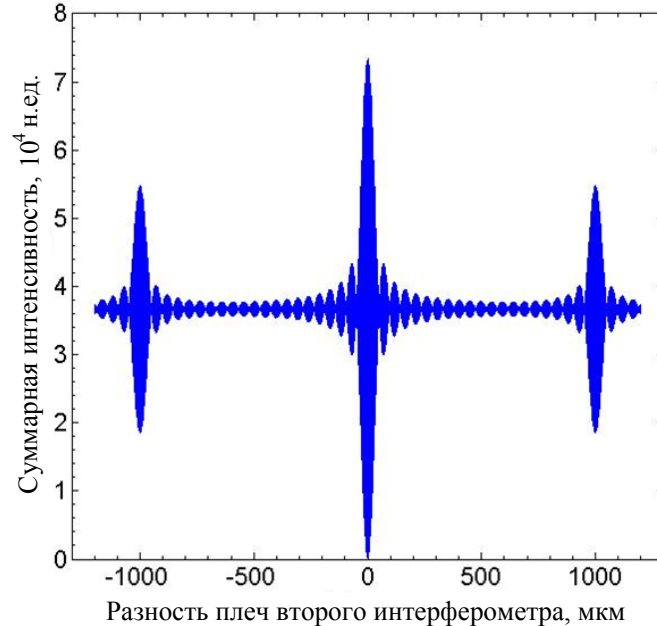


Рисунок 2 – Интерференционная картина на выходе второго интерферометра

Однако, механическое перемещение зеркала во втором интерферометре может приводить к нарушению юстировки устройства. Для обеспечения непрерывности и точности изменений нами предложено осуществлять перемещение зеркала с помощью пьезоэлектрического корректора перемещений. Подавая переменное управляющее напряжение на электроды корректора, можно производить плавное перемещение зеркала и, тем самым, с достаточной точностью определять деформацию исследуемой конструкции.

Если на вход первого интерферометра подается монохроматическая волна вида

$$E_x = E_0 \exp[i(2\pi\nu t + \varphi_0)], \quad (1)$$

– амплитуда входной световой волны; ν – частота световой волны; t – время; φ_0 – начальная фаза световой волны, то на выходе интерферометра получаем две волны с оптической разностью хода Δ_1 :

$$\begin{cases} E_{x1} = \frac{\sqrt{2}}{2} E_0 \exp[i(2\pi\nu t + \varphi_0)]; \\ E'_{x1} = \frac{\sqrt{2}}{2} E_0 \exp\left[i\left(2\pi\nu t + \varphi_0 + 2\pi \frac{\Delta_1}{\lambda}\right)\right]. \end{cases} \quad (2)$$

Суммарный сигнал этих двух волн

$$E_{\Sigma 1} = E_{x1} + E'_{x1} \quad (3)$$

поступает на вход второго волоконного интерферометра.

На выходе интерферометра имеем:

$$\begin{cases} E_{x2} = \frac{\sqrt{2}}{2} E_0 \left\{ \exp[i(2\pi\nu t + \varphi_0)] + \exp\left[i\left(2\pi\nu t + \varphi_0 + 2\pi \frac{\Delta_1}{\lambda}\right)\right] \right\} \exp[i(2\pi\nu t + \varphi_0)]; \\ E'_{x2} = \frac{\sqrt{2}}{2} E_0 \left\{ \exp[i(2\pi\nu t + \varphi_0)] + \exp\left[i\left(2\pi\nu t + \varphi_0 + 2\pi \frac{\Delta_1}{\lambda}\right)\right] \right\} \exp\left[i\left(2\pi\nu t + \varphi_0 + 2\pi \frac{\Delta_2}{\lambda}\right)\right]. \end{cases} \quad (4)$$

Результирующая интенсивность на выходе второго интерферометра будет определяться из следующего соотношения:

$$\begin{aligned} I_{\Sigma 1} &= E_{\Sigma 2} E_{\Sigma 2}^* = I_0 \left[1 + \cos\left(2\pi \frac{\Delta_1}{\lambda}\right) \right] \left[1 + \cos\left(2\pi \frac{\Delta_2}{\lambda}\right) \right] = \\ &= I_0 \left\{ \cos\left[\frac{\pi}{\lambda}(\Delta_1 - \Delta_2)\right] + \cos\left[\frac{\pi}{\lambda}(\Delta_1 + \Delta_2)\right] \right\}^2. \end{aligned} \quad (5)$$

Если источник света имеет конечную ширину спектра излучения, которая определяет время когерентности излучения ($t_k = 1/\Delta\nu$), первое слагаемое в случае $\Delta_1 = \Delta_2$ определяет максимум огибающей интерференционной картины на выходе второго интерферометра (рис. 2).

Используя в составе волоконно-оптического интерферометрического датчика несколько волокон в качестве измерительных, по различию интерференционных картин, обусловленному сдвигом фаз излучения в этих волокнах, можно определять и направление деформаций исследуемых объектов.

Возможность этого обусловлена наличием фазового сдвига излучения в различных измерительных волокнах, возникающего в результате изгиба. В зависимости от направления изгиба радиус изгиба внутреннего и внешнего по отношению к изгибу волокон является различным. Это приводит к разному набегу фаз излучения в измерительных волокнах. Возникновение фазового сдвига приводит к смещению интерференционной картины суммарного излучения. Таким образом, по величине и направлению смещения интерференционной картины можно определять величину и направление изгиба волокон, и, соответственно, измеряемого объекта.

Система является подходящей как для краткосрочных, так и долгосрочных вариантов мониторинга. Датчики можно устанавливать непосредственно заделкой в бетон или на поверхности исследуемой конструкции при ее изготовлении или монтаже не нарушая график проведения строительных и эксплуатационных работ.

Благодаря использованию оптических волокон в качестве чувствительных элементов такая измерительная система имеет ряд преимуществ перед традиционными устройствами: отсутствие влияния на результат измерения электромагнитных полей; существенно меньшая электрическая опасность и отсутствие проблемы дугообразования и искрения; малые габариты и вес; высокая механическая прочность; стойкость к

повышенным температурам, вибрациям и другим воздействиям окружающей среды; высокая скорость передачи данных [6-9].

Заключение. Таким образом, внедрение на объектах высотного строительства системы контроля состояния несущих конструкций, позволит не только осуществлять мониторинг напряженно-деформированного состояния строительных конструкций, но и обеспечить передачу информации в дежурно-диспетчерские службы для оценки, предупреждения и ликвидации последствий дестабилизирующих факторов с целью своевременного оповещения и эвакуации людей.

Решить проблемы внедрения систем строительного мониторинга напряженно-деформированного состояния несущих конструкций высотных зданий на стадиях строительства и эксплуатации позволяет разработка конструкций и принципов функционирования волоконно-оптических датчиков, как наиболее оптимального инструмента, обладающего высокой точностью, долговечностью, стойкостью к повышенным температурам, вибрациям и другим агрессивным воздействиям окружающей среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. ТКП 45–3.02–108–2008 Высотные здания. Строительные нормы проектирования // Полнотекстовая информационно-поисковая система «СтройДОКУМЕНТ» [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые дан. и прогр. (700 Мб). – Минск, НПП РУП «Стройтехнорм», 2007. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
2. Рафальский, В.Н. Проблемные вопросы обеспечения противопожарной защиты при проектировании и строительстве высотных зданий в Республике Беларусь / В.Н. Рафальский // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2013. – № 1 (17). – С. 51–58.
3. ТКП 45–1.01–234–2011 Система технического нормирования и стандартизации Республики Беларусь. Специальные технические условия в области архитектуры и строительства. Порядок разработки, построения, изложения, согласования и утверждения // Полнотекстовая информационно-поисковая система «СтройДОКУМЕНТ» [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые дан. и прогр. (700 Мб). – Минск, НПП РУП «Стройтехнорм», 2007. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
4. Соломонов, В.В. Обеспечение огнестойкости и огнесохранности при проектировании монолитных железобетонных перекрытий высотных зданий / В.В. Соломонов, И.С. Кузнецова // Пожарная безопасность в строительстве. – 2011. – № 1. – С. 32–34.
5. Бурсов, Н.Г. Мониторинг как инструмент безопасности технически сложных, уникальных, высотных объектов / Н.Г. Бурсов [и др.] // Архитектура и строительство. – 2011. – № 2 (220).
6. Inaudi, D. Fiber optic sensors for structural control / D. Inaudi, A. del Grosso // Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering. – October 12–17, 2008. – Beijing, China. – Paper No. S 25–013.
7. Connolly, C. Structural monitoring with fibre optics / C. Connolly // Europhotonics. – 2009. – No. 2-3. – P. 16–18.
8. Гармаш, В.Б. Возможности, задачи и перспективы волоконно-оптических измерительных систем в современном приборостроении / В.Б. Гармаш [и др.] // «Фотон-экспресс» – Наука. – 2005. – № 6. – С. 128–140.
9. Гончаренко, И.А. Датчики контроля состояния инженерных и строительных конструкций на основе оптических волноводных структур / И.А. Гончаренко, В.Н. Рябцев // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2013. – № 2 (18). – С. 118–132.