

УДК 528.482

## МОНИТОРИНГ СПЕЦИФИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

### MONITORING OF ENGINEERING STRUCTURES SPECIFIC PARAMETRES

---



#### **Пятницкий А.А. / Pyatnitsky A.A.**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Проектирование зданий» МГСУ. Является главным конструктором и руководителем сектора обследования зданий и сооружений научно-исследовательской и проектно-производственной лаборатории «Проектирование и Конструирование» (НИиППЛ «ПиК») МГСУ./ Candidate of Tech.Sci., assistant professor of "Building Design" MGSU. Is the chief designer and head of sectorsurveys of buildings and structures of research, design andproduction laboratory "Design and Construction" (NIiPPL "PIC") MGSU

email: [pik-mgsu@mail.ru](mailto:pik-mgsu@mail.ru)



#### **Кухта А. В./ Kuhta A.V.**

старший научный сотрудник, руководитель сектора строительного мониторинга НИиППЛ «ПиК» МГСУ/ The senior research assistant, the head of sector of building monitoring NIiPPL«PiK»MGSU

e-mail: [symon-pik@mail.ru](mailto:symon-pik@mail.ru)

#### **Парфенова М.И./ Parfenova M.I.**

Аспирант кафедры "Инженерная геодезия"/ Post-graduate student of chair "Engineering geodesy"

#### **Срывкова М.В./ Srivkova M.V.**

Аспирант кафедры "Инженерная геодезия"/ Post-graduate student of chair "Engineering geodesy"

**Аннотация.** Статья посвящена мониторингу специфических параметров, к которым относятся, в частности, предельные отклонения вершин высотных сооружений и частоты колебаний. С целью регистрации изменений специфических параметров, предлагается установка оригинального оптического устройства. В статье, также, приводятся примеры применения систем мониторинга на различных объектах.

**Ключевые слова:** мониторинг, высотные сооружения, частота колебаний.

**Abstract.** The article is devoted to the monitoring of specific parameters, particularly, extreme deviate of the tops of high-rise buildings and oscillation frequency concern them. For the purpose of registration of changes in specific parameters a mounting of special optic device is suggested. Moreover, the examples of application of monitoring systems for different objects are cited in the article.

**Keywords:** мониторинг, высотные сооружения, частота колебаний.

Советскими учеными: В.В. Болотиным, А.Р. Ржанициным и М.Н. Степновым было установлено, что теоретически вероятность разрушения никогда не становится равной нулю [1,2]. Данные утверждения основаны на том, что условия эксплуатации конструкции, и свойства, использованных при ее возведении, материалов [3] являются случайными величинами. Случайными являются и результаты сложных математических расчетов строительных конструкций, определяемые математической моделью и условностью закладываемых в нее свойств грунтового основания [4] и материалов конструкции. Весьма заметное влияние на величины действующих в элементах конструкций напряжений оказывают технология возведения сооружения и качество производства работ.

Все перечисленные факты говорят об одном: мы не знаем истинного соотношения величин воздействия и способности конструкции сопротивляться этому воздействию. В связи с этим необходимо следить за истинными значениями величин воздействия и сопротивления воздействию. Сопоставление истинных значений этих величин позволит нам говорить о надежности конструкции на данный момент времени, а прогноз изменения нагрузки и свойств материала, полученный по результатам долговременных наблюдений, позволит говорить о надежности конструкции в некоторой перспективе. Совершенно очевидно, что это открывает нам возможность оперативного вмешательства в работу конструкции с целью не допущения даже малейшего проявления нарушения ее работоспособности.

Но мы можем следить и за соотношением параметров воздействия и сопротивления этим воздействиям. Прогиб нагруженной балки является интегральным показателем воздействия и сопротивления воздействию. Если прогиб превысил предельные значения, то не важно увеличилась ли нагрузка или снизились показатели жесткости балки. Другим примером интегрального показателя

является разрушение бетона связанное с образованием трещин и предшествующих им микротрещин. Происходит разрушение связей между отдельными элементарными частицами составляющими бетон, а разрушение связи всегда сопровождается звуковым импульсом. Регистрируя эти импульсы, т.е. регистрируя акустическую эмиссию, мы регистрируем интегральный показатель состояния конструкции. Низкий уровень эмиссии свидетельствует о благоприятном состоянии конструкции, а ее резкий рост о наличии негативных процессов. Наличие трещин значительно снижает скорость прохождения ультразвуковой волны в материале и увеличивает степень затухания амплитуды этой волны. Слежение за распространением ультразвуковых волн в наблюдаемой конструкции также может быть интегральным показателем. Изменение частот так же является интегральным показателем состояния конструкции. Меняется соотношение массы и жесткости – меняется частота. Можно спорить о достоинствах и недостатках методов, приведенных в качестве примеров, однако факт наличия интегрального показателя для большинства сооружений или их конструкций представляется бесспорным.

Весьма специфическим и интересным является интегральный показатель, заключающийся в измерении и записи перемещений вершины высотного сооружения с колебаниями по первой форме и преобладающим вкладом в колебания от порывов ветра [5]. Для измерения перемещений традиционно используются измерительные комплексы, построенные на основе контактных датчиков – пьезоакселерометров, устанавливаемых на колеблющихся элементах сооружений. Комплексы данного типа способны измерять колебания с частотами не ниже 0,1 Гц, то есть они не могут работать в квазистатическом диапазоне частот, который охватывает частоты от 0,1 до 0,001 Гц. Кроме того, результатом обработки данных в этих комплексах являются временные развертки и спектры ускорений, в то время как для практических расчетов

чаще необходимы данные по перемещениям элементов сооружений. В связи с этим, для измерений перемещений в квазистатической зоне частот целесообразно использование оптических методов, не требующих достаточно сложных промежуточных устройств и операций для преобразования измеренных ускорений в скорости и перемещения. Предложенный метод реализуется в устройстве оптического комплекса состоящего из: видеокамеры с длиннофокусным объективом, расположенной у основания сооружения на площадке не подверженной внешним воздействиям, и специальной мишени, расположенной на выносной площадке у вершины сооружения. Данный комплекс способен с достаточно высокой точностью без искажений измерять перемещения во всем диапазоне частот до 1Гц. Он отличается предельной простотой устройства, надежностью в эксплуатации и низкой себестоимостью. Недостатком комплекса является зависимость от атмосферных осадков и погодных условий.

И так, мы пришли к выводу о том, что для понимания реальных значений надежности конструкции мы должны следить за величинами воздействия и сопротивления этому воздействию или следить за неким интегральным показателем характеризующим их соотношение. Одноразовые наблюдения дадут нам понимание степени надежности только в данный момент времени. Как же быть с прогнозом? Очень просто – наблюдать за выбранными показателями в течение времени. Чем дольше мы наблюдаем за объектом и чем больше таких объектов, тем достовернее выводы, основанные на этих наблюдениях. Вести непрерывные наблюдения практически невозможно. Значит, мы должны ограничиться периодическими наблюдениями. Тогда возникает вопрос о величине периода наблюдений. В этой связи можно сформулировать постулат о том, что вероятность события происходящего между моментами наблюдения и способного проявить заметное влияние на работу

сооружения должна быть сведена к минимуму.

Когда мы говорим о необходимости ведения наблюдений за какими-то параметрами сооружения, то мы должны определить за какими именно параметрами должны проводиться эти наблюдения. Установка датчиков дождя или толщины снегового покрова с целью определения напряженно-деформированного состояния (НДС) и надежности работы покрытия сооружения бессмысленна. Наличие или отсутствие дождя как природного явления или величина сугробов не влияют на работоспособность покрытия. Следовательно, указанные датчики не являются технически обоснованными. С другой стороны мы можем установить массу самых разнообразных и технически обоснованных чувствительных элементов – сенсоров на каждый элемент конструкции. В этом случае стоимость таких чувствительных элементов в совокупности со стоимостью системы сбора и обработки информации может превысить стоимость сооружения, что несомненно будет экономически необоснованным.

Называя мониторингом систему сбора и обработки данных, отвечающую перечисленным выше требованиям сформулируем его определение.

Мониторинг – система технически обоснованных и экономически оправданных наблюдений за факторами воздействия, сопротивления этому воздействию и/или за иными интегральными показателями, определяющими работоспособность и заданную надежность сооружения, производимых с периодом при котором вероятность возникновения неблагоприятного события или проявления его последствий ничтожно мала (сводится к минимуму или некоторой заданной величине).

Как правило, в строительстве различают три стадии: подготовки строительства, возведения сооружения, его эксплуатации. Каждой из этих стадий соответствует своя программа мониторинга. Мониторинг на первой стадии по сути совпадает с функциями технического

надзора, мониторинг на второй стадии представляет собой геодезические и геомеханические наблюдения. Стадия эксплуатации в методическом плане самая ответственная стадия строительного мониторинга, что обусловлено хотя бы ее продолжительностью. На этой стадии должно осуществляться слежение за возможными отклонениями в работоспособности систем жизнеобеспечения здания, включая и систему несущего каркаса, а так же за специфическими параметрами эксплуатации.

Остановимся на последних более подробно. Служба эксплуатации призвана обеспечить безаварийную работу всех систем здания и высокую надежность [6] его конструкций. В связи с этим актуальным становится постоянный мониторинг инженерных систем здания. Сбои в работе систем водоснабжения и водоотведения, могут привести: к значительному изменению массовых характеристик сооружения из-за скопления воды в локальных зонах, не предусмотренных проектом; деструкции конструктивных элементов сооружения; замачиванию грунтов основания и тем самым к изменению их свойств. Отказ в работе системы приточной вентиляции при продолжающейся работе системы вытяжной вентиляции может привести к значительной разности давлений внутри и вне сооружения, что повлечет непроектное увеличение воздействий внешней среды. Отказ в работе системы энергообеспечения может спровоцировать прекращение работ по отчистке снегового покрова и т.п. О проблемах, связанных с отказом систем пожаротушения лучше не упоминать.

Кроме слежения за состоянием инженерных систем службы эксплуатации призваны следить и за состоянием конструктивных элементов здания. Разрушение этих элементов или нарушение нормативных показателей в их работе являются следствием превышения, в вероятностном плане, воздействие над сопротивлением воздействию. Значит необходимо слежение не только за

нагрузками, которые могут возникнуть в элементах конструкции, но и за состоянием самих конструкций. Если первый аспект находит решение на стадии возведения сооружения, то второй аспект требует специального мониторинга. В железобетонной конструкции мы должны следить как за состоянием арматуры и степенью ее коррозии, так и за состоянием бетона и его возможной деструкцией. Вероятно, здесь потребуется разработка новых методов, адаптация старых к новым условиям. При разработке таковых предпочтение следует отдать методам, при которых определяются свойства материала конструкции на возможно большем по объему, площади или протяженности участке конструкции. В частности могут быть использованы методы, основанные на изменении электрического сопротивления армирующих сеток при коррозии арматуры или методы, основанные на изменении амплитудно-фазовых характеристик звуковой волны при ее прохождении через бетон или железобетон, а также методы, основанные на изменении светового потока, проходящего по протяженному оптическому волокну, заложенному в конструкцию при механическом воздействии на него.

Соотношения величин воздействия и сопротивления этому воздействию, как было отмечено выше, может быть заменено некими интегральными показателями. Поэтому системы мониторинга, используемые на стадии эксплуатации могут и должны включать наблюдения за этими показателями. К таковым следует отнести методы, основанные на измерении собственных частот колебаний конструкции в целом или ее элементов, а также уже упоминавшейся акустический метод. Изменения собственных колебаний может произойти только в результате изменения соотношения массово-жесткостных показателей системы. Показатель, связанный с изменением частот колебаний является наиболее общим и как следствие, наименее надежным из возможных показателей качества сооружения. Его расшифровка и тем более локализация дефекта, вызывающего изменения

показателя весьма затруднены. Метод, основанный на акустической эмиссии является интегральным показателем «здоровья» конструкции на охватываемом участке. Его достоинство заключается в очень низкой стоимости чувствительных элементов.

В сложных инженерных сооружениях с уникальными конструктивными элементами необходим мониторинг за состоянием этих элементов. Наблюдения могут осуществляться: за геометрическими параметрами элемента или его расположением по отношению к сопряженным конструкциям (относительные перемещения на уровнях мостовых переходов центрального шпиля и башен «Восток» и «Запад» высокого комплекса «Федерация», смещение покрытия ледового дворца на Ходынском поле относительно жесткого опорного кольца в местах опирания); частотой и амплитудой колебания балластных грузов (высотных сооружениях); изменением геометрических характеристик конструкции (покрытие крытого конькобежного центра (ККЦ) «Крылатское») или его отдельных элементов (металлодеревянные фермы ККЦ); температурными характеристиками в том числе неравномерностью скорости замораживания – оттаивания полей с искусственным льдом.

К весьма сложной относится задача по мониторингу навесных фасадных систем. Практически невозможно осуществлять контроль за состоянием нескольких десятков и даже сотен тысяч элементов облицовки не говоря уже о их креплении к несущим конструкциям. Готовых, экономически обоснованных методов мониторинга таких конструкций не существует. Эта сложная научно-техническая задача ждет своего решения. Ясно одно: метод мониторинга подобных систем должен быть интегральным, охватывающим значительную поверхность сооружения и позволяющим проводить локализацию дефекта с точностью до нескольких элементов облицовки. Выявление конкретного элемента и причин возникновения повреждения может быть

осуществлено при производстве ремонтно-восстановительных работ, осуществляемых промышленными альпинистами.

К специфическим элементам конструкции также относятся межэтажные перекрытия высотных сооружений башенного типа. Эти перекрытия призваны увеличивать жесткость сооружения, снизить амплитуду колебаний, увеличив их частоту. Увеличение жесткости происходит за счет выполнения перекрытий не плоскими, а тарельчатыми. Такая форма перекрытия способствует работе ядра жесткости, колонн и пилонов как единого геометрического элемента с моментом инерции многократно превосходящим сумму моментов инерции отдельных составляющих сечения. Такие перекрытия исключают возможность отклонения поверхности конструкции пола устроенного по перекрытию от плоскости, что не является характерным для плоского межэтажного перекрытия отдельные части которого могут выходить из плоскости. Второй специфической особенностью тарельчатого перекрытия является увеличение «тарельчатости» по мере приближения к основанию. «Тарельчатость» верхних этажей меньше чем нижних.

#### Литература

1. Болотин В.В. Применение методов теории вероятности и теории надежности в расчетах сооружений М., Издательство литературы по строительству, 1971г.
2. Ржаницин А.Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность. М., Стройиздат, 1978г.
3. Степнов М.Н. Статистическая обработка результатов механических испытаний. М., Машиностроение, 1972г.
4. Крыжановский А.Л., Рубцов О.И. Вопросы надежности проектного решения проектного решения фундаментных плит высотных зданий. Вестник МГСУ №1 2006г.
5. Никитин П.Н. Разработка и внедрение методов расчета высотных металлических конструкций на воздействие порывов ветра с выделением квазистатической и резонансной составляющих их реакции. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. М., ЗАО «ЦНИИПСК им. Мельникова», 2006 г.
6. ГОСТ 27.002-89 Надежность в технике

© Пятницкий А.А., Кухта А.В., Парфенова М.И., Срывкова М.В., 2011