

**ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ СРЕДСТВ МОНИТОРИНГА  
СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКЦИЙ  
И ГРУНТОВ ОСНОВАНИЙ  
ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЙ**

УДК 550.8.08

*Таракановский Вячеслав Константинович  
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г.Москва*

Высотное здание – это уникальное сооружение, образующее единую лито-техническую систему с геологической средой в его основании. Каждый такой объект имеет архитектурные и конструктивные особенности и находится в индивидуальных инженерно-геологических, геоморфологических и тектонических условиях, характерных для территории, на которой он проектируется и возводится.

Обеспечение безопасности высотных зданий в процессе их возведения и эксплуатации требует постоянного контроля состояния объекта. Именно поэтому в Московских городских строительных нормах (МГСН 4.19-2005) предусмотрено оснащение здания системой инструментального мониторинга.

Стоит отметить, что высотные здания наиболее интенсивно воздействуют на грунтовый массив в их основании как за счет больших величин статических нагрузок, определяемых весом здания, так и за счет разнообразных внешних нагрузок (ветровые, сейсмические и пр.), активно воспринимаемых высотными объектами. Таким образом, контроль состояния высотного здания немислим без изучения процессов в грунтовом массиве основания, как одного из важнейших факторов стабильности сооружения.

В настоящее время в геотехническом и строительном мониторинге существует набор инструментов и методик для контроля стабильности конструкций и грунтов основания, динамики развития деформаций, а также их перераспределения в процессе эксплуатации объекта.

В зависимости от параметров сооружения, которые необходимо контролировать, можно выделить четыре основных блока полноценной системы мониторинга высотного объекта:

- 1) контроль изменения напряженно-деформированного состояния основных конструктивных элементов фундамента и надземной части зданий;
- 2) контроль изменения пространственных характеристик объекта, структурной целостности конструкции в целом, технологических швов, стыков и сочленений, перемещений основных элементов относительно друг друга;
- 3) контроль состояния грунтового массива в основании и в окрестности здания, влияющих на окружающую застройку;

- 4) измерения собственных частот колебаний здания как интегральной характеристики состояния конструкции в целом.

Целью представленного обзора является наиболее полная характеристика состава и параметров оборудования, применяемого для создания комплексных систем мониторинга высотных объектов в России и за рубежом.

### **1. Инструменты и методы мониторинга напряженно-деформированного состояния конструктивных элементов**

Изменение напряженно-деформированного состояния конструкций может быть обусловлено множеством причин, таких как низкое качество материалов, нарушение порядка проведения строительно-монтажных работ, неравномерные осадки зданий, неучтенные проектом дополнительные нагрузки и т.д.

Для контроля динамики развития напряжений в конструктивных элементах используются тензометрические датчики различных типов (в зависимости от типа сенсора и схемы установки). В качестве регистрирующих элементов могут использоваться струнно-акустические, резистивные или оптоволоконные сенсоры. Стандартный тензометрический датчик представляет собой стержень, один конец которого жестко закреплен, а второй («рабочий») конец имеет некоторую величину свободного хода. При деформации сжатия или растяжения этот конец перемещается, изменяя базовую длину датчика (она может быть довольно разной, от 10 см до 1 м), что приводит к изменению регистрируемых сенсором показаний.

Таким образом, тензометрические датчики позволяют измерять реальную величину относительной деформации в точке установки. Наблюдения могут производиться непрерывно, в том числе в автоматическом режиме, и, тем самым, отслеживать динамику изменения этой величины. В дальнейшем, зная деформационные характеристики материала конструкции (модуль упругости), можно перевести полученные величины относительной деформации в реальные величины механических напряжений, что позволяет оценить работу как отдельных конструктивных элементов, так и конструкции в целом.

Тензометрические датчики (рис.1) позволяют контролировать развитие напряжений в конструкции с момента ее возведения и на протяжении всего срока эксплуатации объекта.

Технические характеристики тензометрических датчиков различных типов представлены в табл.1.

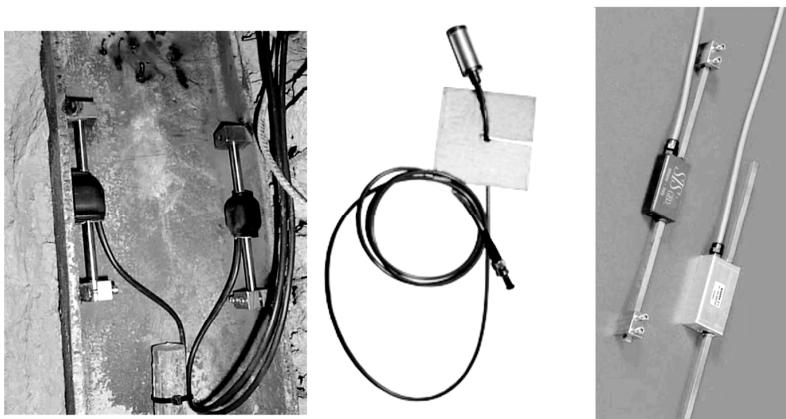


Рис. 1. Внешний вид тензометрических датчиков разных типов

Таблица 1

Технические характеристики тензометрических датчиков

Характеристики	Тип сенсора		
	струнно-акустический	резистивный	оптоволоконный
Диапазон измерений	3000 $\mu\epsilon$	$\pm 1500 \mu\epsilon$	$0 \dots 2 \cdot 10^{-2}$
Разрешение	1 $\mu\epsilon$	1 $\mu\epsilon$	10 $\mu\epsilon$
Точность	<2% от шкалы	<2% от шкалы	1,5%
Рабочая температура	-20... +60°C	-20...+70°C	-30...+60°C

В зависимости от материала конструктивного элемента могут использоваться различные способы монтажа тензометрических датчиков. В железобетонных конструкциях датчики устанавливаются на арматуру или на специальных подвесах внутри арматурного каркаса непосредственно перед заливкой бетона. Для контроля развития напряжений в арматуре используются датчики, установленные в лабораторных условиях на отрезок арматуры требуемого диаметра, который легко встраивается в существующее арматурное поле при помощи сварки. Мониторинг напряженно-деформированного состояния стальных конструкций осуществляется при помощи накладных тензометрических датчиков, которые либо имеют специальные установочные блоки-наконечники, привариваемые к конструкции, либо крепятся непосредственно к конструкции при помощи аппарата точечной сварки или эпоксидной смолой.

При создании системы мониторинга зачастую невозможно установить датчики во все интересующие элементы конструкции, так как для этого необходимо использовать слишком большое количество датчиков и коммутационных комплектов, что неизбежно приводит к значительному росту стоимости системы. В этом случае представляется рациональным устанавливать датчики в наиболее нагруженных (по результатам компьютерного моделирования) конструктивных элементах фундамента, подземной части и первых этажей.

### **2. Контроль изменения пространственных характеристик объекта и структурной целостности конструкции**

При возникновении неравномерной осадки грунтов основания или нарушении в работе конструкции будут наблюдаться изменения пространственных характеристик здания, такие как отклонения от вертикали, смещения конструктивных элементов и т.д. Для контроля этих параметров могут использоваться как различные геодезические методы (от традиционной нивелировки до пространственного лазерного сканирования объекта и GPS-технологий), так и широкий набор инструментальных средств: наклономеры и отвесы различных типов, а также системы измерения неравномерных осадок конструкции здания.

Данные об изменении пространственных и геометрических характеристик показывают только конечный результат деформации конструкции, но не отражают реального процесса развития этих деформаций и изменения состояния грунтов основания объекта. Поэтому целесообразно использовать данные методы в качестве дополнения к системе инструментального мониторинга здания.

#### **2.1. Геодезические методы контроля изменения пространственных характеристик сооружения**

В строительной практике наиболее распространены геодезические наблюдения за вертикальными смещениями (осадками) зданий и сооружений, а также за перемещениями отдельных конструктивных элементов. Методика стандартного топогеодезического контроля осадок зданий и грунтов основания с помощью прецизионных цифровых нивелиров (высокоточное геометрическое нивелирование) довольно подробно описана в специализированной литературе и нормативных документах. Остановимся подробнее только на двух наиболее современных геодезических методиках – GPS-мониторинге и лазерном сканировании высотных объектов.

Методика GPS-мониторинга здания во многом подобна традиционным геодезическим наблюдениям. При создании системы мониторинга

по периметру высотного здания и на отдельных конструктивных элементах устанавливаются высокоточные GPS приемники, а также создается опорная сеть, на основе базовых станций, расположенных вне зоны влияния сооружения. Примером GPS приемника, применяемого для мониторинга высотных зданий, является высокоточный двухчастотный приемник Sokkia GSR2700 ISX, технические характеристики которого представлены в табл.2.

Таблица 2

Технические характеристики двухчастотного GPS-приемника Sokkia GSR2700 IS

Число каналов	72 канала, GPS L1/L2 полный код и фаза несущей, L5, ГЛОНАСС L1/L2 полный код и фаза несущей
Точность в "Кинематике с постобработкой"	в плане 10 мм + 1 мм/км, по высоте 20 мм + 1 мм/км
Точность в "режиме реального времени"	в плане 10 мм + 1 мм/км, по высоте 20 мм + 1 мм/км
Точность в "статике" и "быстрой статике" при 5 и более спутниках	в плане 3 мм + 0,5 мм/км, по высоте 10 мм + 1 мм/км
Рабочая температура	-20...+65°C

Определяя координаты контрольных точек и сопоставляя результаты измерений в отдельных точках, получают изменение пространственного положения здания в целом и перемещение конструктивных элементов относительно друг друга.

Одной из самых современных геодезических методик мониторинга высотных зданий является лазерное сканирование. Суть технологии заключается в определении пространственных координат точек поверхности объекта посредством измерения расстояния до всех точек с помощью лазерного безотражательного дальномера. При каждом измерении луч дальномера отклоняется от своего предыдущего положения так, чтобы пройти через узел некой мнимой нормальной сети, называемой сканирующей матрицей. Количество строк и столбцов матрицы может регулироваться. Чем выше плотность точек матрицы, тем выше плотность точек на поверхности объекта. Результатом измерений является некое множество точек с трехмерными координатами.

В большинстве конструкций сканеров используется импульсный лазерный дальномер. На пути к объекту импульсы лазерного излучения проходят через систему зеркал, которые осуществляют пошаговое отклонение лазерного луча. Наиболее распространенной является конструкция, состоящая из двух подвижных зеркал, одно из которых отвечает за вер-

тикальное смещение луча, а другое – за горизонтальное. Зеркала сканера управляются прецизионными сервомоторами, которые обеспечивают точность направления луча лазера на снимаемый объект. Примером наземного лазерного сканера является Leica ScanStation 2. Технические характеристики этого прибора приведены в табл.3.

Таблица 3  
Технические характеристики лазерного сканера Leica ScanStation 2

Тип сенсора		импульсный лазерный сканер с двухосевым компенсатором
Количество точек	по горизонтали	20000
	по вертикали	5000
Поле зрения, °	по горизонтали	270
	по вертикали	360
Точность определения положения точки		6 мм на 50 м
Частота сканирования		до 50000 т/с
Максимальное расстояние		до 300 м при отражении 90%
Рабочая температура		-25...+65°C

Работы по сканированию зачастую приходится проводить в несколько сеансов, так как все поверхности объекта просто не видны с одной точки наблюдения. Затем сканы, полученные с каждой точки наблюдений, совмещаются в единое пространство в специальном программном модуле. Для составления общей поверхности здания на стадии полевых работ необходимо предусмотреть получение сканов с зонами взаимного перекрытия. При этом перед началом сканирования в этих зонах нужно разместить специальные мишени, по координатам которых и будет происходить процесс соединения изображений. Можно совмещать облака точек, используя лишь характерные точки снимаемого объекта, но при этом неизбежна существенная потеря точности съемки.

При сканировании координаты точек обычно вычисляются в системе координат самого сканера. Поэтому необходимо провести дополнительное определение координат как минимум трех мишеней в стандартизированной системе. Чаще всего эта задача решается с помощью безотражательного тахеометра. Трех точек будет достаточно для трансформации координат всего массива данных в необходимую нам координатную систему.

В дальнейшем при систематическом проведении циклов сканирования объекта можно получить смещения каждой точки скана или некоторого массива точек, отвечающего определенному конструктивному элементу. Это позволяет анализировать перемещения конструкции в це-

лом, отдельных элементов относительно друг друга, а также контролировать раскрытие трещин, важных стыков и сочленений.

В настоящее время разработаны автоматизированные системы геодезического мониторинга высотных зданий, такие как GeoMos (Leica Geosystems), Циклоп (Геодезический мониторинг) и другие. Измерения перемещения деформационных марок (деформационных призм, GPS-приемников) в таких системах выполняются различными типами измерительных приборов, которые управляются единой автоматизированной компьютерной системой. Измерительными приборами в этих системах служат высокоточные электронные тахеометры и нивелиры, датчики углов наклона и спутниковые системы GPS, температурные датчики и т.д. Управляющие блоки таких систем позволяют проводить измерения дистанционно и в автоматическом режиме, с высокими скоростью и точностью.

### 2.2. Инструментальные наблюдения изменения пространственных характеристик здания

Альтернативой геодезическим методикам контроля пространственных характеристик здания служат инструментальные средства мониторинга, которые также позволяют отслеживать изменения пространственного состояния и геометрических параметров конструкции.

Для измерения отклонения здания от вертикали используются датчики наклона поверхности (наклонометры). Существуют одноосные и двухосные модификации наклонометров, которые оснащаются различными типами сенсоров: твердотельным акселерометром, компенсированным серво-акселерометром, электрическим преобразователем DTE и др.

Наклонометры (рис.2) устанавливаются непосредственно на конструктивные элементы для долговременного автоматического контроля изменения угла наклона поверхности конструкций.

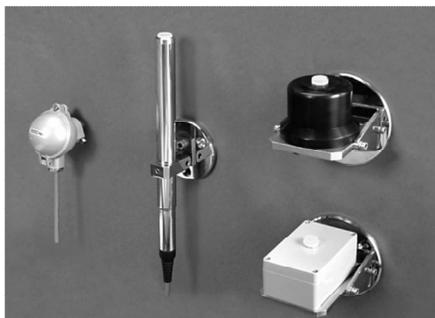


Рис. 2. Внешний вид датчиков наклона поверхности

Располагая серию датчиков вдоль вертикальной оси здания на разных этажах, можно контролировать не только изменения угла наклона, но и равномерность изменения этого параметра по высоте. В случае возможной неравномерности в отклонении разных частей здания целесообразно закладывать несколько вертикальных профилей датчиков наклона в каждой из частей конструкции. Технические характеристики датчиков наклона поверхности в зависимости от типа сенсора представлены в табл.4.

Таблица 4

Технические характеристики датчиков наклона поверхности

Характеристики	Тип сенсора		
	твердотельный акселерометр	серво-акселерометр	преобразователь DTE
Полные шкалы	$\pm 10^\circ, \pm 20^\circ$	$\pm 10^\circ, \pm 14,5^\circ, \pm 30^\circ$	$\pm 10^\circ, \pm 20^\circ$
Разрешение датчика	0,001% шкалы	0,001% шкалы	0,05% шкалы
Суммарная точность	$\leq \pm 0,4\%$ шкалы	$\leq \pm 0,07\%$ шкалы	$\leq \pm 0,4\%$ шкалы
Рабочая температура	-40...+85°C	-20...+80°C	от -40...+85°C

Одним из важнейших показателей нарушения нормальной работы конструкции или изменения состояния грунтов основания является неравномерность распределения осадок конструкции здания по площади. Возникновение неравномерных осадок может привести к развитию деформаций как отдельных элементов, так и конструкции в целом.

Инструментальный контроль неравномерной дифференциальной осадки или подъема конструкции высотных зданий осуществляется при помощи систем типа DSM.

Система DSM состоит из цепочки датчиков уровня, устанавливаемых на поверхность конструктивных элементов по некоторому выбранному контуру (чаще всего – по внутреннему или внешнему периметру здания).

Датчики соединены трубкой с контрольной емкостью, которая расположена на твердом грунте вне зоны влияния здания, образуя замкнутую гидравлическую систему с заданными начальными значениями давления жидкости для каждого датчика. Вся система заполняется специальной деаэрированной смесью (50% глицерина и 50% воды).

Давление жидкости в каждой точке отражает разницу высотных отметок между датчиками и контрольной емкостью. Соответственно, изменение положения сенсора (осадка или подъем) вызовет пропорциональное изменение давления жидкости. Сопоставление показаний отдельных датчиков между собой позволяет оценить неравномерность осадок. Технические характеристики системы измерения неравномерных осадок DSM даны в табл.5.

Технические характеристики системы DSM

Характеристики	Тип сенсора	
	высокочувствительный динамометр	линейный потенциометр
Диапазон измерений	$\pm 40$ мм	$\pm 100$ мм
Разрешение датчика	0,01 мм	0,01 мм
Суммарная точность	$\pm 0,1$ мм	$\pm 0,6$ мм

Единственным существенным недостатком данной системы является высокая чувствительность к изменению температуры, поэтому при проведении измерений достаточно важно контролировать температуру в контрольных точках для введения необходимых корректировок.

Существует также модификация системы DSM, разработанная для измерения неравномерности осадок грунтов. В этой системе можно закладывать профили датчиков не только по площади здания, но и вертикально по разрезу для оценки неравномерности развития осадок грунтов по глубине.

Для получения полноценной картины деформационного состояния конструкции высотного здания необходимо дополнительно контролировать смещения по наиболее деформируемым сочленениям и стыкам, перемещения элементов конструкции относительно друг друга и раскрытие трещин, так как эта информация напрямую отражает нарушение структурной целостности конструкции.

Данный тип измерений осуществляется при помощи датчиков перемещений (рис.3), оснащенных различными типами сенсоров: механическим, электрическим, струнным и др.

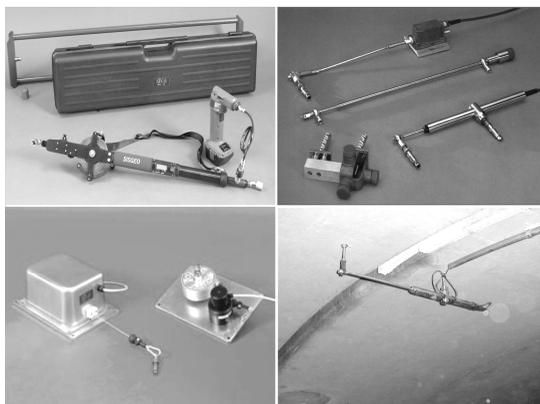


Рис. 3. Внешний вид датчиков перемещений

В общем виде приборы измеряют расстояние между двумя контрольными точками, которые располагаются (обычно при помощи анкерного крепления) на обеих сторонах стыка или трещины. Если необходимо производить контроль перемещений в двух (вертикально, горизонтально) или более направлениях, то устанавливается система датчиков, расположенных в разных плоскостях. Технические характеристики датчиков перемещений различных типов представлены в табл.6.

Таблица 6  
Технические характеристики датчиков перемещений

Характеристики	Тип сенсора		
	съемный деформометр	линейный потенциометр	струнный
Диапазон измерений	50 мм	10, 25, 50, 100, 150 мм	10, 25, 50, 100, 150 мм
Разрешение	0,01 мм	0,01 мм	0,01
Точность	$\pm 0,02$ мм	$\pm 0,3$ % шкалы	0,5 % шкалы
Рабочая температура	-20...+60°C	-20...+60°C	-20...+80°C

В зависимости от поставленной задачи диапазоны измеряемых перемещений могут варьировать от первых десятков миллиметров (при контроле раскрытия трещин) до первых десятков метров (при необходимости контролировать перемещения отдельных конструктивных элементов относительно друг друга).

### 3. Контроль состояния грунтового массива в основании и окрестности здания

Грунтовой массив в основании высотных зданий в большинстве случаев представляет собой сложную динамическую систему, характеризующуюся дифференцированным строением, параметры которой в процессе строительства и эксплуатации здания меняются достаточно интенсивно, а иногда и просто непредсказуемо.

Отличие реального изменения свойств грунтов основания от расчетных моделей может быть обусловлено как низким качеством проведенных инженерно-геологических изысканий, так и недостатками самих расчетных моделей и методик, поэтому при создании полноценной системы мониторинга высотного объекта очень важно, чтобы контроль параметров грунтов (например, осадки) производился непосредственно в среде.

Основными параметрами состояния грунтового массива основания являются: вертикальные (осадки) и горизонтальные деформации грунто-

вой толщи, распределение давления на грунт в основании сооружения и гидрогеологический режим.

Измерение осадок грунтов можно производить как дифференцировано (последовательно), так и просто получая общее значение осадки. Контроль горизонтальных перемещений грунтов очень важен для участков со сложным геологическим строением и потенциальной опасностью развития оползневых процессов. Гидрогеологические наблюдения могут ограничиваться лишь измерением уровня первого водоносного горизонта, но могут и включать в себя наблюдения за более глубокими горизонтами, поровым давлением жидкости и т.д.

### 3.1. Мониторинг осадок грунтов основания

Наблюдения за послойными деформациями грунтовой толщи имеет первостепенную важность для участков со сложным геологическим строением, где массив представлен переслаиванием различных типов осадочных грунтов с разными физико-механическими свойствами. Мониторинг дифференциальных осадок в таком массиве дает информацию о вариациях величины осадки в пределах отдельных инженерно-геологических элементов, что достаточно важно для принятия решений по укреплению грунтов.

Контроль послойных осадок производится при помощи скважинных магнитных экстенсометров типа BRS (рис.4), которые представляют собой систему, состоящую из внешней гофрированной трубы, внутренней трубки доступа и набора магнитных колец со специальными фиксаторами в грунте.

Магнитные кольца (единичные датчики осадки) размещаются по всей длине гофрированной трубы с заданным интервалом с последующим опусканием всей конструкции в скважину. Местоположение и глубина скважины, а также шаг между кольцами определяются по материалам инженерно-геологических изысканий и результатам расчетов.

После установки экстенсометра в грунтовой массив при помощи магнитного детекторного зонда проводится определение начального положения магнитных колец. Затем, по данным измерений, в заданные моменты времени рассчитывают величины поинтервальных смещений колец относительно их начального положения. Изменение расстояния между двумя соседними датчиками соответствует деформации грунта за интересующий период в пределах слоя, расположенного между этими кольцами. Технические характеристики системы BRS приведены в табл.7.

В дальнейшем эти значения сопоставляются с предыдущими расчетами и строятся графики динамики развития осадок по заданным интервалам. Сопоставляя результаты измерений по нескольким скважинам, можно также оценить неравномерность развития осадок по площади в пределах любого интересующего интервала глубин.

Технические характеристики магнитного экстенсометра BRS

Точность единичного определения осадки по скважине		±1 мм
Размеры зонда	наружный диаметр	20 мм
	длина	100 мм
Диаметр антифрикционной трубы		55 мм
Диаметр трубки доступа		32 мм
Интервал рабочих температур		– 40...+80°С

Единственным существенным недостатком данного метода является то, что измерения можно проводить только в автономном («ручном») режиме. Но так как осадка сооружения – довольно длительный процесс, эта проблема решается путем организации режимных наблюдений.

Наряду со стандартными геодезическими методиками для контроля общих (суммарных) осадок грунтовой толщи в основании здания используются автоматические стационарные системы контроля суммарных осадок грунта – фиксированные экстензометры (рис.5).

Они состоят из анкера, забуренного в плотные коренные породы (которые принимаются как несжимаемые) и оборудованного в верхней части системой осадочного базиса, и контрольного оголовка с электрической или оптической нивелировкой верхней части подъемного стержня, которая обеспечивает запись суммарной осадки грунта в автоматическом режиме.

При осадке здания подъемный стержень осадочного базиса поднимается относительно своего первоначального положения. Так как торцевой конец анкера закреплен в несжимаемых породах, то это перемещение, регистрируемое электрическим сенсором в измерительном оголовке, соответствует общей деформации грунтовой толщи между основанием здания и коренными породами. Технические характеристики фиксированного экстензометра представлены в табл.8.



Рис. 4. Составные части магнитного экстенсометра BRS

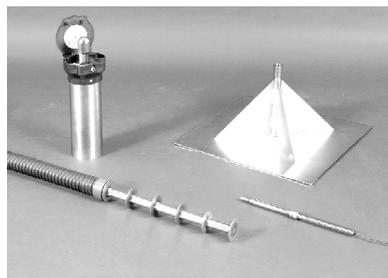


Рис. 5. Составные части фиксированного экстензометра

Таблица 8

Технические характеристики фиксированного экстензометра

Тип сенсора	Электрический преобразователь DTM
Диапазон	250, 500, 1000 мм
Суммарная точность	0,25% от шкалы
Выходной сигнал	4-20 мА

Стоит отметить, что контроль общей осадки грунтов не отображает реальной картины уплотнения геологических формаций в основании здания, но, в отличие от систем измерения дифференциальных осадок, может вестись непрерывно в автоматическом режиме. Таким образом, используя обе эти методики в комплексе с режимными геодезическими наблюдениями, представляется возможным компенсировать недостатки каждого из них и получить полную картину деформации грунтового массива основания в процессе возведения и эксплуатации здания.

### **3.2. Контроль горизонтальных перемещений грунта**

При потенциальной угрозе развития оползневых процессов на участке строительства очень важно иметь информацию о величине горизонтальных смещений грунтов в основании сооружения. Скорость развития оползневых процессов при воздействии внешних факторов (например, подтопления) может быть достаточно высока, поэтому необходимо проводить непрерывные наблюдения за горизонтальными перемещениями в автоматическом режиме.

Контроль горизонтальных перемещений грунтов может осуществляться с поверхности с использованием геодезических (в том числе спутниковых) методик. Специфика проведения этих работ аналогична геодезическому контролю изменения осадок и пространственного положения объекта, с той лишь разницей, что деформационные марки (GPS-приемники) закрепляются на поверхности грунта или на торцевом конце анкера, который закладывают на интересующую исследователя глубину.

Альтернативным вариантом контроля горизонтальных перемещений грунтов являются инструментальные скважинные наблюдения. Этот тип измерений осуществляется при помощи различных инклинометрических систем как в «ручном» (при помощи переносных инклинометрических зондов), так и в автоматическом режиме (с использованием стационарных инклинометрических систем).

Измерения при помощи портативного инклинометрического зонда осуществляются в скважинах, обсаженных специальными инклинометрическими колоннами, состоящими из металлических или пластиковых

инклинометрических труб с канавками по осям. Канавки в колонне расположены по двум взаимно перпендикулярным плоскостям, что обеспечивает проведение измерений в двух направлениях. Материал труб выбирается в зависимости от глубины скважины.

Зонд инклинометра (рис.6) представляет собой металлический стержень с направляющими роликами, который оснащен двухосным компенсационным серво-акселерометрическим сенсором. Зонд подается к катушке сигнального провода, длина которого выбирается в соответствии с глубиной скважины, и опускается в скважину. При прохождении по колонне зонд измеряет ее отклонения от вертикали, что дает возможность контролировать поперечные смещения грунта. Результаты измерений регистрируются и сохраняются непосредственно в процессе измерений портативным регистратором Archimed Datalogger. Технические характеристики этой системы представлены в табл.9.

Таблица 9

Технические характеристики инклинометрического зонда

Диапазон измерений	$\pm 15^\circ, \pm 30^\circ, \pm 90^\circ$ от вертикали
Нелинейность + гистерезис	0,02% шкалы
Повторяемость измерений	0,01% шкалы
Точность системы	$\pm 4$ мм на 30 м
Рабочая температура	от $-20$ до $+70^\circ\text{C}$

Так как инклинометрическая труба имеет два направления прохождения зонда, то по измерениям в этих двух плоскостях можно судить об общем направлении и величине смещения грунта в области скважины. При сопоставлении результатов измерений в нескольких инклинометрических скважинах можно охарактеризовать направления и величины подвижек во всем объеме массива.

Стационарная инклинометрическая система (рис.7) также состоит из обсаженной инклинометрической колонной скважины, гирлянды инклинометрических зондов, подвешенных на стальном тросе внутри нее. Модификации инклинометрических зондов (тип сенсора и количество осей измерений), устанавливаемых в скважины, определяются поставленной задачей.

Такая система, находящаяся в скважине, позволяет контролировать смещения грунта в автоматическом режиме. Данные измерений могут регистрироваться и анализироваться непрерывно в специальном программном модуле, или сохраняться в течение некоторого времени во внутренней памяти автоматического регистратора для дальнейшей обработки.

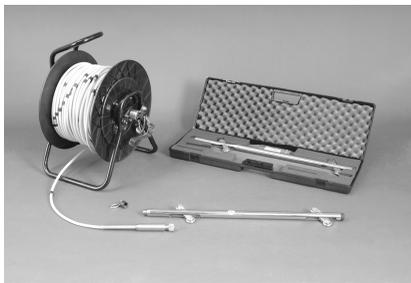


Рис. 6. Портативный инклинометрический зонд

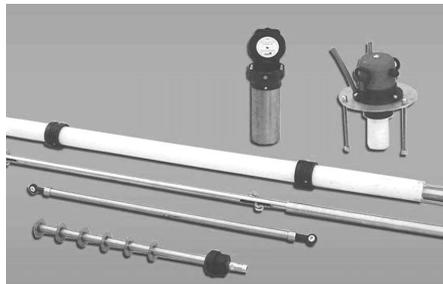


Рис. 7. Элементы стационарной инклинометрической системы

Существенно, что в периоды снеготаяния и выпадения большого количества осадков вероятность интенсивного развития горизонтальных подвижек грунта наиболее высока, поэтому на протяжении этих периодов рекомендуется проводить непрерывные измерения в автоматическом режиме.

Стоит отметить, что инклинометрические системы можно использовать и для мониторинга вертикальных смещений грунта (и даже конструкций), закладывая инклинометрические колонны в горизонтальном направлении или сочетая инклинометры с экстензометрами в единой системе. Технические характеристики стационарного инклинометра представлены в табл.10.

Таблица 10

Технические характеристики системы стационарного инклинометра

Характеристики	Тип сенсора		
	магнитно-резистивный	твердотельный акселерометр	компенсированный серво-акселерометр
Диапазон измерений	$\pm 10^\circ, \pm 20^\circ$	$\pm 10^\circ, \pm 20^\circ, \pm 90^\circ$	$\pm 10^\circ, \pm 30^\circ$
Разрешение	0,05% шкалы	0,01% шкалы	0,001% шкалы
Точность	$\pm 0,5\%$ шкалы	$\pm 0,4\%$ шкалы	$\pm 0,07\%$ шкалы
Рабочая температура	-20...+80 °С	-40...+85 °С	-20...+80°С

### 3.4. Измерения давления на грунт в основании сооружения

Наиболее интересными параметрами, отражающими совместную работу высотного здания и грунтового массива, являются давление на грунт в основании сооружения и его распределение по площади основания. Существенные различия в величинах давления и резкие изменения

этого показателя свидетельствуют о негативных изменениях физико-механических свойств грунтов и возникновении неравномерных осадок.

Контроль этого параметра производится при помощи датчиков давления (с электрическим, струнным, оптоволоконным или гидравлическим сенсором), устанавливаемых непосредственно на грунт в основании сооружения – под фундаментную плиту.

Датчики давления на грунт (рис.8) состоят из камеры давления и измерительного элемента. Камера давления обычно составлена из двух жестких пластин (например, из нержавеющей стали), сваренных вместе по периметру. Внутреннее пространство камеры давления заполняется деаэрированным маслом или другой несжимаемой жидкостью.

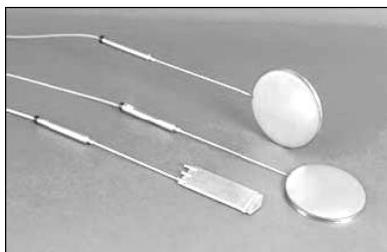


Рис. 8. Внешний вид датчиков давления

Давление, воспринимаемое камерой, передается на мембрану измерительного элемента, к которой присоединен сенсор (струнный, электрический или оптоволоконный), который преобразует давление в электрический сигнал. Измерительный элемент может встраиваться в корпус камеры давления или выноситься посредством соединительной трубки. Технические характеристики датчиков давления различных типов представлены в табл.11.

Таблица 11

Технические характеристики датчиков давления

Характеристики	Тип сенсора		
	оптоволоконный	струнный	электрический
Диапазон измерений	от 0 до 1 МПа	0,3; 0,5; 0,7; 1; 1,7; 2; 5; 7 МПа	0,2; 0,5; 1; 2; 5; 10 МПа
Разрешение	Нет данных	0,025% шкалы	0,01% шкалы
Точность	2% шкалы	<0,5% шкалы	<0,3% шкалы
Рабочая температура	-20...+40°C	-20 ° ...+80°C	-20...+100°C

Выбор схемы установки, размера камеры давления и материала, из которого изготовлен датчик, существенно влияет на достоверность получаемых результатов. В процессе изучения различных модификаций датчиков было установлено, что модуль деформации материала датчика должен быть не ниже модуля деформации среды (грунта), а размер и конфигурация камеры давления должны определяться исходя из требований к чувствительности и месту установки.

Датчики измеряют фактическое давление от здания на грунт в точке их установки под фундаментной плитой. Сопоставление показаний датчиков, установленных по определенной сетке под сооружением, позволяет получить пространственную картину распределения давлений – поле давлений и контролировать динамику его изменения.

### 3.5. Контроль гидрогеологического режима грунтового массива

Гидрогеологический режим определяет развитие многих процессов в грунтовом массиве, таких как изменение физико-механических свойств грунта при замачивании, карстово-суффозионные, оползневые и т.п. Поэтому на участках с потенциальным развитием опасных геологических процессов наблюдение за изменениями гидрогеологических параметров является одним из основных направлений мониторинга грунтов основания.

В зависимости от гидрогеологических условий участка строительства и поставленных задач гидрогеологический мониторинг может включать в себя различные виды измерений – от контроля уровня воды в скважинах (хлопушкой, ручными или стационарными уровнемерами и пьезометрами) до автоматического мониторинга таких параметров, как поровое давление.

Для измерения колебаний уровня первого от поверхности водоносного горизонта (уровня грунтовых вод) в наблюдательных скважинах могут использоваться различные инструменты от примитивной «хлопушки» до стационарного скважинного пьезометра, но наиболее простыми, дешевыми и эффективными являются индикаторы уровня воды (уровнемеры). Уровнемеры – портативные приборы, оснащенные резистивным зондом, подключенным к отградуированному сигнальному кабелю. Когда погружаемый зонд касается воды, активируются звуковой сигнал и световой индикатор, расположенные на лицевой панели катушки кабеля. В дополнение к этому зонд имеет встроенный датчик температуры и может использоваться для измерений температуры в скважине на разных глубинах.

Для наблюдения параметров режима более глубоких водоносных горизонтов используются различные виды пьезометров с электрическим, пневматическим или струнным сенсором.

Пьезометры (рис.9) используются для измерения уровня водоносных горизонтов и порового давления жидкости в разных типах грунтов от водонепроницаемых до водонасыщенных. Датчики размещаются в наблюдательных скважинах на заданной глубине, определенной по материалам инженерно-геологических изысканий.



Рис. 9. Внешний вид скважинных пьезометров

Если требуется автоматический контроль колебания уровня определенного водоносного горизонта, ствол скважины оставляют открытым и параллельно проводят измерения колебания атмосферного давления, для введения барометрических поправок при обработке результатов. Если же производится контроль порового давления в грунте, то после установки пьезометра на заданную глубину, ствол скважины выше места установки датчика запечатывается и тампонируется, чтобы исключить эффекта перетока и влияние атмосферных осадков. Технические характеристики скважинных пьезометров представлены в таблице 12.

Таблица 12

Технические характеристики скважинных пьезометров

Характеристики	Тип сенсора		
	пневматический	струнный	электрический
Диапазон измерений	от 0 до 2 МПа	0,1; 0,2; 0,5; 1; 2; 5; 10; 20 МПа	0,1; 0,2; 0,5; 0,7; 1; 1,7; 2; 3; 5 МПа
Разрешение	±0,01 % FS	0,01 % FS	0,025 % FS
Точность	±0,1% FS	<0,3 % FS	<0,5 % FS
Рабочая температура	-20...+60°C	-10...+50°C	-20...+100°C

### 4. Мониторинг колебаний конструкции здания сейсмометрическими методами

Для отслеживания изменений колебаний здания необходимо повторение наблюдений при сравнении регистрируемых волновых полей. Исходя из способов получения волновых полей и схем обработки, можно выделить три группы методик мониторинга колебаний конструкции зданий:

- с возбуждением колебаний здания искусственными источниками – ударами разной силы по зданию или в непосредственной близости от него. Основными недостатками этого метода являются: необходимость создания идентичного воздействующего сигнала для накопления отклика и подавления микросейсм; невозможность обследования всей конструкции здания, так как достаточно сложно возбудить колебания ниже 1 Гц (диапазон частот, характерный для основного тона собственных колебаний высотных зданий);
- при воздействии на здание микросейсм и их регистрации на коротких профилях в здании с последующей корреляционной обработкой. Например, при анализе функции когерентности каналов выявляются собственные колебания зданий, проводится построение амплитудных и фазовых распределений по объему сооружения. Характерным недостатком этого метода является возможность включения в обработку колебаний, наведенных на здание от других объектов, при условии подходящего соотношения частот;
- источником, возбуждающим собственные колебания здания, являются постоянно присутствующие пульсации атмосферного давления. Регистрируются одновременно пульсации давления (микробарографом) и микросейсм по трем компонентам ( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ), наблюдения могут вестись в одной точке, в том числе вне здания. При обработке выделяют тонкие линии в спектре, анализируют временной ход их амплитуд в сравнении с ходом вариаций атмосферного давления, что позволяет отсеять наведенные колебания от соседних сооружений.

Последний способ представляется наиболее технологичным и экономичным, так как обладает сравнительно низкой себестоимостью и позволяет решать достаточно широкий круг задач:

- определение собственных частот колебаний зданий и слежение за изменением их во времени;
- построение в разных точках траекторий движения собственных колебаний, на этой базе – получение картины деформаций;
- выявление нарушений в конструктивных связях;
- наблюдение за особенностями совместной работы здания с грунтами основания, в том числе появление так называемой присоединенной массы грунта к фундаменту после возведения здания.

Важным вопросом организации сейсмометрического мониторинга является подбор датчиков и их размещение. Размещение датчиков по зданию определяется его архитектурно-планировочным решением. Существенную роль играют также результаты аэродинамических испытаний макетов.

Основные параметры для выбора типа датчика – частотный диапазон и чувствительность. Несомненно, что сейсмометр должен регистрировать собственные колебания основного тона и нескольких более высокой гармоник. Для высотных зданий основной тон лежит в диапазоне менее 1 Гц (обычно 0,2-0,8 Гц), частоты выше 25-30 Гц регистрировать нецелесообразно (полезный сигнал маскируется помехами). Таким образом, мониторинг должен вестись датчиками, ориентированными на сейсмологические наблюдения. Примером оборудования, используемого для мониторинга колебаний здания, могут служить велосиметр Guralp CMG-3ESPС и акселерометр Guralp CMG-5T.

### Выводы

1. Полноценная система мониторинга высотного здания должна включать в себя набор измерительных средств, позволяющих контролировать различные параметры, как строительных конструкций, так и грунтового массива основания. Такой комплексный подход дает возможность получать достоверную и разностороннюю информацию о состоянии сооружения при сопоставлении данных измерений разных типов датчиков.

2. В настоящее время существует широкий спектр оборудования и методик мониторинга высотного объекта. Поэтому выбор конкретных типов и характеристик оборудования должен определяться исходя из архитектурного и конструктивного решения здания, результатов физического и компьютерного моделирования, а также анализа материалов инженерно-геологических изысканий и геолого-геофизической ситуации площадки строительства.

3. Взаимодействия грунтов и конструкций подземной части здания представляют собой наиболее сложный и малоизученный вопрос, а конструкции нижней части здания испытывают максимальные по величине нагрузки. Поэтому целесообразно устанавливать основную часть инструментов мониторинга в грунтовой массив основания и конструктивные элементы фундаментной плиты, стилобата и первых этажей здания.

4. Изменение физико-механических свойств грунтов под влиянием внешних факторов и развитие деформаций в конструктивных элементах могут происходить с достаточно высокой скоростью. В связи с этим важно, чтобы система мониторинга высотного объекта функционировала в автоматическом режиме.