

doi: 10.5862/MCE.55.3

Деформационный мониторинг фундаментов зданий методом гидростатического нивелирования

*Инженер-исследователь В.В. Епин;**к.т.н., научный сотрудник Р.В. Цветков;**д.ф.-м.н., заведующий лабораторией И.Н. Шардаков,**Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук*

Аннотация. При организации системы деформационного мониторинга здания важно контролировать деформационное состояние его фундаментов. Среди различных методов контроля деформационного состояния фундамента здания можно выделить метод гидростатического нивелирования, обладающий рядом достоинств. В статье показано, что для мониторинга неравномерных осадок фундаментов зданий в непрерывном режиме лучше всего использовать метод гидростатического нивелирования, который в настоящее время недостаточно широко применяется.

В работе рассмотрены факторы, влияющие на погрешность измерения методом гидростатического нивелирования, и даны рекомендации по их минимизации. Показано, что в случае расположения измерительной системы во внутренних помещениях здания можно обеспечить приемлемую точность измерений, достаточную для большинства типовых сооружений. Приведены примеры практической реализации систем мониторинга собственной разработки, основанных на методе гидростатического нивелирования, а также результаты их работы.

Ключевые слова: деформационный мониторинг; фундамент; неравномерная осадка; гидростатическое нивелирование

Причины, вызывающие повреждения и разрушения инженерных конструкций и зданий, могут быть различными: ошибки при проектировании и монтаже, износ, стихийные бедствия, неэксплуатационные нагрузки и воздействия и т.д. Для обеспечения деформационной безопасности зданий и сооружений применяются системы постоянного контроля (мониторинга) деформационного состояния объекта. В зависимости от особенностей исследуемого объекта может производиться контроль различных его элементов или всей конструкции в целом. Методы контроля каждого конкретного объекта определяются на основе математического моделирования и также зависят от степени внешних воздействий на исследуемую конструкцию. Так, например, на мостовых переходах, испытывающих постоянные динамические нагрузки, необходимо обязательно контролировать вибрацию, а в высотном здании – наклон. Для типовых зданий, как правило, важен контроль над фундаментами и несущими элементами конструкции. Изменение уровня грунтовых вод, образование карстовых пустот, суффозия грунтов, подземные выработки под сооружениями – все это может привести к деформации фундамента и самого сооружения, а при определенных условиях и к катастрофическим последствиям.

Существуют различные методы, которые позволяют осуществлять контроль над деформациями зданий и фундаментов [1]. Один из самых известных методов заключается в непосредственном измерении локальных деформаций при помощи соответствующих датчиков. Широкое распространение получили резистивные тензодатчики, струнные датчики и оптоволоконные датчики. Некоторые из таких датчиков деформаций можно размещать непосредственно в элементах фундамента при его изготовлении, что вместе с высокой их чувствительностью позволяет зафиксировать изменения в деформационном состоянии конструкции в месте установки датчика. Деформации в сложной протяженной конструкции неоднородны и зависят от многих факторов, в связи с этим оценка напряженно-деформированного состояния (НДС) всей конструкции на основе данных счетного количества деформационных датчиков затруднена. Однако с помощью таких датчиков можно оценивать изменения напряженного состояния простых конструктивных элементов, таких как балки или венты.

Еще одним перспективным методом является анализ динамических характеристик исследуемой конструкции [2, 3]. Регистрация динамических процессов происходит одновременно в нескольких точках, за счет чего можно оценивать не только частоту, но и форму колебаний. Существует два подхода, связанных со способом возбуждения колебаний конструкции: колебания,

Епин В.В., Цветков Р.В., Шардаков И.Н. Деформационный мониторинг фундаментов зданий методом гидростатического нивелирования

возникающие под действием естественных нагрузок, таких как ветровая нагрузка, микросейсмика и т. д., и колебания, возникающие под действием специальных внешних воздействий. Появление дефектов в конструкции изменяет ее частотные, фазовые характеристики, что можно зафиксировать в эксперименте. Широко данный метод применяется, например, в мониторинге мостов (которые можно промоделировать в балочном приближении), когда определяются и отслеживаются эволюции собственных частот и форм колебаний, а также декрементов затуханий.

В общем случае, когда конструкция представляет собой достаточно сложную структуру, выявить место и степень повреждения по результатам динамического эксперимента становится сложнее. Возможны различные сценарии, вызывающие изменения в отклике конструкции, и не все они могут быть обусловлены появлением повреждений. Также вызывает затруднение и определение критического порога изменения динамических характеристик, вызванного разрушением объекта. Тем не менее, данный метод активно развивается и с увеличением вычислительных мощностей позволяет решать все более сложные задачи.

При мониторинге конструкций важно контролировать геометрические параметры объекта, такие как абсолютные координаты определенных частей объекта или вертикальные и горизонтальные перемещения одних частей относительно других. Эти измеряемые величины можно использовать в качестве граничных условий по перемещениям при решении прямых задач механики деформируемого твердого тела.

Измерение абсолютных координат с помощью технологий спутникового позиционирования GPS [4] и ГЛОНАСС возможно с сантиметровой точностью при специальных дифференциальных режимах работы. Эти особенности предопределили класс задач, в которых используются данные системы: крупные природные объекты, плотины, небоскребы и мосты. Сегодня использовать системы спутникового позиционирования для деформационного мониторинга типовых конструкций нецелесообразно, однако, возможно, в будущем многие здания будут оснащаться более совершенными спутниковыми системами.

Для измерения перемещений применяют лазерные сканирующие радары [5, 6], которые измеряют расстояние от места его установки до отдельных частей объекта или установленных на нем отражателей. Данный метод позволяет достичь субмиллиметровой точности, которая зависит от расстояния до объекта, и применяется стационарно на объектах с прямой видимостью, таких, например, как дамбы и плотины.

Кроме того, при мониторинге применяются геодезические методы [7], которые позволяют производить измерения высоты при помощи оптических нивелиров и теодолитов, а также при наличии привязки к размеру (установленная шкала) определять расстояние до объекта. Более современные геодезические приборы, такие как тахеометры, позволяют, помимо углов, производить измерения расстояний. Использование таких приборов возможно для ручных мониторинговых измерений и затруднительно при автоматизированном мониторинге типовых зданий.

Метод гидростатического нивелирования

Для измерения вертикальных перемещений объекта можно использовать метод гидростатического нивелирования. На основе закона Паскаля уровни столбов жидкости в местах измерения будут определять поверхность равного уровня относительно земной поверхности. Отклонения по высоте от этой поверхности будут определять поднятие или оседание отдельных частей фундаментов здания. Основные принципы построения измерительных систем на основе метода гидростатического нивелирования изложены в середине XX века в работе П. Пелисье [8]. Данный метод нередко применяется и в геотехнических приложениях [9, 10].

При определенных условиях метод позволяет достичь точности 10 мкм, необходимой, например, при контроле осадок ускорителей заряженных частиц [11, 12] или при позиционировании телескопов [13]. Отечественные разработки автоматизированных систем гидростатического нивелирования приводятся в работах [14, 15]. В настоящее время создаются датчики для измерения уровня жидкости, основанные на современных достижениях науки, например на основе решетки Брэгга [16].

Преимуществом данного метода измерений вертикальных перемещений перед другими заключается в отсутствии необходимости прямой видимости между отдельными частями системы. Однако из-за ряда причин он не находит широкого применения в автоматизированных системах мониторинга зданий и сооружений. В качестве недостатков этого метода обычно указываются

сложность монтажа системы датчиков, высокая цена [1] и недостаточная чувствительность при использовании ограниченного количества датчиков. Рассмотрим недостатки подробнее. Сложность монтажа обусловлена прокладкой системы трубок или шлангов на исследуемой конструкции. Причем датчики гидроуровня должны располагаться в одной плоскости, как и соединяющие их трубки. Не на всех сооружениях есть помещения, расположенные на одном уровне по всей его площади (например, подвалы) или последовательно расположенные рядом друг с другом на разном уровне. При отсутствии таких помещений монтаж системы затруднен и возможен, например, снаружи здания, где система будет подвергаться воздействию окружающей среды.

В работе [1] в ходе численных экспериментов показано, что образование зоны разуплотнения грунта диаметром 5 м непосредственно под бетонной плитой толщиной 0.5 м приводит к дополнительным осадкам плиты в радиусе 10–12 м. В статье утверждается, что вследствие дискретности геодезических измерений (это относится и к методу гидростатического нивелирования) этот метод будет обладать невысокой чувствительностью к появлению дефектов. В реальных ситуациях дополнительные осадки фундамента могут происходить не только из-за разуплотнения грунта непосредственно под фундаментом. Так, в работе [17] численными экспериментами показано, что появление карста на глубине 30 м вызывает дополнительные осадки на поверхности в диаметре 50–70 м. Опираясь на результаты расчетов, в данной работе предлагается производить измерения осадок фундамента с шагом 10 м. Некоторое увеличение дискретности установки датчиков даст возможность контролировать деформации фундамента и в случае [1].

Погрешность системы гидростатического нивелирования зависит от способа монтажа и его качества, что накладывает определенные требования на монтаж системы и квалификацию персонала.

Выделим основные погрешности метода гидростатического нивелирования [8]:

- 1) погрешность от неоднородности плотности жидкости в различных частях системы, вызванной, например, различной температурой;
- 2) погрешность от различного давления газа над поверхностью жидкости в разных сосудах измерительных блоков;
- 3) погрешность от наличия в жидкости пузырьков воздуха;
- 4) погрешность от явлений поверхностного натяжения;
- 5) погрешность от колебания жидкости;
- 6) погрешность измерительной системы (индивидуальна в каждом случае).

Погрешность п. 1 можно минимизировать за счет уменьшения столбов жидкости и правильного выбора жидкости, которая должна иметь стабильные физические свойства по всей своей длине. Использование насосов для перемешивания жидкости также уменьшит погрешность, но при этом усложнит систему. Однако в некоторых случаях это оправдано для получения необходимой точности.

Например, при разности давлений воздуха в 10 Па над датчиками погрешность п. 2 составит 1 мм водного столба (при использовании воды в гидронивелире). Подобная разность в атмосферном давлении возможна между помещениями, если используются приборы для конвекции воздуха (вентиляция). Эту погрешность можно минимизировать за счет выравнивания атмосферного давления путем объединения всех датчиков воздушными трубками.

Пузырьки воздуха в трубке с жидкостью гидронивелира оказывают существенное влияние на точность измерения, особенно если перекрывают трубку полностью. В этом случае погрешность может оказаться сопоставима с размером пузыря. Необходимо осуществлять проверку на отсутствие пузырей при установке системы мониторинга. Также нужно учитывать, что вода содержит растворенный воздух, который при колебаниях температуры может выделяться и скапливаться. Полное перекрытие воздушным пузырем более критично в соединительной трубке небольшого диаметра из-за капиллярных эффектов.

Поверхностное натяжение может приводить к образованию менисков, что также влияет на погрешность. Уменьшить влияние капиллярных эффектов можно за счет увеличения диаметра измерительной части. Необходимо отметить, что при идентичности всех датчиков оказывать влияние будут не величины поверхностного натяжения, а их разность в отдельных датчиках, вызванная, например, температурными колебаниями. Также на значение коэффициента поверхностного натяжения оказывает значительное влияние наличие поверхностно-активных

веществ (ПАВ). Важно обеспечить одинаковые условия по концентрации ПАВ во всех местах установки датчиков или, например, их отсутствие.

Колебания жидкости в гидронивелире могут быть вызваны различными внешними воздействиями, например, от проходящего транспорта. Можно выделить колебания с высокой частотой и малой амплитудой (вибрации), заметные только при высокоточных измерениях, и колебания с низкой частотой, связанные с перетеканием жидкости по гидронивелиру. Периоды этих колебаний зависят от конфигурации гидронивелира, и таких частот может быть несколько (рис. 1). Для повышения точности нужно усреднять измеряемые значения хотя бы за 1 период колебаний, поскольку процессы, связанные с осадкой зданий, протекают, как правило, медленнее.

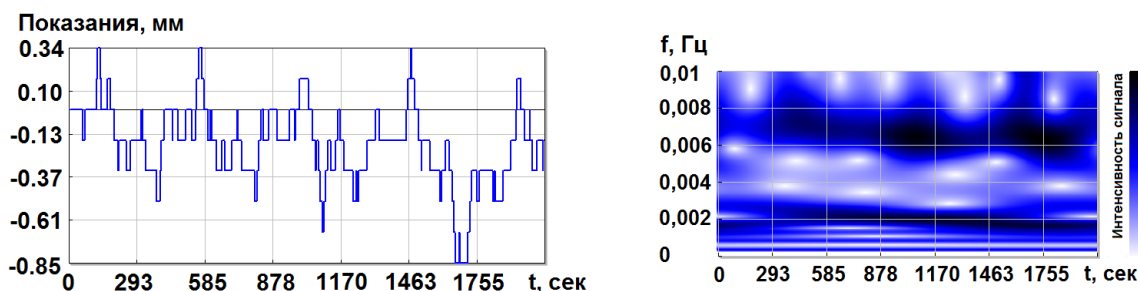


Рисунок 1. Колебания жидкости в нивелире

Указанные погрешности имеют место для всех измерительных систем на основе метода гидростатического нивелирования. Кроме отмеченных аппаратурных погрешностей, необходимо учитывать измерительную погрешность. Существует несколько методов измерения уровня жидкости:

- при помощи датчиков давления, помещенных в жидкость;
- при помощи датчиков силы, измеряющих вес тела, погруженного частично в жидкость;
- при помощи датчика перемещения, определяющего расстояние от датчика до жидкости или поплавка;
- визуально при помощи камеры.

Погрешность измерительной системы индивидуальна и зависит от ряда факторов. Для всех датчиков существует диапазон измерений, и погрешность измерения так или иначе будет связана с диапазоном. Как правило, более точные датчики имеют меньший измерительный диапазон. Диапазон подбирается для каждого конкретного случая и зависит от ожидаемого уровня осадок конструкции. Хорошим значением считается погрешность (с учетом температурной погрешности) 0.05–0.10 % от диапазона. Выбирая датчик, важно понимать, что общая погрешность измерительной системы определяется всеми указанными выше факторами. Поэтому не имеет смысла использовать высокоточный датчик с точностью в несколько микрон, если влияние других факторов не устранено, например, влияние изменения плотности жидкости вследствие колебания температуры.

Приведем конкретный пример по влиянию температуры на плотность жидкости и определим вызванное этим фактором различие в перепаде столбов жидкости [18]. При высоте столба жидкости в 25 см и 10-градусном перепаде температур (от 10 до 20 °С), согласно формуле Паскаля, искажение высот столбов жидкости составляет для воды дистиллированной 0.35 мм, для этанола – 3.4 мм, для изопропилбензола – 2.4 мм, для бензола – 2.7 мм, ацетона – 3.6 мм, метанола – 3.7 мм, глицерина (50 %) – 1.1 мм. Также следует отметить, что для воды при перепаде температур 20–30 °С перепад высот составит уже 0.65 мм. Для обеспечения точности не больше 1 мм (без компенсации) необходимо использовать в гидронивелире жидкость, плотность которой незначительно зависит от температуры. Спирты, растворители, а также их растворы имеют неудовлетворительные характеристики по зависимости плотности от температуры. Кроме того, к дополнительной погрешности может приводить изменение плотности спиртового раствора со временем, вызванное поглощением воды из окружающей среды и испарением спирта. Чтобы добиться приемлемых значений, необходимо перемешивать жидкость или компенсировать влияние разной плотности. Можно измерять температуру жидкости в нивелире и использовать программную температурную компенсацию, что уменьшит погрешность, но дискретное измерение температуры не позволит компенсировать ее влияние полностью. Некоторые авторы предлагают использовать для компенсации температуры три жидкости и соответствующий измерительный модуль [19], также предлагают производить измерение давления на 2 уровнях [20]. В работе [21]

Епин В.В., Цветков Р.В., Шардаков И.Н. Деформационный мониторинг фундаментов зданий методом гидростатического нивелирования

показывается, что в гидростатических приборах с перераспределением объемов жидкостей остаются проблемы с температурной зависимостью объема сосудов и соединительных шлангов, что нередко превосходит компенсируемые значения. Так или иначе, использование сложных компенсационных схем оправдано только в определенных случаях.

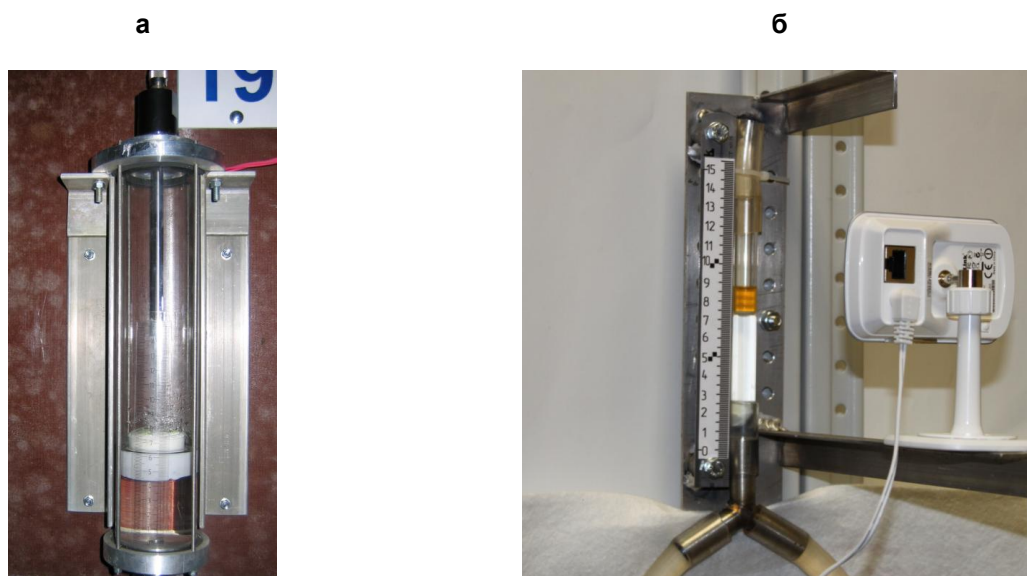
Для организации технически простой системы гидростатического нивелирования в качестве жидкости необходимо использовать дистиллированную воду или растворы глицерина. В случае применения дистиллированной воды необходимо будет поддерживать положительные температуры по всей длине гидронивелира, чтобы предотвратить замерзание носителя. Обеспечение перепада высот столбов жидкости гидронивелира в 20 см при реальном монтаже системы мониторинга достижимо, при этом измерительная часть составляет не более 10 см. В таком случае погрешность составит порядка 0.5 мм. Для достижения более высоких точностей потребуются или более сложный монтаж с меньшим перепадом высот и, соответственно, с меньшим диапазоном измерения, или специальные средства для выравнивания плотностей жидкостей. Метод гидростатического нивелирования считается сложным и дорогим, а также недостаточно точным при простой реализации, поэтому он не применяется при мониторинге типовых зданий.

Рассмотрим пример влияния изменения величины неравномерной осадки на значение погрешности, например, 1 мм на базе 10 м. Наклон и относительная разность осадок для этого случая составит $1E-04$. Согласно [22] предельный крен основания для многоэтажных бескаркасных зданий с несущими стенами из кирпича составляет 0.005, а предельная относительная разность осадок составляет 0.002. На базе 10 м разность осадок составит 50 мм и 20 мм соответственно. Для контроля этих величин будет вполне достаточно измерения разности осадок с точностью в 1 мм. Следует отметить, что при чистом изгибе на 1 мм балки длиной 10 м и толщиной 0.6 м максимальная деформация составит порядка $1E-05$, напряжения – порядка 0.3 МПа, что меньше предельного значения сопротивлению бетона на растяжение (1 МПа).

Все вышесказанное позволяет сделать вывод, что для типовых гражданских зданий можно применять системы гидростатического нивелирования и без использования специальных средств для выравнивания температур/плотностей жидкостей (при условии использования воды в качестве носителя). Это обеспечит удовлетворительную точность измерений (0.5–1 мм) при относительно несложной технической реализации.

Результатом работы системы мониторинга являются величины неравномерных осадок сооружения, которые можно использовать для расчета нормативных величин [22], а также в качестве данных при моделировании механического состояния объекта исследования.

Рассмотрим варианты разработанных систем мониторинга неравномерных осадок сооружений, основанных на методе гидростатического нивелирования.



**Рисунок 2. Внешний вид датчика системы гидростатического нивелирования:
а) поплавковый датчик, б) датчик с ip-камерой**

1. Система гидростатического нивелирования с использованием поплавковых датчиков

Вариант автоматизированной системы мониторинга был апробирован на здании, расположенном на закарстованной территории. В составе этой системы были использованы различные датчики, в том числе, сенсоры, измеряющие неравномерные осадки фундамента. Принцип их действия основан на измерении расстояния от жестко закрепленной базы до поплавка [23]. Для этих целей был использован датчик перемещения Micro-Epsilon LVP-100 с закрепленным поплавком. Этот датчик перемещения обеспечивал измерения в диапазоне 100 мм с погрешностью 0.2 мм, что позволяло измерять неравномерную осадку сооружения в несколько сантиметров.

Измеренные данные сохранялись в базе данных на сервере. В процессе наблюдений были зафиксированы неравномерные осадки сооружения, которые представлены на рисунке 3. Фиксируемые скорости осаживающихся частей здания совпадали со скоростями, измеренными другими методами.

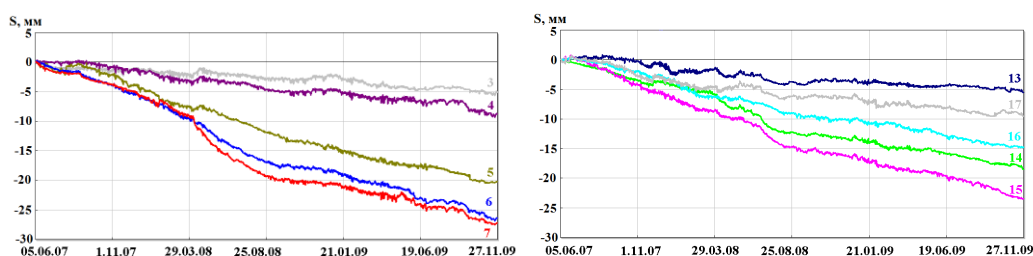


Рисунок 3. Эволюции осадок датчиков системы гидростатического нивелирования

Данные по неравномерным осадкам использовались для оценки изменения НДС всей конструкции здания с помощью программного комплекса ANSYS. Результат этого моделирования в виде тоновых изображений был также доступен на web-странице. Система мониторинга проработала 2.5 года, показав свою надежность и состоятельность. Однако в процессе монтажа и работы системы были замечены следующие недостатки:

- большие габариты измерительного модуля по высоте, вследствие особенностей датчика перемещения с выдвижным штоком и поплавком (см. рисунок 2а); это накладывало ограничения и создавало дополнительные проблемы при монтаже системы;
- дополнительная погрешность, связанная с движением штока в теле датчика;
- высокая цена системы мониторинга вследствие применения импортных датчиков перемещения и конструктива системы;
- проблемы с массовым тиражированием из-за уникальности использованного оборудования.

2. Система гидростатического нивелирования с использованием ip-камер

С учетом недостатков рассмотренной выше системы была разработана более простая, недорогая и ремонтпригодная система мониторинга неравномерных осадок сооружения. Эта система была установлена на сборно-монолитном сооружении. Для фиксации вертикальных смещений уровня жидкости в измерительном модуле были использованы ip-камеры [24]. Это существенно снижает цену системы мониторинга, поскольку в ее составе используются стандартные сетевые компоненты, а не специализированное оборудование. Использование ip-камер обеспечивает визуальный контроль за процессом измерений.

Датчик системы гидронивелирования представляет собой кронштейн, на котором закреплена миллиметровая шкала, прозрачную (стеклянную) трубку с жидкостью и ip-камеру (см. рисунок 2б). IP-камера позволяет получить цифровое изображение трубки с жидкостью и шкалы и передать это цифровое изображение по сети на сервер для последующей обработки. Положение столба жидкости определяется по изображению с разрешением в 1 пиксель. Погрешность измерительной части будет определяться разрешением и углом обзора камеры. Можно уменьшить погрешность за счет сужения угла обзора и измерения вблизи центра изображения. В работе [19] показано, что измерение уровня жидкости возможно с погрешностью 0.5 мм в диапазоне 50 мм.

Епин В.В., Цветков Р.В., Шардаков И.Н. Деформационный мониторинг фундаментов зданий методом гидростатического нивелирования

Позже данный вариант системы мониторинга был растражирован на ряд зданий, расположенных в зоне оседания земной поверхности, связанной с подземными выработками. Результаты работы системы мониторинга представлены на web-странице в виде таблиц, графиков и схем. На рисунке 4 приведены графики осадок с датчиков одного из зданий, испытывающих неравномерные осадки. Как видно из графиков, система гидростатического нивелирования обеспечивает длительные измерения осадок с миллиметровой точностью, оценивает скорость оседающих частей здания относительно других и на основе этих данных может прогнозировать дальнейший характер деформационных процессов.

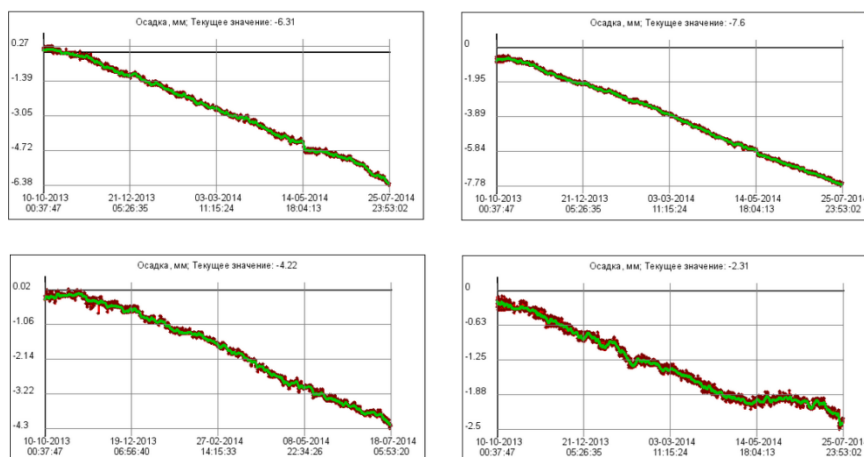


Рисунок 4. Показания датчиков системы гидростатического нивелирования

Заключение

Метод гидростатического нивелирования сохраняет свою актуальность среди всех доступных способов контроля за деформационным состоянием фундаментов. На его основе возможно создавать надежные, относительно недорогие автоматизированные системы мониторинга, которые смогут обеспечить приемлемую точность измерений, достаточную для большинства типовых сооружений. На примерах показан опыт построения и эксплуатации систем мониторинга на реальных сооружениях.

Исследование выполнено за счет гранта Российского Научного Фонда (проект № 14-29-00172).

Литература

1. Кухта А.В., Галушко А.М. Сравнительный анализ методов мониторинга состояния системы фундамент – основание // Вестник МГСУ. 2011. №8. С. 95–103.
2. Антоновская Г.Н., Шахова Е.В. Способ обследования конструктивной целостности инженерных сооружений // Успехи современного естествознания. 2005. №1. С. 21–22.
3. Нигметов Г.М., Ларионов В.И. Исследования прочностных характеристик конструкций вибродиагностическим анализом // Технологии гражданской безопасности. 2004. №2. С. 90–91.
4. Nickitopoulou A., Protopsalti R., Stiros S. Monitoring dynamic and quasi-static deformation of large flexible engineering structures with GPS: Accuracy, limitations and promises // Engineering Structures. 2006. Vol. 28. Pp.1471–1482.
5. Gordon G., Lichti D., Chandler I., Stewart M. P., Franke J. Precision measurement of structural deformation using terrestrial laser scanners // Proceedings of Optical 3D Measurement Techniques. Zurich, 2009. Pp. 322–329.
6. Monserrat O., Crosetto M. Deformation measurement using terrestrial laser scanning data and least squares 3-D surface matching // Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2008. Vol.63(1). Pp. 142–154.

Епин В.В., Цветков Р.В., Шардаков И.Н. Деформационный мониторинг фундаментов зданий методом гидростатического нивелирования

7. Брайт П.И., Медвецкий Е.Н. Измерение осадок и деформаций сооружений геодезическими методами. М.: Изд-во геодезической литературы, 1959. 199 с.
8. Pellissier P.F. Hydrostatic Leveling Systems // IEEE Transactions. 1965. Vol. 12. Issue 3. Pp. 19–20.
9. Yin Z.Z. Application of Hydrostatic Leveling System in Metro Monitoring for Construction Deep Excavation above Shield Tunnel // Applied Mechanics and Materials. 2013. Vol. 333-335. Pp. 1509–1513.
10. Jacob T., Chery J., Boudin F., Bayer R. Monitoring deformation from hydrologic processes in a karst aquifer using long-baseline tiltmeters // Water Resources Research. 2010. Vol. 46. Issue 9. 18 p.
11. Meier E., Geiger A., Ingensand H., Licht H., Limpach P., Steiger A., Zwysig R. Hydrostatic Levelling System: measuring at the system limits // Journal of Applied Geodesy. 2010. Vol. 4. Issue 2. Pp. 91–102.
12. Morishita T., Ikegami M. The slow-ground-motion monitoring based on the hydrostatic leveling system in J-PARC linac // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2009. Vol. 602. Issue 2. Pp. 364–371.
13. Parker D.H., Radcliff B., Shelton, J.W. Advances in hydrostatic leveling with the NPH6, and suggestions for further enhancements // Precision Engineering. 2005. Vol. 29. Issue 3. Pp. 367–374.
14. Криворучко В.Т. Разработка пространственной автоматизированной системы гидростатического нивелирования: Дисс..... канд. тех. наук. Киев, 1983. 160 с.
15. Манукин А.Б., Казанцева О.С., Бехтерев С.В., Матюнин В.П., Калинин И.И. Длиннобазисный гидростатический нивелир // Сейсмические приборы. 2013. Т.49. №4. С. 26–34.
16. Sengupta D., Kishore P. Continuous liquid level monitoring system using fiber Bragg grating // Optical Engineering. 2014. Vol. 53(1). 8 p. doi:10.1117/1.OE.53.1.017102.
17. Цветков Р.В., Шардаков И.Н. Моделирование деформационных процессов в системе «грунтово-основание-фундамент-здание» при наличии карстовых явлений // Вычислительная механика сплошных сред. 2010. №3(3). С. 102–116.
18. Мищенко К.П., Равдель А.А. Краткий справочник физико-химических величин Л.: Химия, 1974. 200 с.
19. Таймазов Д.Г. Трехжидкостный гидростатический нивелир // Труды Института геологии Дагестанского научного центра РАН. 2002. №48. С. 191–193.
20. Шелепов В.В. Измерение уровня и плотности жидкости посредством датчиков давления // Известия Челябинского научного центра. 2007. №4(38). С. 45–48.
21. Жуков Б.Н. Влияние температурных факторов на точность измерений превышений гидростатическими приборами и системами // Вестник Сибирской государственной геодезической академии. 1999. №4. С. 42–47.
22. Основания зданий и сооружений: СНиП 2.02.01-83. М.: ЦИТП, 1995. 64 с.
23. Цветков Р.В., Шардаков И.Н. Автоматизированная система измерения неравномерности осадок сооружения // Вестник ВолгГАСУ. Строительство и архитектура. 2008. №10(29). С. 128–134.
24. Цветков Р.В., Шардаков И.Н., Шестаков А.П. Система мониторинга неравномерности осадок сооружений с использованием ip-камер // Вестник ВолгГАСУ. Строительство и архитектура. 2013. №30(49). С. 95–100.

*Валерий Валерьевич Епин, г. Пермь, Россия
Тел. раб.: +7(342)2378330; эл. почта: yerinv@gmail.com*

*Роман Валерьевич Цветков, г. Пермь, Россия
Тел. раб.: +73422378330; эл. почта: flower@icmm.ru*

*Игорь Николаевич Шардаков, г. Пермь, Россия
Тел. раб.: +7(342)2378318; эл. почта: shardakov@icmm.ru*

© Епин В.В., Цветков Р.В., Шардаков И.Н., 2015

doi: 10.5862/MCE.55.3

Deformation monitoring of building foundations by hydrostatic leveling

V.V. Yepin*Institute of continuous media mechanics Russian Academy of Science Ural Branch, Perm, Russia
+7(342)2378330; e-mail: yepinv@gmail.com***R.V. Tsvetkov***Institute of continuous media mechanics Russian Academy of Science Ural Branch, Perm, Russia
+7(342)2378330; flower@icmm.ru***I.N. Shardakov***Institute of continuous media mechanics Russian Academy of Science Ural Branch, Perm, Russia
+7(342)2378318; e-mail: shardakov@icmm.ru*

Key words

deformation monitoring, foundation, differential settlement, hydrostatic leveling

Abstract

When arranging a deformation monitoring system for a building, it is important to control the deformation state of its foundations. Various methods to control the deformation state of a building foundation include the method of hydrostatic leveling, which has a number of advantages. The article shows that this method, though underused now, is best applied to monitor differential foundation settlements on a continuous basis.

This paper examines the factors affecting the accuracy of measurement by hydrostatic leveling and gives the recommendations for enhancing it. It was established that if measurements are made inside the building, it is possible to provide the level of measurement accuracy sufficient for most typical structures. The paper also gives examples of practical implementation of the self-engineered monitoring system based on the method of hydrostatic leveling, as well as their operating results.

References

1. Kukhta A. V., Galushko A. M. *Sravnitelnyy analiz metodov monitoringa sostoyaniya sistemy fundament-osnovaniye* [Comparative analysis of a condition monitoring methods of system foundation-basis]. *Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering*. 2011. No. 8. Pp. 95–103. (rus)
2. Antonovskaya G. N., Shakhova Ye. V. *Sposob obsledovaniya konstruktivnoy tselostnosti inzhenernykh sooruzheniy* [The inspection method of constructive integrity of engineering constructions]. *Advances in current natural sciences*. 2005. No. 1. Pp. 21–22. (rus)
3. Nigmatov G.M., Larionov V.I. *Issledovaniya prochnostnykh kharakteristik konstruksiy vibrodiagnosticheskimi analizom* [Researches of strength characteristics of constructions by vibrodiagnostic analysis]. *Tekhnologii grazhdanskoj bezopasnosti*. 2004. No. 2. Pp. 90–91. (rus)
4. Nickitopoulou A., Protopsalti R., Stiros S. Monitoring dynamic and quasi-static deformation of large flexible engineering structures with GPS: Accuracy, limitations and promises. *Engineering Structures*. 2006. Vol. 28. Pp. 1471–1482.
5. Gordon G., Lichti D., Chandler I., Stewart M. P., Franke J. Precision measurement of structural deformation using terrestrial laser scanners. *Proceedings of Optical 3D Measurement Techniques*. Zurich. 2009. Pp. 322–329.
6. Monserrat O., Crosetto M. Deformation measurement using terrestrial laser scanning data and least squares 3-D surface matching. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2008. Vol. 63(1). Pp. 142–154.
7. Brayt P. I., Medvetzkiy Ye. N. *Izmereniye osadok i deformatsiy sooruzheniy geodezicheskimi metodami metodami* [Settlement and Strain Measurement of building by geodetic methods]. Moscow: Izdatelstvo geodezicheskoy literatury, 1959. 199 p. (rus)
8. Pellissier P. F. Hydrostatic Leveling Systems. *IEEE Transactions*. 1965. Vol. 12. Issue 3. Pp. 19–20.
9. Yin Z.Z. Application of Hydrostatic Leveling System in Metro Monitoring for Construction Deep Excavation above Shield Tunnel. *Applied Mechanics and Materials*. 2013. Vol. 333-335. Pp. 1509-1513.

Yepin V.V., Tsvetkov R.V., Shardakov I.N. Deformation monitoring of building foundations by hydrostatic leveling

10. Jacob T., Chery J., Boudin F., Bayer R. Monitoring deformation from hydrologic processes in a karst aquifer using long-baseline tiltmeters. *Water Resources Research*. 2010. Vol. 46. Issue 9. 18 p.
11. Meier E., Geiger A., Ingensand H., Licht H., Limpach P., Steiger A. Zwyssig R. Hydrostatic Levelling System: measuring at the system limits. *Journal of Applied Geodesy*. 2010. Vol. 4. Issue 2. Pp. 91–102.
12. Morishita T., Ikegami M. The slow-ground-motion monitoring based on the hydrostatic leveling system in J-PARC linac. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2009. Vol. 602. Issue 2. Pp. 364–371.
13. Parker D.H., Radcliff B., Shelton, J.W. Advances in hydrostatic leveling with the NPH6, and suggestions for further enhancements. *Precision Engineering*. 2005. Vol. 29. Issue 3. Pp. 367–374.
14. Krivoruchko V. T. *Razrabotka prostranstvennoy avtomatizirovannoy sistemy gidrostacheskogo nivelirovaniya* [Development of automated hydrostatic level system]. PhD thesis. Kiev, 1983. 160 p. (rus)
15. Manukin A. B., Kazantseva O. S., Bekhterev S. V., Matyunin V. P., Kalinnikov I. I. Dlinnobazisnyy gidrostacheskii nivelir [Long-base hydrostatic level]. *Seismic instruments*. 2013. Vol. 49. No. 4. Pp. 26–34. (rus)
16. Sengupta D., Kishore P. Continuous liquid level monitoring system using fiber Bragg grating. *Optical Engineering*. 2014. Vol. 53(1). 8 p. doi:10.1117/1.OE.53.1.017102
17. Tsvetkov R.V., Shardakov I.N. Modelirovaniye deformatsionnykh protsessov v sisteme «gruntovoye-osnovaniye-fundament-zdaniye» pri nalichii karstovykh yavleniy [Modeling of deformation processes of a "soil-foundation-building" system in the presence of karst phenomena]. *Computational continuum mechanics*. 2010. No. 3 (3). Pp. 102–116. (rus)
18. Mishchenko K.P., Ravdel A.A. *Kratkiy spravochnik fiziko-khimicheskikh velichin* [Brief physical and chemical reference book]. Leningrad: Khimiya, 1974. 200 p. (rus)
19. Taymazov D. G. Trekhzhidkostnyy gidrostacheskii nivelir [Three-fluid hydrostatic level]. *Trudy Instituta geologii Dagestanskogo nauchnogo tsentra RAN* [Proceedings of the Institute of Geology Dagestan Scientific Center, Russian Academy of Sciences]. 2002. No. 48. Pp. 191–193. (rus)
20. Shelepov V. V. Izmereniye urovnya i plotnosti zhidkosti posredstvom datchikov davleniya [Measurement of liquid level and density by pressure sensors]. *Izvestiya Chelyabinskogo nauchnogo tsentra*. 2007. No. 4 (38). Pp. 45–48. (rus)
21. Zhukov B. N. Vliyaniye temperaturnykh faktorov na tochnost izmereniy prevysheniy gidrostacheskimi priborami i sistemami [Influence of temperature factors on the accuracy of measurement of hydrostatic devices and systems]. *Vestnik Sibirskoy gosudarstvennoy geodezicheskoy akademii*. 1999. No. 4. Pp. 42–47. (rus)
22. *Osnovaniya zdaniy i sooruzheniy: SNiP 2.02.01-83* [Foundation of buildings and structures: Building code 2.02.01-83]. M.: TsITP, 1995. 64 p. (rus)
23. Tsvetkov R.V., Shardakov I.N. Avtomatizirovannaya sistema izmereniya neravnomernosti osadok sooruzheniya [Automated system for measuring the unevenness of constructions' settlement]. *Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture*. 2008. No. 10(29). Pp. 128–134. (rus)
24. Tsvetkov R.V., Shardakov I.N., Shestakov A.P. Sistema monitoringa neravnomernosti osadok sooruzheniy s ispolzovaniyem ip-kamer [Monitoring system of differential settlement of constructions using ip-cameras]. *Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture*. 2013. No. 30(49). Pp. 95–100. (rus)

Full text of this article in Russian: pp. 21–28