

Е.М.ВОЛОХОВ, канд. техн. наук, доцент, volohov@spmi.ru

С.Ю.НОВОЖЕНИН, аспирант, snovx@mail.ru

НГУЕН СУАН БАК, аспирант, kmd@spmi.ru

Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург

E.M.VOLOHOV, PhD in eng. sc., associate professor, volohov@spmi.ru

S.U.NOVOGENIN, post-graduate student, snovx@mail.ru

NGUEN SUAN BAK, post-graduate student, kmd@spmi.ru

National Mineral Resources University (Mining University), Saint Petersburg

СОВРЕМЕННЫЕ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ СДВИЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Приведены сведения о современных системах мониторинга, предназначенных для контроля состояния массива горных пород, зданий и сооружений, попадающих в зону влияния горных работ. Изложены принципы и особенности работы некоторых типов датчиков и систем.

Показана актуальность проведения в России специальных научных и прикладных исследований для обеспечения внедрения систем контроля при реализации мероприятий по защите зданий и сооружений.

Ключевые слова: мониторинг сдвижений, мониторинг деформаций горных пород, автоматизированные системы измерения деформаций, скажинные системы, экстензометры, инклинометры, наклонометры.

MODERN MONITORING SYSTEMS OF DISPLACEMENTS AND DEFORMATIONS AT BUILDING OF UNDERGROUND CONSTRUCTIONS

In article the information on the modern systems of monitoring intended for control of a deformation condition of rocks and buildings, being in a zone of influence of mountain works is stated. Principles and features of work of some types of gages and systems are stated.

Problems with introduction of such systems in Russia are specified. The urgency of carrying out special scientific and applied researches for maintenance of introduction of such systems at realization of actions for protection of buildings and constructions is shown.

Key words: monitoring of displacement, monitoring of deformations of the rocks, the automated systems of measurement of deformations, systems in chinks, extensometers, inclinometers, measuring instrument of inclinations.

Интенсификация освоения подземного пространства в крупных мегаполисах, особенно там, где необходимо сохранять архитектурный облик исторически ценной застройки, неизбежна. Любые горные работы, будь то строительство подземных паркингов и торговых центров открытым способом или сооружение объектов метрополитена под-

земным (горным) способом, неминуемо будут оказывать вредное влияние на существующие здания, сооружения и природные объекты. Поэтому вопросы обеспечения охраны зданий, сооружений и природных объектов при осуществлении подземного строительства в городских условиях становятся все более актуальными.

Ключевым элементом обеспечения сохранности объектов, подвергаемых опасности при освоении подземного пространства, является геотехнический мониторинг. Основная задача такого мониторинга – осуществление натурных наблюдений за существующими объектами инфраструктуры и природными объектами для своевременного принятия мер по их защите от вредного влияния горных работ, благо современный уровень развития геотехнологий позволяет обеспечить активное воздействие на породный массив или основание здания (сооружения) и компенсировать, частично или полностью, вредное воздействие деформаций.

К сожалению, в отечественной практике подземного строительства понятие геотехнический мониторинг зачастую сводится к формальному осуществлению натурных наблюдений (регламентированных как обязательная составляющая производственного процесса), с плохо обоснованными сроками и периодичностью наблюдений, а также допустимых и предельных значений контролируемых показателей*. Такой мониторинг позволяет только констатировать значения измеряемых показателей на момент разрушения объекта. Обеспечить мероприятия по предотвращению развития опасных явлений в породном массиве, в основаниях зданий (сооружений) и в их несущих элементах он практически не способен.

С развитием техники, электроники и информационных технологий в конце XX в. появились системы, основанные на приме-

нении высокочувствительных датчиков (напряжений, смещений, деформаций, порового давления и др.), объединяемых в единые комплексы, управляемые автоматизированными системами. Они способны обеспечивать весь спектр измерений с периодичностью до нескольких раз в секунду (практически в режиме реального времени), сигнализировать о достижении измеряемыми параметрами предельных значений по компьютерным сетям в виде SMS-сообщений. Специально разработанные для экстремальных условий датчики и системы связи характеризуются высокой надежностью.

В данной статье приведен обзор современных средств измерений, производимых за рубежом и не имеющих отечественных аналогов. Внедрение таких систем может существенно повысить качество геотехнического мониторинга, особенно при реализации комплексного подхода, когда под наблюдением находятся и сооружения на поверхности, и массив горных пород, и конструкции подземных сооружений.

Широчайший спектр применяемых в таких системах датчиков, типов считывающих устройств и принципов организации наблюдений не позволяет ограничиться даже простым перечислением этих систем, поэтому попробуем классифицировать эти системы и перечислить наиболее актуальные из них.

По контролируемым параметрам можно выделить: системы измерения абсолютных смещений (сдвижений), датчики – относительных смещений, деформаций, наклонов, напряжений, уровня грунтовых вод, гидростатического давления (пьезометры), температуры.

По типу считывающих и измерительных устройств выделяют: лазерные дальномеры, тахеометрические системы, лазерно-сканирующие системы, струнные датчики, потенциометрические датчики, опτικο-волоконные датчики, механические микрометры.

По принципам организации наблюдений можно условно выделить три группы: системы дистанционного измерения (лазерные дальномеры, тахеометрические и лазерно-сканирующие системы, геофизические

* Пособие по проектированию мероприятий для защиты эксплуатируемых зданий и сооружений от влияния горнопроходческих работ при строительстве метрополитена в Ленинграде / ВНИИГалургии. Л., 1973. 30 с.

Manual for design measures for protection of buildings and structures exploited by the influence of mining operations in the construction of the underground in Leningrad / VNIIGalurgia. Leningrad, 1973. 30 p.

Инструкция по наблюдениям за сдвигами земной поверхности и расположенными на ней объектами при строительстве в Москве подземных сооружений (РД 07-166-97) / Госгортехнадзор, НТЦ «Промышленная безопасность». М., 1997. 12 с.

Instruction on surveillance over surface displacements and facilities placed over it underground construction in Moscow (RD 07-166-97) / Gosgortekhnadzor of Russia; STS «Industrial safety». Moscow, 1997. 12 p.



Рис.1. Скважинный стержневой экстензометр BOR-EX, одноточечный («Smartec SA», Швейцария)

системы), системы на основе стационарно установленных датчиков (экстензометров, наклономеров, пьезометров и др.) и системы с перемещаемыми датчиками (зонд инклинометр, зонд индикатор уровня воды и др.).

По варианту размещения элементов выделяют: скважинные системы контроля породного массива (на основе датчиков в горизонтальных и вертикальных скважинах), системы дистанционного измерения и контроля элементов конструкций и земной поверхности (на основе измерения смещений геодезическими методами), системы на закладных датчиках в грунте и конструкциях (с измерением напряжений и деформаций, температуры, влажности и др.) и системы контактного контроля строительных конструкций (на основе датчиков напряжений и деформаций, датчиков раскрытия трещин или стыков, датчиков наклона конструктивных элементов).

Многолетний опыт обеспечения защиты зданий, сооружений и природных объектов от вредного влияния горных работ показывает, что наибольшей информативностью обладают деформационные критерии. С точки зрения разработки мероприятий по охране зданий, сооружений при осуществлении подземного строительства наиболее целесообразно применение систем, обеспечивающих контроль сдвижений и деформаций массива пород, а также напряжений и деформаций в конструктивных элементах зданий, сооружений. Поэтому далее приведем примеры датчиков и систем на их основе, обеспечивающих такой контроль.

Среди экстензометров для осуществления скважинного мониторинга можно выделить: скважинный стержневой, стационарные, съемный, магнитный, фиксированный.

Скважинный стержневой экстензометр (рис.1) позволяет производить точные изме-

рения продольных перемещений в грунте (горной породе). Устройство применяется в наблюдениях при анализе состояния фундаментов, насыпей, котлованов, природных склонов, тоннелей. Измерительная система включает: якоря, стержни-удлинители и измерительный оголовок, позволяющий производить ручные или автоматические измерения. Защитные трубы предотвращают контакт стержней с цементом или породами. Процесс установки представляет собой сборку всех необходимых компонентов и погружение экстензометра в предварительно пробуренную скважину. В большинстве случаев собранный экстензометр цементируется в скважине. При значительных глубинах скважин необходимо использовать центраторы для обеспечения точной установки стержней в скважине. Каждая измерительная скважина может содержать от 1 до 6 якорей. Якоря могут быть следующих типов: погружной арматурный якорь – конструктивно наиболее простой, гидравлический якорь с расширяющимися зубцами для крепления в массиве, якорное кольцо с пружинами, используемое в восходящих скважинах (рис.2). Стержни-удлинители могут быть выполнены из стекловолокна или не-

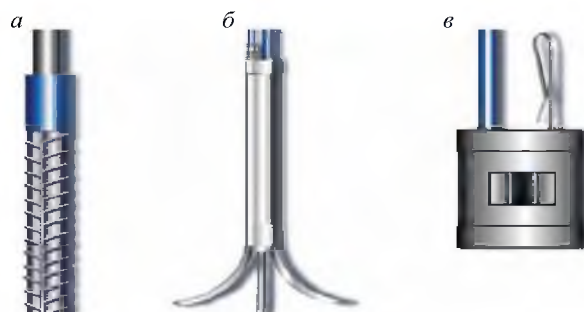


Рис.2. Виды якорей скважинного стержневого экстензометра BOR-EX: *а* – погружной арматурный якорь; *б* – гидравлический якорь; *в* – якорное кольцо с пружинами



Рис.3. Извлекаемый скважинный экстензометр BOF-EX

ржавеющей стали с защитными трубками. Стекловолоконные стержни обрезают до необходимой длины на месте, они просты в установке. Стержни из нержавеющей стали собирают из секций, длина каждой из которых может достигать 3 м.

Диапазон измерений системы от 50 до 150 мм, точность – 0,2 или 0,5 % FS (доли от полной шкалы) в зависимости от типа считывающего устройства. Достоинствами устройств данного типа являются: простота в установке и эксплуатации, точность, возможность регулировки глубины измерений на месте перед началом производства работ.

Извлекаемый скважинный экстензометр (рис.3) характеризуется прочностью и точностью исполнения. Применением патрубка с наружным диаметром 32 мм в данном приборе исключена возможность изгиба и трение между стержнями. Кроме того, снижен термический эффект, так как каждый измерительный модуль размещен внутри скважины рядом с якорем. Диапазон измерений, погрешность и разрешение зависят от типа датчика и могут составлять соответственно от 5 до 100 мм; 0,1 % FS и 0,01 % FS.

Съемный экстензометр используется для относительных измерений вдоль оси обсадной трубы инклинометра, оборудованной метками. Зонд T-REX оснащен бесконтактным магниторезистивным линейным датчиком. В состав измерительной системы дополнительно входят: рабочий кабель, монтажные стержни, портативный считыватель и программное обеспечение управления данными REX-1. Применение портативного считывателя позволяет проводить следящие замеры с зондами TREX. Через порт USB данные измерений могут быть переданы на компьютер для обработки. Программное обеспечение анализа T-REX позволяет рассчитывать графики смещения через каж-

дый метр, как при горизонтальной, так и при вертикальной установке.

Преимущества устройств данного типа заключаются в отсутствии механического контакта между зондом и целью (меткой), возможности определения 3D-профиля деформаций скважины (совместно с измерениями инклинометра). Измерительный диапазон составляет ± 100 мм, точность зонда $\pm 0,02$ мм, разрешение 0,01 мм.

Магнитный экстензометр – система, состоящая из трубы доступа с внешней гофрированной трубой, магнитных колец, а также нижней телескопической секции и головки подвеса (рис.4). Магнитные кольца (мишени) закреплены с наружной стороны трубы доступа и помещены в грунт, где возможны перемещения. Магнитные кольца двигаются вместе с окружающим грунтом вдоль оси трубы доступа. Снятия показаний производят портативным считывателем при опускании считывающего коммутируемого зонда в трубу доступа. Сравнение промеров, проведенных в разное время, дает профили осадки или подъема грунта. Точность системы определяется точностью считывания и составляет ± 1 мм.

Фиксированный экстензометр – это устройство, помещенное в заполнитель плотины или внутрь скважины для мониторинга осадки или подъема между двумя точками, без использования съемного зонда (рис.5). При использовании цепочки осадочных стержней возможно создание осадочного базиса или контрольного экстензометра. Контрольный экстензометр представляет собой одноточечный экстензометр, обычно используемый для прецизионного мониторинга осадки или подъема грунта. Он состоит из нижнего анкера, к которому приложена цепь измерительных стержней, способных перемещаться вверх-вниз. Вокруг него



Рис.4. Магнитный экстензометр
(«RST instruments Ltd», Канада)



Рис.5. Фиксированный экстензометр
(«Sisgeo», Италия)



Рис.6. Инклинометрический зонд
(«Sisgeo», Италия)



Рис.7. Стационарный экстензометр DEX
(«Sisgeo», Италия)

помещается антифрикционный гофрированный рукав. Оптическое нивелирование верхней точки оголовка подъемного стержня обеспечивает мониторинг оседаний. Для автоматического дистанционного считывания даже на объектах вне зоны обслуживания могут применяться электрические преобразователи. Отрезок вертикального стержня имеет длину 2 м. Диапазон измерений электрического преобразователя контрольного экстензометра составляет 0,25; 0,5 или 1 м, точность 0,25 % FS.

Приведем примеры датчиков и устройств для мониторинга состояния зданий и сооружений.

Отвесы (прямой и инверсный) используются для точного измерения относительного внутреннего горизонтального смещения точек от вертикальной линии. Измерения могут производиться удаленно и в автоматическом режиме.

Закладной инклинометр применяется для измерения боковых смещений грунта,

скальных пород и конструкций с целью определения устойчивости откосов, характеристик дамб и насыпей, деформаций шпунтовой сваи и стены в грунте. Малые размеры прибора позволяют производить измерения в труднодоступных местах. Устройство имеет следующие характеристики: диапазон углов $\pm 30^\circ$, разрешение $0,01^\circ$, повторяемость $0,02^\circ$, линейность 4 % FS.

Инклинометрический зонд используется для определения боковых перемещений и деформаций грунтов, скальных пород и подпорных конструкций (рис.6). Возможно применение для определения устойчивости природных и искусственных откосов, дамб и насыпей, деформаций шпунтовой сваи и стены в грунте. Диапазон измеряемых значений угла составляет от 0 до 30° от вертикали, разрешение $0,01 \times 500$ мм или $2 \cdot 10^{-5}$ рад.

Стационарные экстензометры (рис.7) используются в сочетании с инклинометрическими обсадными трубами из ABS-пластика с самоцентрирующимися соедините-

лями для автоматического мониторинга вертикальных движений (осадки или поднятия). Стационарная система инклинометров устанавливается в обсадную трубу. Цепочки экстензометров соединены между собой проволокой или балками из нержавеющей стали. Датчики могут быть расположены на различных глубинах, где происходит осадка, с базовой точкой на устье или на забое скважины. Существуют модификации, оборудованные двухосным датчиком наклона. Такие системы могут быть использованы для 3D-мониторинга профиля скважины. Регистратор данных обеспечивает проведение автоматического мониторинга, а с помощью GSM-модуля и автоматический мониторинг удаленных точек измерений.

Например, точность системы DEX-35 («Sisgeo», Италия) составляет 0,25 % FS, диапазон измерений 100; 500 или 1000 мм, разрешение датчика 0,01 мм. Датчик наклона в системе DEX-35S имеет следующие характеристики: диапазон измерения 10 или 20°, разрешение датчика 0,05 % FS, температурный фактор чувствительности $\pm 0,03$ % FS/°C.

С помощью удаленной измерительной системы *отвесов* проводится мониторинг относительных горизонтальных и вертикальных перемещений элемента конструкции относительно прямого или инверсного отвеса. Измерения перемещений струны отвеса вдоль осей X , Y , Z осуществляются оптическим способом. Данная система обеспечивает точность порядка 0,05 мм, диапазон измерений $50 \times 50 \times 25$ мм.

Одноосевой наклономер находит широкое применение при решении различных задач мониторинга, в частности, подходит для наблюдения за смещениями стен и фундамента. Разрешение устройства может составлять от 0,0001 до 0,01°, повторяемость – от 0,0002 до 0,02°.

Оптоволоконный датчик линейных перемещений FOD используется для контроля относительных перемещений смежных поверхностей поперек трещин или стыков конструкций в бетоне и камне. Устройство работает на основе принципа интерферометрии белого света Фабри – Перо, выпускается в двух исполнениях: из нержавеющей

стали и алюминия. Прибор обеспечивает высокое разрешение измерений. Искробезопасен, устойчив к воздействию электромагнитных полей, радиопомех и молний. Диапазон измерений 20 мм (пружинный шток), погрешность $\pm 0,1$ % FS, разрешение $\pm 0,002$ мм.

Струнные датчики JM применяют для измерения стыков и трещин в бетонных и каменных конструкциях. Также используется для контроля отделения торкрет-бетона от плоскости забоя на стенах туннеля. Диапазон – от 25 до 300 мм, погрешность $\pm 0,25$ % FS ($\pm 0,1$ % опционально), разрешение 0,02 % полной шкалы. *Портативные датчики PF* – устройства для измерения относительных перемещений трещин и стыков. Прибор используется при мониторинге хрупких конструкций: каменная кладка, древесина. Предусмотрены фиксированные и съемные реперы. Диапазон 50 мм, расстояние между реперами 200-350 мм.

Необходимо отметить, что в нашей стране внедрение таких систем пока еще не получило широкого распространения. Стоимость систем, особенно при реализации автоматизированного мониторинга в реальном времени, считается непомерно высокой (стоимость установки одного датчика достигает 200 тыс. рублей). Многочисленные фирмы, предлагающие свои услуги по установке и наладке этих систем, часто не способны обеспечить должный уровень научного сопровождения (предусматривающего оценку степени опасности для обследуемого объекта и определение допустимых и предельных значений измеряемых в ходе мониторинга величин), ограничиваясь лишь поставкой, установкой датчиков и устройств, причем в основном зарубежных производителей. Уровень нормативной и методической проработки вопросов применения таких систем в России, особенно при контроле сдвижений и деформаций сооружений и породных массивов, следует признать неудовлетворительным.

Для ликвидации указанных проблем, существенно сдерживающих внедрение современных систем геотехнического мониторинга (СГМ), необходимо:

- снижать стоимость таких систем за счет обеспечения конкурентной среды и развития отечественного производства датчиков, аппаратуры и программного обеспечения;

- привлекать к проектированию наблюдательных станций (на базе таких систем) высококвалифицированных специалистов научных и проектных организаций, имеющих опыт в области охраны зданий и сооружений; повышать уровень квалификации сотрудников этих организаций по направлению современных СГМ;

- организовать научные исследования в области анализа и контроля горно-геологических объектов, зданий и сооружений при ведении горных работ в мегаполисах;

- обеспечить разработку нормативных и методических документов, регламентирующих контроль объектов на базе применения современных СГМ;

- при подготовке специалистов горных и строительных специальностей в вузах включить в учебные программы спецкурсов разделы, посвященные методологии и практике использования современных СГМ.