

Бурсов Николай Генрихович, заведующий научно-исследовательской лабораторией,
РУП «Институт БелНИИС», г. Минск (Беларусь)

Обухов Алексей Евгеньевич, научный сотрудник,
РУП «Институт БелНИИС», г. Минск (Беларусь)

Димитриади Николай Павлович, инженер-конструктор 2 категории,
РУП «Институт БелНИИС», г. Минск (Беларусь)

МОНИТОРИНГ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ НА СТАДИИ ВОЗВЕДЕНИЯ

STRESS-STRAIN STATE OF BUILDINGS AND STRUCTURES MONITORING AT THE ERECTION STAGE

АННОТАЦИЯ

В статье освещены особенности мониторинга напряженно-деформированного состояния конструкций высотных зданий и большепролетных сооружений.

ABSTRACT

The article shows monitoring peculiarities of stress-strain state of high-rise buildings and large-span structures.

ВВЕДЕНИЕ

Опыт строительства в современном крупном городе свидетельствует о том, что с учетом стоимости земельного участка наиболее оправданными с экономической точки зрения являются здания высотой от 30 до 50 этажей. Сооружения большей высоты целесообразны с точки зрения архитектурно-градостроительной значимости, престижности или сверхдороговизны и нехватки свободных городских территорий. С увеличением числа строящихся высотных зданий появилось понимание того, что потенциал монолитного бетона, позволяющего возводить яркие и выразительные сооружения, используется не в полной мере. Очевидно, что расширению области его применения в высотном строительстве будут способствовать освоение новых технологий, создание и внедрение современных опалубочных систем, систем комплексной механизации технологических процессов при круглогодичном производстве работ. При возведении высотных зданий следует учитывать многообразные современные тенденции в строительстве, а именно – увеличение этаж-

ности зданий, уплотнение городской застройки, стесненность строительных площадок, необходимость освоения подземного пространства. Все вышеперечисленное приводит к возникновению и последующему увеличению негативного техногенного воздействия нового строительства на существующие объекты. В этой связи особое значение приобретает проблема контроля технического состояния несущих конструкций как строящихся сооружений, так и зданий окружающей застройки, с целью предупреждения возникновения аварийных ситуаций и обоснования выбора комплекса инженерных мероприятий по их недопущению. При этом очевидно, что контроль технического состояния несущих конструкций должен носить систематический характер и позволять осуществлять оценку происходящих изменений на основе количественных критериев, то есть базироваться на процедурах выявления соответствия фактической прочности, жесткости и устойчивости и пр. конструктивных элементов нормативным требованиям.

Значительную часть новых объектов составляют технически сложные, уникальные объекты с высокой степенью ответственности: высотные здания и сооружения с большепролетными конструкциями, а также объекты с массовым пребыванием людей. Поэтому контроль технического состояния несущих конструкций, а также грамотный анализ полученных данных и принятие корректирующих мероприятий для подобных сооружений важны как на стадии строительства, так и на стадии эксплуатации, особенно в течение всего периода возможного проявления деформационного воздействия.

Актуальность данной темы определяется необходимостью создания технологии и обоснованной методики объективной оценки технического состояния несущих конструкций, испытывающих внешние деформационные воздействия, которая позволила бы с высокой степенью достоверности прогнозировать и предупреждать появление и развитие аварийных ситуаций. При этом следует отметить, что на сегодняшний день нормативной методики, позволяющей эффективно предотвращать возникновение аварийных ситуаций, не существует.

Предпосылки для проведения мониторинга напряженно-деформированного состояния (НДС) несущих конструкций высотных зданий

Деформационные воздействия на конструкции высотных зданий, обусловленные изменением свойств материалов и основания, носят длительный характер. Сегодня наиболее эффективным способом

прогнозирования и предупреждения аварийных ситуаций является мониторинг их технического состояния, проводящийся в постоянном режиме, на стадиях возведения и эксплуатации зданий и сооружений. Подобная процедура, позволяющая оценить техническое состояние конструкций для сооружений широкого круга и различного назначения, стала необходимостью сравнительно недавно – с введением в действие в Республике Беларусь ряда нормативных документов [1], [2]. В то же время нормативная база, регламентирующая методы проведения мониторинга строительных объектов, а также способы трактовки полученных результатов, проработана недостаточно. Поэтому становится очевидной актуальность разработки эффективной методики оценки технического состояния несущих конструкций зданий и сооружений на основе данных мониторинга их напряженно-деформированного состояния. При этом следует учитывать то, что текущее техническое состояние конструкций объекта в значительной степени определяется неизменностью и стабильностью его геометрических параметров (пространственное положение, пролеты, прогибы, перемещения и пр.).

Контроль деформаций объекта или его конструкций в традиционном понимании осуществляется, в основном, фиксацией изменения значений вертикальных осадок по контуру самого объекта в уровне основания с помощью геометрического нивелирования. Очевидно, что подобный вид контроля не в полной степени отражает реальную картину пространственной деформации всего объекта и изменения напряженно-деформированного состояния его конструкций. При этом ошибки могут быть особенно велики при значительных размерах и большой этажности сооружений, когда невозможен доступ к необходимому количеству точек для геометрического нивелирования в нужном объеме. Кроме того, следует учитывать и то, что при сложном пространственном очертании объекта неравномерные деформации основания, сопровождаются повреждениями элементов несущих конструкций по всему объему. В подобных случаях традиционными инструментальными методами полностью выявить характер деформирования основания практически невозможно, так же как и численно оценить его влияние на напряженно-деформированное состояние несущих конструкций. И именно в подобных ситуациях непосредственный контроль пространственных деформаций сооружения в ходе мониторинга позволит оценить изменение напряженно-деформированного состояния конструктивных элементов сооружения. Основными параметрами, которые должны контролироваться в ходе мониторинга, являются пространственные деформации сооружения – взаимные перемещения определенного

количества характерных точек, расположенных в нескольких уровнях по высоте и периметру объекта, в результате деформационного воздействия со стороны внешних факторов. Наиболее эффективным способом решения данной проблемы является пространственно-координатный мониторинг положения характерных точек объекта с помощью различных автоматических средств, обеспечивающих необходимую точность и скорость измерений, а также позволяющих, кроме нормативной оценки технического состояния объекта и его конструкций, проводить численный анализ их напряженно-деформированного состояния с учетом исходных данных. Одной из основных функций вышеупомянутых систем мониторинга является ее способность к предварительному выявлению (ранней диагностике) изменений напряженно-деформированного состояния конструкций и локализации мест такого изменения с использованием других методов, не связанных с прямым доступом к несущим конструкциям и не требующих существенных финансовых и трудовых затрат для реализации. Поэтому именно автоматизированная система, смонтированная и введенная в действие на стадии возведения сооружения, позволяет выполнять большой объем работ, обеспечивающих конструктивную безопасность здания, при минимальном использовании труда человека. Конструктивная безопасность зданий или сооружений понимается как способность конструкций объекта противостоять его переходу в аварийное состояние, и определяется:

- проектным решением и степени их реального воплощения при возведении объекта;
- текущим остаточным ресурсом и техническим состоянием объекта во время эксплуатации;
- степенью изменения объекта (перестройка, перепланировка, пристройка, реконструкция, капитальный ремонт и пр.);
- специфическими условиями эксплуатации объекта, связанными с высокой механической нагруженностью (статической, усталостной, вибрационной) от различного технологического оборудования;
- изменениями условий окружающей среды.

Мониторинг напряженно-деформированного состояния (НДС) несущих конструкций высотных зданий

Контроль напряженно-деформированного состояния сооружений с использованием автоматизированных систем не является новым на-

правлением в строительной области. Первые подобные системы были созданы для наблюдения за конструкциями при землетрясениях и устанавливались на крупные большепролетные сооружения, например, дамбы, мосты и пр. Полученные данные использовались при проектировании зданий и сооружений в зонах с высокой сейсмической активностью. Здесь следует отметить и то, что для определения прогибов конструкций применяют, как правило, оптоволоконные датчики деформации. Системы, построенные с использованием подобных датчиков, сложны с технической точки зрения и весьма дороги. Например, стоимость акселерометра с преобразователем варьируется в пределах от 100 до 500 евро, а стоимость всей системы сбора информации для каждого датчика варьируется от 1000 до 2000 Евро [3].

Сегодня современная система мониторинга направлена на обеспечение надежности не только возводимого объекта, но и объектов окружающей застройки и обеспечение сохранности окружающей среды, в том числе:

- долговременное, достоверное и полное измерение значений контролируемых параметров с учетом изменения параметров окружающей среды;
- стабильность системы и характеристик средств измерения во времени, а также в случае изменения параметров окружающей среды. Средства измерения, входящие в состав системы, должны быть поверены или откалиброваны в установленном порядке;
- слежение за изменением значений контролируемых параметров в реальном времени, а также за изменением параметров окружающей среды с заданной погрешностью;
- определение отклонения значений контролируемых параметров от контрольных значений, приводящего к образованию на ранней стадии разрушений, недопустимых деформаций, снижению безопасности людей, контролируемого здания и окружающей застройки;
- формирование и передача формализованной оперативной информации о состоянии особо ответственных конструкций, узлов и соединений, подлежащих мониторингу, в диспетчерскую службу (на регистрирующее устройство);
- автоматический запуск системы оповещения о возникновении чрезвычайной ситуации и необходимости проведения действий по эвакуации, с одновременным оповещением со-

ответствующих специалистов, отвечающих за безопасность контролируемого здания и окружающей застройки;

- автоматическое документирование и регистрация чрезвычайной ситуации;
- способность системы к самодиагностике основных ее элементов.

Методы контроля, технические и технологические средства мониторинга напряженно-деформированного состояния конструкций следует принимать в зависимости от следующих факторов:

- класса сложности объекта по [4];
- геотехнической категории объекта по [5];
- конструктивных особенностей и технического состояния объектов окружающей застройки;
- инженерно-геологических и гидрогеологических условий площадки;
- технологических особенностей и способа возведения нового здания;
- плотности окружающей застройки;
- требований и условий эксплуатации и пр.

Мониторинг напряженно-деформированного состояния объекта ведут в соответствии с программой, разработанной организацией, выполняющей мониторинг до начала строительно-монтажных работ. При этом в программе мониторинга следует привести:

- перечень особо ответственных конструкций, узлов и соединений, подлежащих мониторингу;
- контролируемые параметры и их расчетные (контрольные) значения, определяемые на основании ТНПА, проектных решений и результатов моделирования;
- состав работ и правила выбора автоматизированной системы мониторинга, методов и объемов контрольных операций;
- состав и описание оборудования, а также требования к программному обеспечению.

Особо ответственными конструкциями, узлами и соединениями, подлежащими мониторингу, являются:

- конструкции, узлы и соединения, выполняющие основную несущую функцию, разрушение либо недопустимые деформации которых могут привести к прогрессирующему обрушению или (и) к снижению безопасности людей, здания и окружающей застройки;

- несущие опорные конструкции, воспринимающие вертикальные и горизонтальные нагрузки и усилия, а также обеспечивающие изгибную, пространственную жесткость и устойчивость здания;
- ограждающие конструкции (фасады).

К основным измерительным элементам автоматической системы мониторинга, измеряющим воздействие различного характера на контролируемые конструкции, следует относить:

- датчики, устанавливаемые в грунтах основания. Расчетная схема установки датчиков определяется в результате анализа проектной документации, а также данных, полученных в результате натурных испытаний. Схема расстановки датчиков должна обеспечивать возможность контроля участков с различными значениями нагрузок и осадок, а также обеспечивать необходимым объемом данных для разработки эффективных конструктивных решений фундаментов и оснований или их корректировки;
- датчики, устанавливаемые в конструктивных элементах здания. Одномерные датчики монтируют в ключевых точках, определяемых перечнем особо ответственных конструкций, узлов и соединений, в ортогональной системе координат, что позволяет трансформировать полученные результаты наблюдений (измерений) в поля деформаций [6];
- датчики системы сейсмометрического мониторинга.

Кроме того, при проектировании системы мониторинга необходимо сформулировать адекватные требования к методам наблюдений, обработки данных, анализа ситуаций и прогнозирования, информационной системе, модели развития ситуаций и пр.

Наиболее оптимальной с экономической точки зрения является система, устанавливаемая на стадии возведения и позволяющая уже в процессе строительства фиксировать и локализовать изменение напряженно-деформированного состояния несущих конструкций. Подобное комплексное решение экономически оправдано и обеспечивает требуемую достоверность получаемой информации, а также позволяет формировать на ее основе базы данных на весь период возведения и эксплуатации объекта. Автоматическая система мониторинга напряженно-деформированного состояния, построенная на вышеизложенных принципах, использовалась, начиная с периода строительства и по настоящее время, на 30-этажном административно-торговом центре в Минске по пр. Победителей, 7. Предприятие-производитель системы

мониторинга фирма «Tieto-Oskari OY» (Финляндия). Объектом мониторинга является высотное здание, относящееся к зданиям первого класса сложности (K1) по [4] (рисунок 1).

Участок для строительства объекта мониторинга расположен в смешанной застройке центральной части Минска, вдоль пр. Победителей, с развитой транспортной сетью в непосредственной близости от станций метрополитена («Фрунзенская»), на месте бывшего кафе «Реченька» возле магазина «Ромашка».



Рисунок 1. Административно-торговый центр по пр. Победителей, 7 г. Минск

Объект мониторинга по функциональному назначению делится на зоны торговых, офисных помещений, а также зону общественного питания (ресторан):

- с 2 по 3 этажи – помещения торгового назначения;
- с 4 по 13, с 15 по 27, на 29 и 30 – офисные помещения;
- 28 этаж – ресторан на 50 посадочных мест с баром.

Для реализации функций автоматической системы мониторинга напряженно-деформированного состояния на данном объекте были использованы следующие элементы:

- датчики первичного сбора и обработки информации, предназначенные для передачи информации о напряженно-деформированном состоянии несущих конструкций (в том числе геометрические отклонения конструктивных элементов, деформации и осадки здания) и значения температуры в месте установки в режиме реального времени. Датчики были размещены в характерных точках, определяемых с учетом перечня особо ответственных конструкций, узлов и соединений на следующих уровнях (рисунки 2 и 3):
 - сенсоры I уровня на отм. -3.000;
 - сенсоры II уровня на отм. 16.500;
 - сенсоры III уровня на отм. 49.500.
 - сенсоры IV уровня на отм. 82.500;
 - сенсоры V уровня на отм. 110.400.
- центральный блок системы мониторинга, обеспечивающий:
 - сбор, обработку и хранение данных, поступающих от сенсоров;
 - контроль работоспособности датчиков и других компонентов системы мониторинга;
 - ввод и корректировку нормативных значений контролируемых параметров и допустимых отклонений для каждого из датчиков и групп датчиков системы мониторинга;
 - формирование и передачу сигналов оповещения о возникновении чрезвычайной ситуации с использованием каналов мобильной связи, сети Интернет, локальной сети и пр.

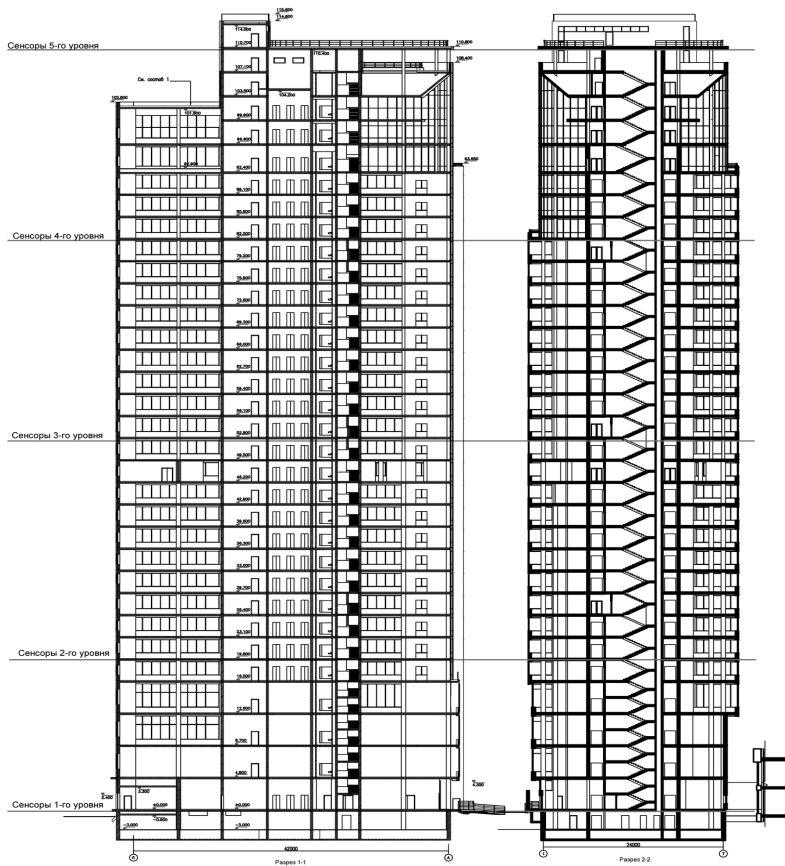


Рисунок 2. Схема размещения датчиков первичного сбора и обработки информации по высоте объекта мониторинга

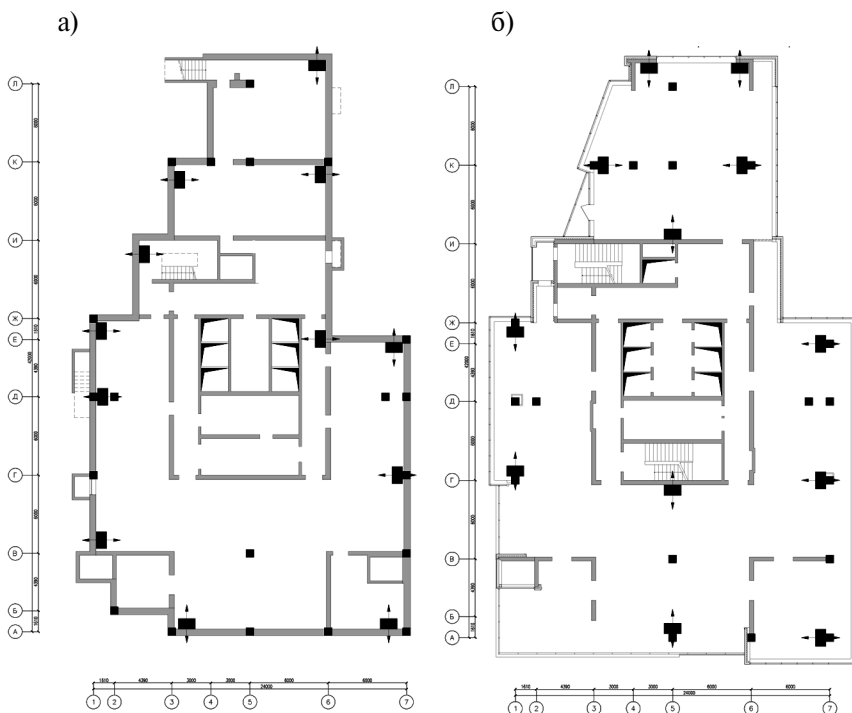


Рисунок 3. Схемы размещения датчиков первичного сбора и обработки информации в плане объекта мониторинга на I (а) и II уровнях (б)

Подключение первичных датчиков к центральному блоку системы было осуществлено по кабелю типа «витая пара», обеспечивающему полосу пропускания сигналов со скоростью не менее 100 МБ/с. В целях предотвращения несанкционированного доступа центральный блок системы был размещен в помещении с круглосуточным пребыванием персонала стройки. В основе функционирования автоматической системы мониторинга, использованной на объекте, лежит принцип определения отклонения установочной базы датчика от нормального положения по данным угловых измерений. При этом непосредственно после установки было осуществлено обнуление сигналов датчиков, что соответствовало начальному углу установки, после чего система сравнивала вновь поступающие сигналы со значениями на момент инициализации датчиков, то есть значения на момент инициализации использовались системой при расчете значения угла отклонения.

Технические результаты мониторинга

1. В ходе проведения мониторинга проводился периодический отбор накапливаемой информации.
2. Анализ полученных данных продемонстрировал целесообразность совмещения на одном графике значений отклонения вдоль одной оси (X или Y), фиксируемых датчиками одного уровня, и значений температуры окружающей среды в местах установки датчиков, с целью установления прямой зависимости перемещений от изменения параметров внешней среды.
3. Рассматривая значения отклонения датчика вдоль оси, следует учитывать значение измерительной базы – физической величины (мм), в пределах которой сенсор регистрирует происходящие изменения отклонения. Значения измерительной базы устанавливаются при калибровке системы мониторинга (таблица 1 и рисунок 4). Кроме того, при анализе значений отклонений было учтено то, что рассматриваемый объект мониторинга является сооружением с динамической реакцией на приложенные нагрузки (рисунок 4, в), в отличие от «абсолютно жесткого тела», для которого характерна схема, приведенная на рисунке 4б.
4. Анализ полученных данных позволил сделать вывод о том, что значения отклонения несущих конструкций находились в безопасных пределах.

Таблица 1

Значения измерительной базы автоматизированной системы мониторинга

Номер датчика	Значение измерительной базы, мм
Датчики 1...12	2 900
Датчики 13, 16...24	3 300
Датчики 14 и 15	52 400
Датчики 25...40	3 300

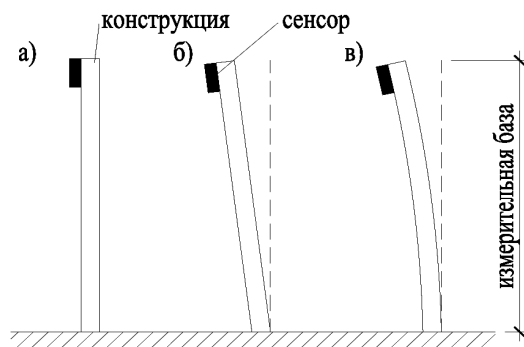


Рисунок 4. Схемы измерительной базы:

- а – схема установки сенсора;
- б – схема измерения отклонения «абсолютно жесткого тела»;
- в – схема измерения отклонения конструкций объекта мониторинга.

ВЫВОДЫ

В результате проведенной работы были выработаны нормативные основы, определяющие порядок проектирования автоматических систем мониторинга напряженно-деформированного состояния конструкций высотных зданий и большепролетных сооружений. При этом установлено, что наиболее эффективным способом контроля является пространственно-координатный мониторинг положения характерных точек объекта с помощью современной аппаратуры, способной обеспечить необходимую точность и скорость измерений, а также адекватную фиксацию результатов. Определены направления дальнейшего развития автоматических систем мониторинга, в том числе:

- увеличение функциональности и уменьшение количества компонентов системы;
- увеличение мобильности в развертывании и монтаже за счет перехода на беспроводные сети;
- рост вычислительной мощности центральных узлов сбора и анализа данных о состоянии объекта мониторинга;
- развитие методов и средств коммуникации с удаленными серверами баз данных для накопления статистического массива информации по различным объектам мониторинга.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Высотные здания. Строительные нормы проектирования : ТКП 45-3.02-108-2008. — Введ. 01.12.08. — Минск : Министерство архитектуры и строительства, 2008. — 89 с.
2. Высотные здания из монолитного железобетона. Правила возведения : ТКП 45-1.03-109-2008. Введ. 01.12.08. — Минск : Министерство архитектуры и строительства, 2008. — 47 с.
3. Горпинченко, В.М., Егоров, М.И. Мониторинг эксплуатационной пригодности особо ответственных, сложных и уникальных сооружений. // Промышленное и гражданское строительство, 2004. — №10.
4. Здания и сооружения. Классификация. Основные положения : СТБ 2331-2014. Введ. 01.04.14. — Минск : Министерство архитектуры и строительства, 2014. — 8 с.
5. Еврокод 7. Геотехническое проектирование. Часть 1. Общие правила: ТКП EN 1997-1-2009. Введ. 01.01.10. — Минск : Министерство архитектуры и строительства, 2010. — 131 с.
6. Дорофеев, В.М., Катренко, В.Г., Назьмов, Н.В. Автоматизированная станция мониторинга технического состояния несущих конструкций высотных зданий. Уникальные и специальные технологии в строительстве (UST-Build 2005). М.: ЦНТСМО, 2005. — С. 66–67.

Статья поступила в редколлегию 22.11.2014