

УДК 624.07:69.032.22:624.04

*А.Н. КЛИМОВ, инженер, ОАО «Центральный научно-исследовательский  
и проектный институт жилых и общественных зданий (ЦНИИЭП жилища)» (Москва)*

## Прогноз развития напряженно-деформированного состояния конструкций высотного здания на основании данных системы мониторинга

*Представлен опыт инструментального мониторинга несущих конструкций 43-этажного жилого дома в Москве. Рассматривается методика решения основной задачи мониторинга – прогнозирования напряженно-деформированного состояния конструкций. В ходе исследования использован статистический анализ экспериментальных данных, в том числе анализ временных рядов методом автоструктурной функции. Выполненное исследование может быть использовано в ходе научно-технического сопровождения строительства высотных зданий, а также для дальнейших исследований работы несущих конструкций высотных зданий.*

**Ключевые слова:** мониторинг, высотные здания, напряженно-деформированное состояние, экспериментальные данные, структурный анализ.

Мониторинг несущих конструкций признается надежным средством повышения безопасности зданий и сооружений как в России, так и за рубежом. Системы долговременного инструментального мониторинга реализованы на большом количестве объектов инфраструктуры (мостов, тоннелей) в странах Европы, США, Канаде, Японии, Корее, Китае и др. [1, 2]. Анализ полученных этими системами данных позволил разработать методики решения ряда важных научных и прикладных задач, от контроля качества строительных работ и составления графика плановых ремонтов до верификации расчетных моделей и исследования реакции сооружений на сейсмические и ветровые воздействия.

В исследованиях, посвященных мониторингу высотных зданий, такой ясности пока не наблюдается. Это связано не столько с самими методами и средствами проведения измерений, которые в большинстве своем уже опробованы и нормированы, сколько с недостатком в объеме данных результатов мониторинга и их научной обработки.

Толчок к проведению масштабных исследований в данной области дало интенсивное развитие высотного строительства, начавшееся в конце 1990 – начале 2000-х гг. В настоящее время в научной литературе становятся доступны первые результаты. Важно отметить, что работы, проводящиеся российскими специалистами, в первую очередь на базе ведущей научно-исследовательской и проектной организации по высотному строительству ОАО «Центральный научно-исследовательский и проектный институт жилых и общественных зданий (ЦНИИЭП жилища)», во многом идут параллельно или даже опережают зарубежные исследования. Этому способствовало закрепление требований по мониторингу высотных зданий на законодательном уровне (Федеральный закон от 30 декабря 2009 г. №384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений») и в нормативных документах (МГСН 4.19–2005 «Временные

нормы и правила проектирования многофункциональных высотных зданий и зданий – комплексов в городе Москве»).

Основные задачи, решаемые в ходе мониторинга несущих конструкций высотных зданий, перечислены в части 4.2 МРДС 02–08 «Пособие по научно-техническому сопровождению и мониторингу строящихся зданий и сооружений, в том числе большепролетных, высотных и уникальных». К этим задачам относятся:

- контроль напряженно-деформированного состояния конструкций (п. 4.2.1);
- сопоставление полученных параметров состояния конструкций с нормируемыми параметрами (п. 4.2.2);
- составление заключения о текущем техническом состоянии объекта и прогноза по изменению технического состояния на ближайший период (п. 4.2.3).

Обзор научной литературы, посвященной мониторингу несущих конструкций высотных зданий, показывает, что в большинстве своем авторы ограничиваются решением только первой [3, 4], реже первой и второй задач [5]. При этом практически не делается попытки предпринять наиболее важный шаг в анализе полученных данных – осуществить прогноз технического состояния здания. В данном случае стоит несколько уточнить терминологию. Согласно ГОСТ Р 53778–2010 «Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния» под техническим состоянием строительных конструкций следует понимать значения параметров, характеризующих их деформативность и несущую способность (п. 3.7 – «Критерий оценки технического состояния»), т. е. фактически напряженно-деформированное состояние (НДС) (п. 3.17 – «Мониторинг технического состояния уникальных зданий и сооружений»). Тем самым поставленная задача полностью соответствует задаче, вынесенной в заголовок данной статьи. Разберем этот вопрос подробно.

Прогноз НДС несущих конструкций – распространенная инженерная задача, которая решается всякий раз при про-



Рис. 1. Высотный жилой дом на ул. Дыбенко, 38 в процессе строительства



Рис. 2. Пункты измерений относительных деформаций в стенах 1-го этажа

ектировании нового здания или сооружения путем составления и анализа его расчетной модели. Главная цель такого прогноза – обеспечить несущую способность конструкций и их соответствие эксплуатационным требованиям с достаточным «запасом». При этом за основу берется исходное состояние конструкции (на момент постройки), а изменения, происходящие в течение срока эксплуатации, практически не учитываются. Этот подход применяется в силу объективных причин, так как в рамках аналитической модели просто невозможно рассмотреть всю совокупность факторов, оказывающих влияние на характеристики железобетонных конструкций и протекающие в них процессы. К этим факторам относятся условия возведения и эксплуатации, уровень напряжений, перераспределение усилий между несущими элементами.

В этом отношении мониторинг несущих конструкций представляет собой эффективное средство, позволяющее оценить как факты отдельных «выбросов», не фиксируемых в аналитических моделях (нестандартный отклик конструкций на внешние воздействия), так и долговременные тенденции развития НДС. Однако для того чтобы перейти от оценки к прогнозу, необходимо выполнить ряд условий:

- получить детальный статистически значимый массив данных об НДС несущих конструкций здания;
- оценить влияние работы грунтового основания и изменения температуры конструкций в течение года на их суммарное НДС.

Перечисленные условия определили принципиальные отличия исследования, представленного в данной статье, от работы, выполненной в ходе мониторинга зданий в Сингапуре [5]: применение автоматической системы мониторинга, позволяющей задавать любой интервал проведения измерений; использование датчиков с контролем темпера-

туры; применение в составе системы мониторинга датчиков давления на грунт под фундаментной плитой.

Полученные результаты представим на примере 43-этажного жилого дома по адресу: Москва, ул. Дыбенко, 38 (рис. 1), для которого в 2008 г. была спроектирована и запущена комплексная система инструментального мониторинга.

В рамках проводимой работы осуществляются наблюдения за состоянием грунтов основания (измерение осадок и давления на грунт под фундаментной плитой), а также за НДС несущих конструкций (измерение относительных деформаций в фундаментной плите, стенах и пилонах 1-го этажа). Сбор данных проводится с момента возведения конструкций вплоть до настоящего времени, при этом с сентября 2011 г. система была запущена в автоматическом режиме с интервалом опроса датчиков 6 часов.

На рис. 2 показаны пункты измерений относительных деформаций в вертикальных несущих конструкциях 1-го этажа. В данной работе использованы струнные тензометрические датчики, схема их установки в конструкции представлена на рис. 3. Выбранный тип датчиков одновременно измеряет две физические величины: уровень относительных деформаций и температуру в точке установки. При обработке данных к измеренному значению деформаций вводится температурная поправка:

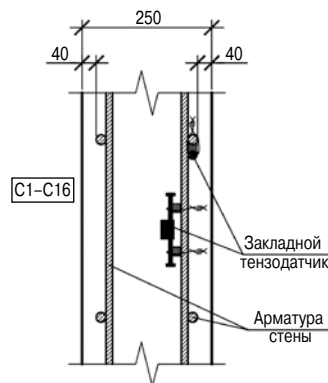


Рис. 3. Схема установки датчиков в стенах

$$\Delta \varepsilon_T = (T_e - T_0) \cdot (\alpha_s - 2\alpha_{bt}), \quad (1)$$

где  $T_0$ ,  $T_e$  – начальная и текущая температура конструкции;  $\alpha_s$ ,  $\alpha_{bt}$  – коэффициенты линейной температурной деформации стали прибора и бетона конструкции.

Данная поправка позволяет учесть влияние, которое оказывают на результаты измерений температура конструкций и приборов, т. е. в итоге получаем значение относительных деформаций, обусловленных только уровнем напряжений (работой стен в конструктивной системе здания) и характеристиками бетона.

За время исследования проведена статистическая обработка большого массива данных, отражающего изменение НДС несущих конструкций здания с 2011 по 2013 г. [6]. Графики изменения относительных деформаций, построенные для различных участков стен 1-го этажа (рис. 4), подобны и характеризуются наличием существенных вариаций. Интервал изменения деформаций за рассматриваемый период (разница между максимальным и минимальным значениями по графикам):  $\Delta \varepsilon = 130 \cdot 10^{-6}$ , т. е. около 35% от среднего значения. Для последующего составления прогноза существенно определить причину и характер наблюдаемых вариаций, т. е. наличие скрытых циклов. Эта задача сама по себе достаточно объемна, и ее решение требует отдельного рассмотрения. В данной статье приведем лишь основные результаты:

- установлено устойчивое приращение значений относительных деформаций в стенах 1-го этажа, которое обусловлено процессами, происходящими в материале конструкций, в первую очередь ползучестью бетона. Относительная скорость увеличения деформаций в различных конструкциях составляет от 2 до 15% в год со средним значением 9% в год по большинству датчиков;

- значения относительных деформаций в стенах испытывают сезонные вариации с амплитудой  $\pm 15\%$  от трендовой составляющей, что обусловлено влиянием на НДС конструкций работы грунтового основания.

Для осуществления прогноза НДС конструкций воспользуемся регрессионным анализом. При этом установленное приращение относительных деформаций в стенах будет выражаться уравнением регрессии. Зависимость между величиной относительных деформаций в конструкциях и временем эксплуатации в общем случае может иметь различный вид:

- линейный:  $\varepsilon = a + kt$ ; (2)

- степенной:  $\varepsilon = \tilde{a} \cdot t^k$ ; (3)

- экспоненциальный:  $\varepsilon = a' \cdot e^{k \cdot t}$ ; (4)

- логарифмический  $\varepsilon = \hat{k} \cdot \ln t - \hat{a}$ . (5)

Значения входящих в уравнения регрессии (2–5) параметров  $a$  и  $k$  могут отличаться для разных точек измерения, но в целом подчиняются закону нормального распределения.

На больших временных интервалах, составляющих десятки и более лет, различные представления уравнения регрессии дают существенный разброс прогнозируемой величины деформаций. Для адекватного прогноза НДС необходимо из перечисленных вариантов выбрать тот, который наиболее точно отражает работу конструкций. Эта задача может быть решена путем анализа автоструктурной функции (АСФ) исследуемого процесса. Основным преимуществом данной методики является то, что АСФ функционально связана с характеристиками спектральных свойств процесса [7], что может использоваться для оценки его трендовых, периодических и непериодических составляющих.

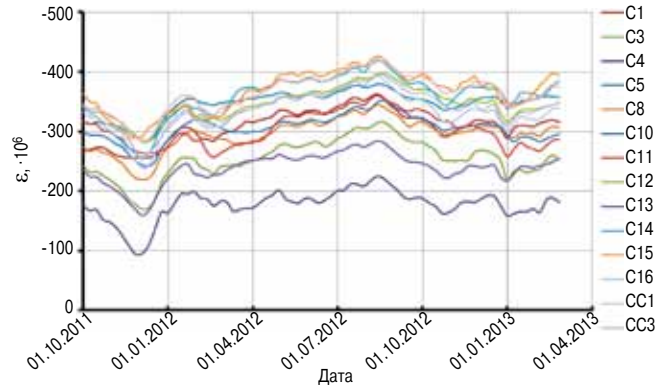


Рис. 4. Развитие относительных деформаций в стенах 1-го этажа

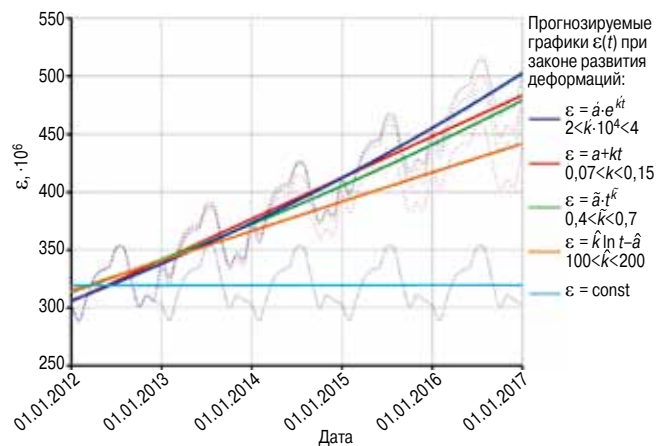


Рис. 5. Прогноз развития относительных деформаций в стене C2

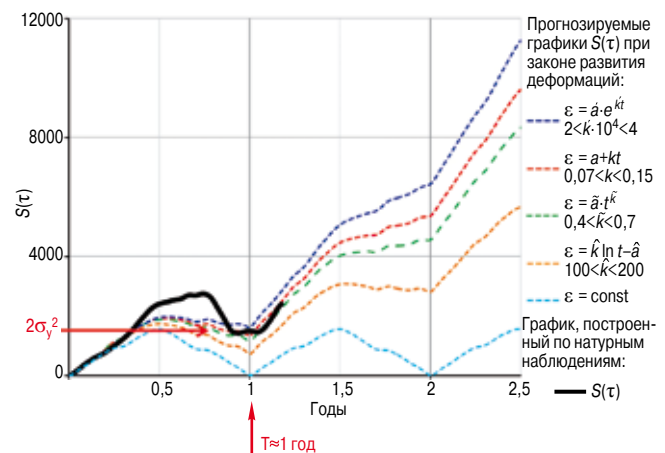


Рис. 6. АСФ развития относительных деформаций в стене C2

Для примера рассмотрим прогноз НДС в стене C2. Опираясь на данные системы мониторинга, определяем уравнения регрессии и экстраполируем полученные графики на пятилетний срок (рис. 5). В целях определения результирующей АСФ, учитывающей периодические и непериодические составляющие процесса, на полученные графики накладываем сезонные вариации деформаций, которые были получены по имеющимся данным (пунктирные линии). Для сравнения также построен график, по которому относительные деформации в стене испытывают только циклические изменения (голубая линия).



Графики АСФ, построенные для каждого из вариантов прогноза (рис. 6), позволяют сопоставить скорости развития относительных деформаций, так как значение ординаты, соответствующей минимуму функции, составляет  $2\sigma_y^2$ , где  $\sigma_y$  – скорость развития процесса. Из сравнения АСФ прогнозируемых (пунктирные линии) и действительного графика изменения деформаций (сплошная линия) можно сделать вывод о соответствии работы конструкции той или иной модели. В данном случае развитие относительных деформаций в стене имеет зависимость от срока эксплуатации, близкую либо к линейной, либо к степенной с показателем степени  $k \approx 0,53$ . Представляется, что при большом сроке проведения мониторинга (не менее 3 лет), можно сделать достаточно обоснованный выбор в пользу той или иной модели развития НДС конструкций. Существенно, что при постоянном автоматизированном мониторинге несущих конструкций высотного здания закон изменения деформаций со временем может корректироваться и уточняться.

Большинство высотных зданий обладают уникальным архитектурным и конструктивным решениями, выполняются по индивидуальному проекту, однако приведенный пример отражает общий алгоритм прогноза НДС несущих конструкций, который может совершенствоваться и изменяться в зависимости от специфики конкретного объекта. Выполненное исследование также имеет перспективу дальнейшего развития. Следующий шаг применения полученных данных – оценка срока службы конструкций или их остаточного ресурса.

### Список литературы

1. *Inaudi D.* Overview of 40 Bridge Structural Health Monitoring Projects. 26th Annual International Bridge Conference 2009: IBC 2009: Meeting Bridge Challenges in Challenging Times. 2010. Vol. 1. P. 343–350.
2. *Ko J.M., Ni Y.Q.* Technology developments in structural health monitoring of large-scale bridges // *Engineering Structures*. 2005. Vol. 27. P. 1715–1725.
3. *Неугодников А.П., Егоров Ф.А., Поспелов В.И., Жданов В.В., Шахраманьян А.М., Егоров М.В., Чурдалев Е.В.* Волоконно-оптическая система мониторинга в Москве: опыт, результаты, перспективы // *Технологии строительства*. 2007. № 6 (54). С. 54–59.
4. *Дорофеев В.М., Дузинкевич М.С., Назьмов Н.В., Лысов Д.А.* Опыт проектирования стационарных автоматизированных станций мониторинга технического состояния высотных зданий // *Промышленное и гражданское строительство*. 2007. № 5. С. 32–34.
5. *Glisic B., Inaudi D., Lau J.M., Fong C.C.* Ten-year monitoring of high-rise building columns using long-gauge fiber optic sensors // *Smart Materials and Structures*. 2013. Vol. 22(5). Paper 055030.
6. *Климов А.Н.* Методика обработки данных системы мониторинга высотного здания // *Промышленное и гражданское строительство*. 2012. № 12. С. 42–43.
7. *Прохоров С.А., Графкин В.В.* Структурно-спектральный анализ случайных процессов. Самара: СНЦ РАН, 2010. 128 с.

**ИНЖ  
ПРОЕКТ  
СТРОЙ**

**СОВРЕМЕННЫЕ ГЕОТЕХНОЛОГИИ**

- УКРЕПЛЕНИЕ ГРУНТОВ
- ОГРАЖДЕНИЕ КОТЛОВАНОВ
- ПОВЫШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСОВ
- ПРОТИВОФИЛЬТРАЦИОННЫЕ ЗАВЕСЫ
- УСИЛЕНИЕ ФУНДАМЕНТОВ
- ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ

(499) 951-03-21  
www.jet-grouting.ru

Реклама