На правах рукописи

КАЛИЧАВА ДМИТРИЙ КОТЭВИЧ

АДАПТИВНЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ КОНЕЧНОЭЛЕМЕНТНЫЕ МОДЕЛИ В ОСНОВЕ МОНИТОРИНГА НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЙ

Специальность 05.13.18 –
Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2012

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Белостоцкий Александр Михайлович

Официальные оппоненты: **Травуш Владимир Ильич**
доктор технических наук, профессор, ОАО «Экспериментальный научно-проектный институт», заместитель генерального директора

Кашеварова Галина Геннадьевна
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», кафедра «Строительная механика и вычислительные технологии», заведующая кафедрой

Ведущая организация: **ОАО «НИЦ «Строительство» – «Центральный научно-исследовательский институт строительных конструкций им. В.А. Кучеренко»**,
г. Москва

Защита состоится «28» декабря 2012 г. в 12 часов на заседании диссертационного совета Д212.138.12 при ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет» по адресу: 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, ауд. №9 «Открытая сеть».

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет».

Автореферат разослан «28» ноября 2012 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета **Анохин Николай Николаевич**

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Проектирование и строительство высотных зданий и комплексов "современных" архитектурных форм и конструктивных решений в России начиналось менее 20-и лет назад в условиях дефицита отечественной нормативной документации и опыта подобного строительства – в результате не было обеспечено должным научно-техническим сопровождением и мониторингом несущих конструкций. Следствием этого явились проектные ошибки, вызванные, в том числе, недостаточностью расчетного обоснования, и низкое качество производства строительных работ.

Проблема мониторинга несущих конструкций (на стадиях строительства и эксплуатации) приобретает особое значение, важность которого уже признали проектировщики, строители и специалисты надзорных организаций. Однако единого мнения и алгоритма решения на сегодняшний день не выработано. Особого внимания заслуживает динамический (вариант – *сейсмометрический*) метод, который, по замыслу, позволяет обследовать здание в целом и выявить значимые изменения в несущих конструкциях без инструментального воздействия и визуального осмотра каждой конструкции. К сожалению, в понимании сути, возможностей и ограничений динамического мониторинга не продвигают и самые «свежие» нормативные требования ГОСТ Р 53778-2010, предписывающие «…фиксировать значения (периода и логарифмического декремента) основного тона собственных колебаний «по трем осям жесткости здания».

Отметим усложняющую специфику высотных зданий и преимущества сейсмометрического метода в контексте проблемы мониторинга: большая размерность и вариабельность (например, по нагрузкам, массам и жесткостям) объекта при сложности визуально-инструментального их определения (затруднен или невозможен оперативный доступ к большинству несущих конструкций в жилых, офисных и иных помещениях).

Инструментальный мониторинг без опоры на адекватные математические "мониторинговые" модели здания носит случайно-бессмысленный характер и, потому, уводит от осознания реальных проблем. Упомянутые "мониторинговые" модели имеют ряд специфических отличий от расчетных моделей, используемых для обоснования проектных решений: реализация не проектных, а фактических физико-механических свойств строительных материалов (бетона, арматуры и др.) и геометрии конструкции; учет не нормативных, а фактических измеренных нагрузок и воздействий; включение в статическую и, в особенности, динамическую работу при слабых «фоновых» воздействиях номинально ненесущих конструкций; работа ряда узлов и соединений по схемам, отличным от принятых в проекте; адаптируемость (калибруемость, "обучаемость") модели по данным инструментального мониторинга, в том числе, включение обнаруженных дефектов.

Цель и задачи работы. *Целью* диссертации являлась разработка и исследование численной методики как основы и в составе комплексной расчетно-инструментальной системы динамического мониторинга несущих

конструкций высотных зданий-комплексов на значимых стадиях возведения и эксплуатации.

Решаемые *задачи:*

- анализ действующих российских нормативно-методических документов в части мониторинга уникальных (в том числе, высотных) зданий для конкретизации расчетно-экспериментальных исследований и разработок;
- разработка численной методики на базе параметризуемых и адаптируемых (по результатам измерений динамических характеристик объекта) конечноэлементных моделей, позволяющей оценить состояние несущих конструкций высотных зданий с учетом отступлений от проекта на значимых стадиях строительства и эксплуатации;
- выбор базового инструментального метода динамического мониторинга, удовлетворяющего требованиям полноты, точности и оперативности измерений для высотных зданий;
- программная реализация численной методики с построением параметризуемых КЭ-моделей экспериментальных стендов, представительных для задач исследований;
- верификация методики на упомянутых стендовых моделях – возможность оценки фактического состояния и обнаружения значимых дефектов с использованием выбранного инструментального метода;
- апробация разработанной комплексной методики на реальном возведенном высотном здании с выявленными (по результатам обследований) отступлениями от проекта и гипотетическими дефектами.

Методы и средства исследований. Расчетными методами и средствами исследований являются численные методы решения задач линейной динамики конструкций и современные математические модели механики деформируемого твердого тела, реализованные в верифицированных программных комплексах, и методы теории обратных некорректных задач.

Измерения собственных частот и форм выполнялись по методике «стоячих волн», разработанной Геофизической службой СО РАН и апробированной на объектах гидротехнического, транспортного и гражданского строительства.

Научная новизна:

- разработана численная методика, основанная на параметризуемой и адаптируемой (по результатам измерений спектра собственных частот и форм колебаний объекта) пространственной динамической конечноэлементной модели, позволяющая оценить состояние несущих конструкций высотных зданий с учетом дефектов и отступлений от проекта на значимых стадиях строительства и эксплуатации;
- разработанная методика верифицирована на стендовых моделях МГСУ и показала возможность обнаружения значимых дефектов с использованием инструментального метода «стоячих волн»;
- выполнена апробация разработанной методики на возведенном высотном здании с выявленными (по результатам обследований) отступлениями от проекта, показавшая как близость вычисленных и

измеренных частот и форм в значимом диапазоне частот, так и «пропуск» ряда частот и форм при планировании измерений без учета результатов динамического анализа КЭ-модели.

Практическая значимость:

- численная методика реализована в специализированном исследовательском программном комплексе (СИПК) «*ANSYS-Мониторинг*», разработанном на базе универсального комплекса *ANSYS Mechanical*, и содержит параметризованные пространственные динамические конечноэлементные модели двух стендов МГСУ;
- для рассмотренного высотного здания установлено, что в диапазоне собственных частот от 0 до 14 Гц (200 низших форм колебаний) фактические отступления от проекта не проявляются, а гипотетические «удаления» одной из несущих колонн, стен или фрагмента перекрытия значимо сказываются на ряде локальных форм колебаний и могут быть идентифицированы в ходе инструментального мониторинга методом «стоячих волн»;
- на основании выполненных исследований рекомендуется внедрить предложенную комплексную расчетно-экспериментальную методику для динамического мониторинга несущих конструкций высотных зданий на стадиях их строительства и эксплуатации.

Достоверность полученных результатов обеспечивается:

- применением апробированного математического аппарата (теории некорректных задач) и численных методов (метод конечных элементов для пространственной дискретизации и блочный метод Ланцоша для решения частной проблемы собственных значений), реализованных в верифицированном программном комплексе *ANSYS*;
- решением серии тестовых задач и сравнением с экспериментально полученными результатами на стендовых моделях;
- сравнением и сопоставлением полученных решений с данными натурных обследований и с результатами сейсмометрических измерений.

Внедрение. Разработанная методика и реализующее программное обеспечение применяются в Научно-образовательном центре компьютерного моделирования (НОЦ КМ) МГСУ и Научно-исследовательском центре «СтаДиО» для расчетного обоснования конструкций высотных зданий на стадиях проектирования и эксплуатации-мониторинга.

Личный вклад соискателя. Все разработки и исследования, изложенные в диссертационной работе, проведены лично соискателем в процессе научной деятельности. Из совместных публикаций в диссертацию включен лишь тот материал, который непосредственно принадлежит соискателю.

На защиту выносятся:

- численная методика, основанная на параметризуемой и адаптируемой (по результатам измерений спектра собственных частот и форм колебаний объекта) динамической конечноэлементной модели, позволяющая оценить состояние несущих конструкций высотных зданий с учетом дефектов и отступлений от проекта (класс бетона, геометрические отклонения, ослабления

контактов колонн и стен с перекрытиями и др.) на значимых стадиях строительства и эксплуатации;

- результаты верификационных задач, решенных в обоснование достоверности и эффективности разработанной методики в специализированном исследовательском программном комплексе (СИПК) «*ANSYS-Мониторинг*», разработанном на базе универсального «тяжелого» комплекса *ANSYS Mechanical*, и содержащем параметризованные пространственные динамические КЭ-модели двух стендов МГСУ – «Этажерка» и «Конструктор»;
- результаты апробации разработанной методики на возведенном высотном здании – МФЖК «Дирижабль» с выявленными (по результатам альтернативных обследований) отступлениями от проекта, показавшая как близость вычисленных и измеренных частот и форм в широком диапазоне частот, так и «пропуск» ряда частот и форм при некачественном планировании измерений;
- результаты исследования чувствительности инструментального метода динамического мониторинга к вариациям параметров систем – от стендовых моделей МГСУ до реального высотного здания.

Апробация научных положений и основных результатов выполненного исследования произведена в виде докладов на ряде научно-технических конференций, симпозиумов и семинаров, в том числе:

- международные симпозиумы «Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений» (III – Новочеркасск, 2010 г., IV – Челябинск, 2012 г.);
- международные конференции “Математическое моделирование в механике сплошных сред на основе методов граничных и конечных элементов. BEM&FEM”, С-Петербург (XX – «BEM&FEM-2003», XXIII – «BEM&FEM-2009», XXIV – «BEM&FEM-2011»);
- международные научно-практические конференции «Теория и практика расчета зданий, сооружений и элементов конструкций. Аналитические и численные методы», МГСУ, Москва (2008 г., 2010 г.);
- научные семинары НОЦ компьютерного моделирования уникальных зданий, сооружений и комплексов МГСУ (2009-2012 гг.).

Публикации. По тематике диссертации опубликовано 17 работ, в том числе шесть работ в изданиях, включенных ВАК в перечень рекомендуемых.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав (с выводами по каждой главе), заключения, списка литературы из 154 наименований. Общий объем диссертации – 149 страниц, 60 рисунков, 24 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во ***введении*** дается обоснование актуальности работы, определены предметы, цели и задачи исследований, перечислены основные научные и практические результаты, приведено краткое содержание диссертации по главам.

В ***первой главе*** приводится аналитический обзор современного состояния вопроса мониторинга несущих конструкций уникальных, в том числе, высотных зданий.

Рассмотрена мировая практика и специфика российского строительства высотных зданий. Дана критическая оценка действующих российских нормативных документов в области мониторинга уникальных зданий.

Отмечены разработки адекватных пространственных моделей и методов расчета конструкций, зданий и сооружений для стадии проектирования и с учетом фактического состояния. Лидеры отечественных методических и программно-алгоритмических разработок для высотных зданий – А.М. Белостоцкий, А.С. Городецкий, С.И. Дубинский, О.В. Кабанцев, Н.И. Карпенко, С.Н. Карпенко, О.В. Мкртычев, А.В. Перельмутер, В.А. Семенов, В.И. Травуш, О.В. Трифонов, С.Ю. Фиалко, А.И. Шахворостов. Вопросы математического моделирования в основе и в составе систем мониторинга разрабатывались А.М. Белостоцким, Н.К. Капустян, М.А. Коргиной, Ю.И. Кудишиным, С.Ф. Кузнецовым, Р. Катценбахом, А. Шмиттом и др. Приведен и систематизирован набор универсальных и специализированных конечноэлементных программных комплексов, используемых в мировой и отечественной практике расчетного обоснования высотных зданий.

Значимые практические результаты по созданию и использованию инструментальных методов мониторинга (включая динамические) уникальных сооружений энергетического и гражданского строительства принадлежат коллективам под руководством Г.Э. Шаблинского, А.В. Коргина, А.Ф. Еманова, М.А. Шахраманьяна, А.М. Шахраманьяна и др.

Во ***второй главе*** приводится описание разработанной расчетно-экспериментальной методики мониторинга несущих конструкций высотных зданий, основанной на детальных большеразмерных пространственных динамических КЭ-моделях, параметризуемых для всех значимых стадий «жизненного цикла» объекта и адаптируемых по данным инструментальных наблюдений (в том числе, на основе выбранного метода стоячих волн).

Структурная схема и наполнение разработанной методики мониторинга представлена на рис.1.

«Стартовой» является КЭ-модель (модели), разработанная для обоснования несущей способности актуального проектного варианта. Для каждой значимой стадии «жизненного цикла» здания (этапы строительства и эксплуатации) строится/модифицируется, верифицируется и адаптируется по текущим данным инструментальных наблюдений параметризуемая пространственная динамическая «мониторинговая» КЭ-модель. При этом основным адаптационным критерием принимается соответствие расчетного и измеренного спектра собственных частот

и форм во всем диапазоне частот, значимом как для оценки общесистемных изменений, так и идентификации-локализации возможных дефектов.

Расчетная оценка несущей способности конструкций выполняется в соответствии с нормативными критериями по КЭ-модели, содержащей параметры как текущей «мониторинговой», так и исходной «проектной» модели. Должны быть включены дополнительные (по сравнению с динамической моделью) свойства – характеристики основания, жесткости и нагрузки и др. Этими данными модель насыщается по результатам всех видов мониторинга.

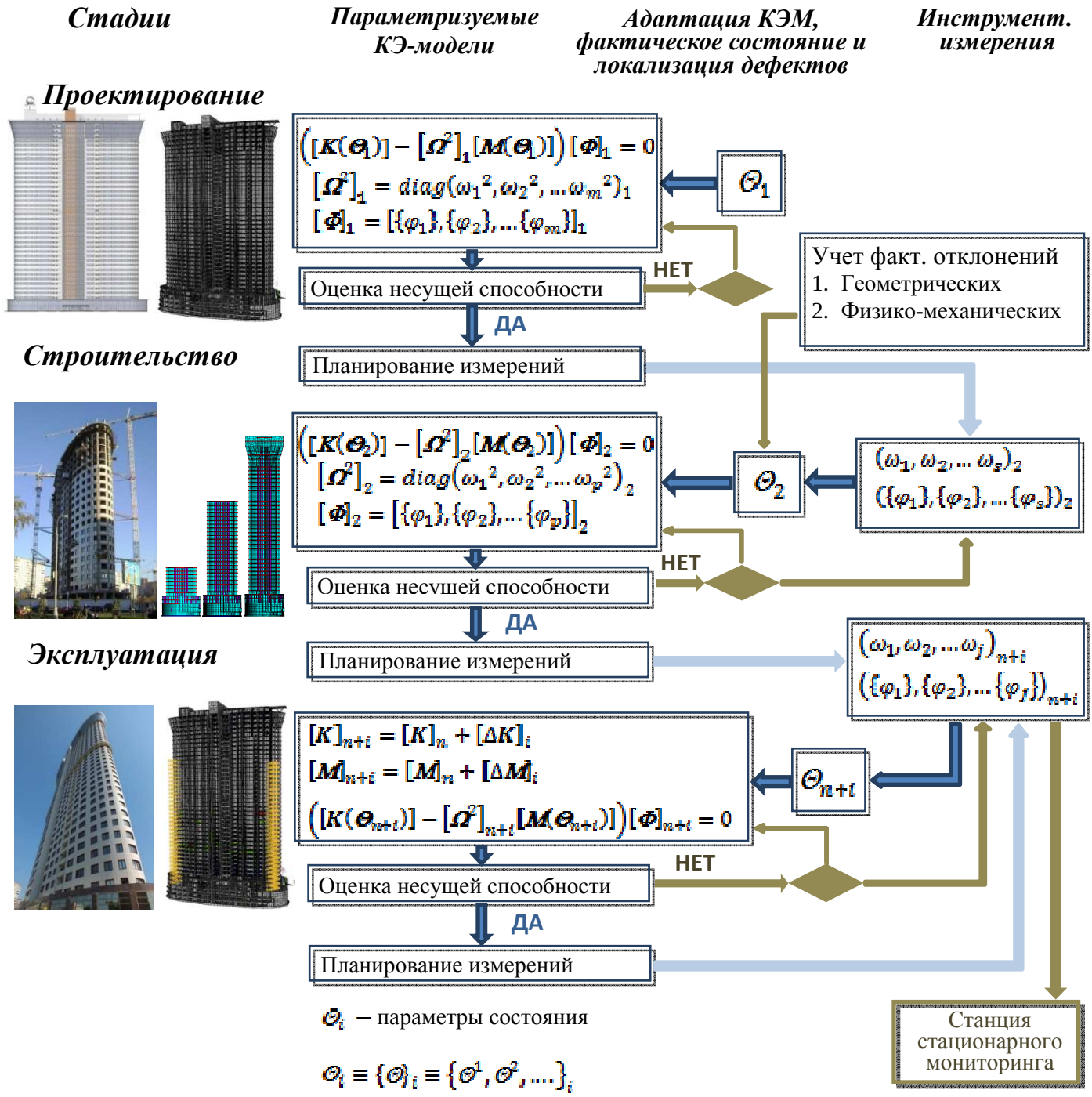


Рис.1. Структурная схема комплексной методики динамического мониторинга (адаптивные КЭ-модели и инструментальные измерения частот и форм)

Параметризуемые КЭ-модели высотных зданий

Пространственная оболочечно-стержневая КЭ-модель (модели) "основание - здание", разработанная для обоснования параметров напряженно-деформированного состояния (НДС) и несущей способности актуального проектного варианта, является «стартовой» для дальнейшей параметризации и адаптации.

Вектор параметров модели

$\boldsymbol{\theta_l} \equiv \{\theta\}_l = \{\theta_1\ \theta_2\ \theta_3 \ldots\}_l$

для каждой значимой стадии строительства и эксплуатации $l = 1,2,\ldots$ (для которой выполняется инструментальный мониторинг), может включать следующие фактические данные, отличные от проектно-нормативных для высотных зданий:

θ_1 – динамические характеристики основания; θ_2 – физико-механические свойства строительных материалов (бетона, арматуры и др.); θ_3 – геометрия несущих конструкций (в частности, эксцентриситеты и наклоны стен и колонн); θ_4 – измеренные нагрузки и воздействия; θ_5 – жесткость и масса номинально ненесущих конструкций (перегородок, фасадных и др.), включенных в динамическую работу при слабых «фоновых» воздействиях; θ_6 – работа ряда узлов и соединений по схемам, отличным от принятых в проекте (например, упругая заделка вместо шарнира.

Реализуются известные приемы построения пространственных оболочечно-стержневых динамических КЭ-модели с учетом перечисленных факторов. Так, снижение класса бетона от проектного учитывается соответствующим понижением модуля упругости, а отклонение геометрического положения колонн и стен – «жесткими вставками», что позволяет учесть как смещение элементов в плане, так и их наклон.

Наиболее проблемным является учет жесткости перегородок (особенно, внутриквартирных) и фасадных конструкций для стадий эксплуатации, при слабых фоновых воздействиях включенных в динамическую работу системы. Возможен как "интегральный" подход (пропорциональное увеличение жесткости вертикальных несущих конструкций), так и введение в КЭ-модель каждой ненесущей конструкции с приведенной динамической жесткостью (что может в разы увеличить вычислительную размерность модели).

Для параметризованной КЭ-модели ставится и решается частная (частичная) проблема собственных значений – определение значимой "порции" собственных частот ω_i и форм $\{\varphi_i\}$ колебаний динамической системы

$$[K(\theta_l)][\Phi] = [\Omega^2][M(\theta_l)][\Phi], \qquad (1)$$

где $[\Phi] = [\{\varphi\}_1 \ldots \{\varphi\}_n]$, $[\Omega^2] = diag(\omega_1^2, \ldots, \omega_n^2)$,

$[K(\theta_l)]$ – матрица жесткости, $[M(\theta_l)]$ – матрица масс системы.

Как показала расчетная практика, для больших задач, характерных для КЭ-анализа высотных зданий (миллионы неизвестных – динамических степеней свободы) выбранный *блочный метод Ланцоша* имеет неоспоримые преимущества в скорости определения заданного количества собственных частот и форм.

Адаптация КЭ-модели по данным инструментальных наблюдений

Можно выделить две основные группы подходов, используемых при адаптации КЭ-моделей по данным динамического мониторинга: «интуитивно-инженерные» и математически формализованные. На практике сегодня доминируют методики первой группы, оставляя широкий простор для интерпретации расчетных и измеренных динамических характеристик.

Среди методов второй группы выделяются наиболее строгие и перспективные, основанные на численном решении некорректных обратных задач методом регуляризации А.Н. Тихонова. К настоящему времени разработаны алгоритмы и программные реализации, позволяющие идентифицировать фактическое состояние и локализовать дефекты для простых линейно-упругих систем (балка и плита на винклеровском основании, ферма, рама).

Предлагаемый вариант алгоритма основан на решении нелинейной задачи оптимизации – минимизации *целевой функции*.

$$\underset{\theta}{Minimize} \quad \Pi(\theta) = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{nmd}\alpha_i\left\|\varphi_i - \hat{\varphi}_i\right\|^2 \quad \text{при } R(\theta) \geq 0$$

Функция чувствительности

$$\Pi_{,\theta} = \sum_{i=1}^{nmd}\alpha_i\left\|\varphi_i - \hat{\varphi}_i\right\| \; \varphi_{i,\theta} \qquad \varphi_{i,\theta} = -\sum_{i\neq j}^{nmd}\frac{\varphi_i^T K_{,\theta}\varphi_j}{(\lambda_i - \lambda_j)\varphi_i^T M\varphi_i}\varphi_i \;\; (i \neq j) \qquad (2)$$

Регуляризация

$$\underset{\theta}{Minimize} \;\; \Pi(\theta) = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{nmd}\alpha_i\left\|\varphi_i - \hat{\varphi}_i\right\|^2 + \frac{\beta}{2}\left\|K(\theta) - K(\theta_0)\right\|^2 \quad \text{при } R(\theta) \leq 0$$

где $\boldsymbol{\theta} \equiv \{\theta\} = \{\theta_1\ \theta_2\ \theta_3\ ...\}$ – ранее введенный вектор параметров системы, α_i – весовые коэффициенты, φ_i и $\hat{\varphi}_i$ – вычисленные и измеренные собственные формы колебаний, $\boldsymbol{R}(\boldsymbol{\theta})$ – ограничения по параметрам, λ_i – вычисленные собственные числа (квадраты круговых частот), $\boldsymbol{\theta}_0$ – начальное состояние, β – коэффициент регуляризации, $\boldsymbol{K}$ – матрица жесткости, $\boldsymbol{M}$ – матрица масс КЭМ.

В контексте поставленных задач динамического мониторинга обращает на себя внимание требования (2) к точности расчетного и инструментального определения не только собственных частот, но и форм колебаний в предметно значимом частотном диапазоне.

Выбор метода измерений собственных частот и форм колебаний

Как следует из здравого инженерного смысла и подтверждается формально-математическими выкладками, метод измерений должен обеспечивать приемлемое по точности определение не только низших общесистемных, но и тех собственных частот и форм колебаний, которые идентифицируют локальные изменения состояния конструкций (включая разрушения), при выполнении также требований оперативности и экономической конкурентоспособности.

Анализ доступных источников показал, что этим критериям в наибольшей степени отвечает метод стоячих волн (построенный на основе принципа восстановления когерентных составляющих волновых полей), разработанный коллективом Геофизической службы СО РАН под руководством д.т.н. А.Ф. Еманова. Необходимая полная система наблюдений предусматривает одновременную регистрации ускорений в опорной и некотором представительном

наборе точек. Принимается модель линейной связи волновых полей в двух точках объекта. На основе винеровской фильтрации и свойства когерентности стоячих волн (колебаний) разработан алгоритм расчета фильтров, пересчитывающих колебания из опорной точки в другие точки системы наблюдений.

В России накоплен положительный опыт использования этого метода для определения динамических характеристик плотин, мостов и зданий (большепролетных и, в меньшей степени, многоэтажных). Для высотных зданий-комплексов такого опыта нет – пробел предполагается восполнить исследованиями на реальном объекте (глава 5).

Оценка несущей способности для фактического состояния

Расчетная оценка НДС и несущей способности конструкций выполняется в соответствии с нормативными критериями по КЭ-модели, содержащей параметры как текущей «мониторинговой», так и исходной «проектной» модели.

Статическое и динамическое (в том числе, сейсмическое) НДС для стадии l определяется из решения системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) равновесия

$$[K(\Theta_l)][\{u\}_1 ... \{u\}_m] = [\{F(\Theta_l)\}_1 ... \{F(\Theta_l)\}_m]$$

и уравнений движения

$$[M(\Theta_l)]\{\ddot{u}\} + [C(\Theta_l)]\{\dot{u}\} + [K(\Theta_l)]\{u\} = \{F(\Theta_l)\}$$

оценка устойчивости (низших критических нагрузок λ_i и форм потери устойчивости $\{\varphi\}_i$) – из решения частичной проблемы собственных значений

$$[K(\Theta_l)][\Phi] = [\Lambda][K_G(\Theta_l)][\Phi],$$

где $[\Phi] = [\{\varphi\}_1 ... \{\varphi\}_n]$, $[\Lambda] = diag(\lambda_1, ..., \lambda_n)$.

При этом включаются дополнительные (по сравнению с динамической моделью) свойства – характеристики основания, жесткости и нагрузки и др. (набор параметров Θ_l). Этими данными модель насыщается по результатам всех видов мониторинга.

В рамках предлагаемого подхода на каждой стадии мониторинга можно "ревизовать" и расчеты на прогрессирующее обрушение с учетом фактического состояния объекта.

Планирование измерений

Планирование измерений на текущей стадии мониторинга следует проводить, основываясь на результатах предыдущей стадии. Так, при обнаружении "подозрительных" собственных частот и форм колебаний необходимо установить достаточное число датчиков (точек) для измерений для качественной идентификации этих частот и форм.

Третья глава содержит описание специализированного исследовательского программного комплекса (СИПК) «*ANSYS-Мониторинг*», реализующего разработанную методику на базе универсального конечноэлементного программного комплекса *ANSYS Mechanical*, верифицированного в системе РААСН для наукоемких строительных задач.

СИПК «*ANSYS-Мониторинг*» предназначен для построения моделей и анализа напряженно-деформированного состояния и динамических

характеристик трех стендовых моделей ("Конструктор", "Этажерка" и "Плита на неоднородном упругом основании"), установленных в НОЦ Мониторинга МГСУ. Структура и возможности СИПК позволяют оперативно и надежно провести подробный КЭ-анализ стендовых моделей с определенным набором параметров (геометрико-жесткостных, инерционных и нагрузочных), включая специально внесенные дефекты.

В четвертой главе изложены результаты верификации разработанной методики, выполненной на двух показательных стендовых моделях «Конструктор» и «Этажерка» (развернуты в НОЦ Мониторинга МГСУ) в «идеальном» и контролируемо дефектных исполнениях.

Результаты верификации методики на стенде «Конструктор»

Сравнение вычисленных динамических характеристик построенных пространственно-стержневой и объемной КЭ-моделей в СИПК «*ANSYS-Мониторинг*» для ряда конфигураций стенда показало ожидаемую практическую идентичность результатов – расхождение по собственным частотам менее 0,5% на первой и не более 3% на высших формах при полном соответствии форм колебаний.

Адаптируемые параметры $\boldsymbol{\theta_i}$ выбранных базовых оболочечно-стержневых КЭ-моделей стенда в конфигурации, для которой выполнены измерения собственных частот и форм методом "стоячих волн" (табл.1-2): расположение 6-и акселерометров в узлах (как дополнительных сосредоточенных масс, 2 расстановки); податливость "основания" (жесткое, стержневая и оболочечная модели двутавровой балки на бетонной подливке); разрыв одного из горизонтальных стержней.

Установлено, что (табл.1-2):

– последовательность расчетных и измеренных (7 низших) собственных форм колебаний идентична для всех рассмотренных моделей;

– максимальное значимое расхождение по собственным частотам (до 22% для колебаний в плоскости симметрии модели) снижается до практически приемлемого уровня учетом в КЭ-модели дополнительных масс акселерометров (до 18%) и, главное, податливости основания (до 8%); в качестве базовой принимается модель "двутавр-оболочка на жестком основании – стержни с массами";

– расчетные собственные частоты-формы не чувствительны к способу расстановки масс-акселерометров;

– внесенный "сильный" дефект – разрыв горизонтального стержня в консольной части на 3-м ярусе – уверенно идентифицируется по низшей собственной частоте (снижение на 10%) и, в особенности, по 4-й (снижение частоты на 35%) и 5-й (на 22%) форме, на которых в наибольшей степени проявляется изменение жесткости и потеря симметрии системы (в частности, эффекты закрутки).

Таблица 1

Стенд «Конструктор». Адаптация (калибровка) КЭ-модели. Собственные частоты, Гц

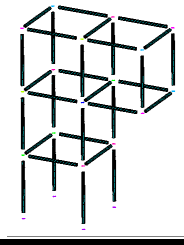
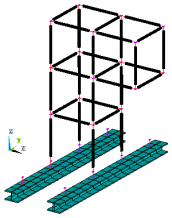
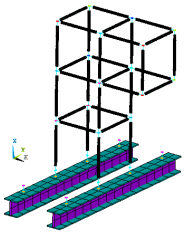
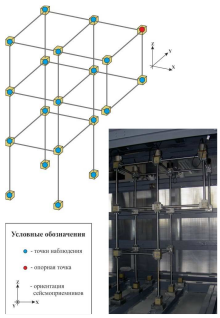
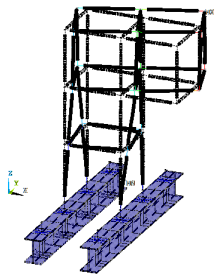
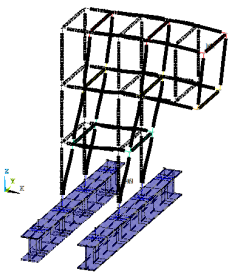
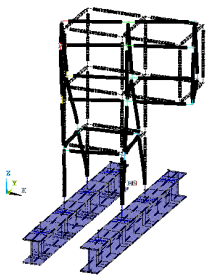
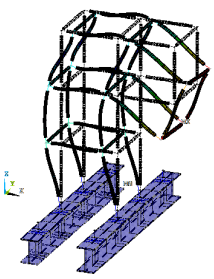
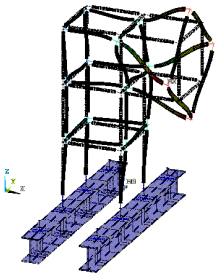
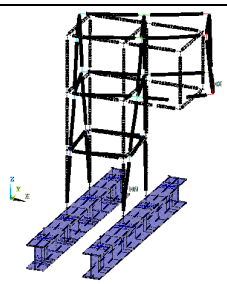
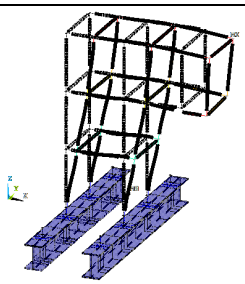
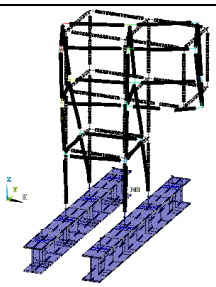
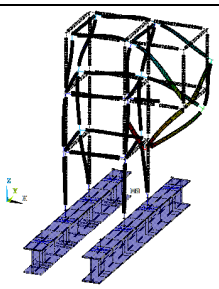
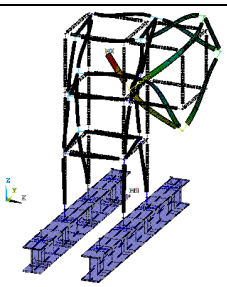
№	Без акселерометров Жесткое основание 	Акселерометры по 1-й схеме Жесткое основание	Акселерометры по 1-й схеме В основании Beam188* 	Акселерометры по 1-й схеме В основании Shell43** 	Эксперимент, метод «стоячих волн» 
1	9.1828	8.8435	7.9554	***8.6825***	**8.240**
2	12.090	11.687	8.4898	***10.785***	**9.888**
3	15.073	14.583	14.300	***14.460***	**13.67**
4	30.316	29.181	25.469	***28.207***	**26.25**
5	38.990	37.575	37.461	***37.543***	**35.46**
6	50.513	49.259	43.562	***48.949***	**47.42**
7	55.540	54.247	48.472	***50.950***	**50.59**
…	…	…	…	…	
15	103.66	100.52	84.920	***99.411***	

Таблица 2

Стенд "Конструктор". Собственные частоты (Гц) и формы колебаний КЭ-моделей

Модель без дефектов				
$f_1=\frac{8.6825}{8.240}$	$f_2=\frac{10.785}{9.888}$	$f_3=\frac{14.460}{13.67}$	$f_4=\frac{28.207}{26.25}$	$f_5=\frac{37.543}{35.46}$
				
Модель с внесенным дефектом (разрыв горизонтального стержня)				
$f_1=\frac{7.9673}{7.568}$	$f_2=\frac{10.744}{9.766}$	$f_3=\frac{14.317}{13.49}$	$f_4=\frac{21.566}{19.96}$	$f_5=\frac{30.298}{27.59}$
				

* В числителе – вычисленные значения, в знаменателе – измеренные значения.

** Оболочка-двутавр жестко закреплена по нижней плоскости и по торцам.

Акселерометры заданы сосредоточенными массами в узлах, 900г.

Результаты верификации методики на стенде «Этажерка»

Разработаны и исследованы адаптируемые пластинчато-стержневые динамические КЭ-модели стенда в конфигурациях, для которой выполнены измерения ускорений и математически восстановлены собственные частоты и формы колебаний методом "стоячих волн" (табл.3,4): расположение 6-и акселерометров и 5-и регистраторов (как дополнительных сосредоточенных масс и массовых моментов, две расстановки датчиков); условия закрепления 12-и стоек (защемление и шарнирное); "идеальный" и два "дефектных" варианта – удаление угловой и средней стоек нижнего этажа.

Основные результаты выполненных верификационных исследований (табл.3,4):

– наилучшее соответствие данным измерений получено для модели шарнирного опирания стоек (расхождение не более 6%);

– последовательность расчетных и измеренных (6 низших общесистемных) собственных форм колебаний идентична для рассмотренных КЭ-моделей;

– расположение масс для двух расстановок акселерометров и регистраторов показывает отличие по расчетным собственным частотам до 6%, что должно быть учтено при планировании дальнейших измерений и математической обработке их результатов;

– внесенные "сильные" дефекты – удаление средней и угловой стоек – проявляются в нижних расчетных и измеренных общесистемных собственных частотах (падение на прогнозируемую величину, пропорциональную квадратному корню от измененной жесткости) и, в особенности, в дополнительных расчетных собственных формах (табл.3,4, 44-я и 46-я, выделены красным фоном), приуроченных к локальным вертикальным колебаниям части этажерки над удаленной стойкой. Указанные собственные формы могут быть уверенно определены и методом "стоячих волн".

Таблица 3

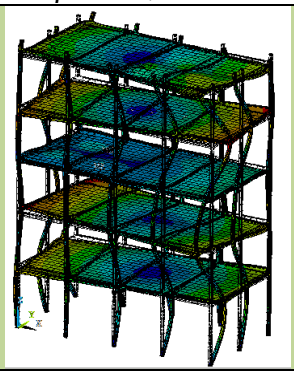
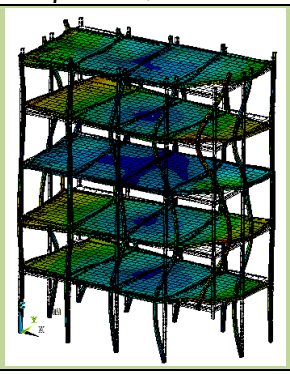
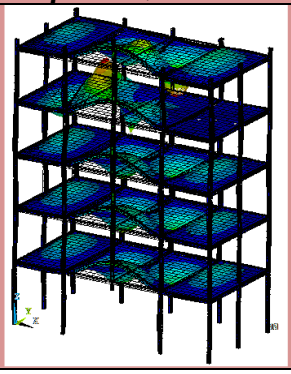
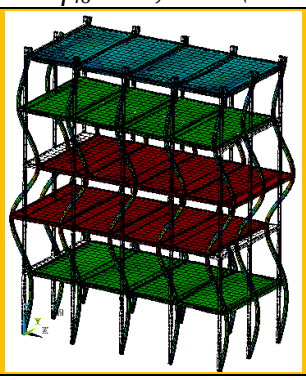
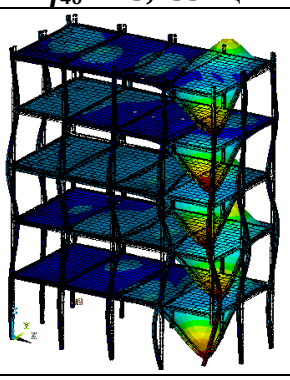
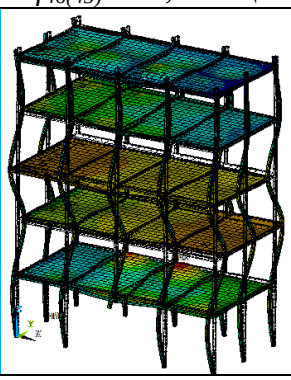
Стенд «Этажерка». Расчетные и экспериментальные собственные частоты колебаний, Гц

№	Расчет МКЭ			Эксперимент (метод стоячих волн)		
	1*-2*. *Без дефектов*	1*. *Без угл. стойки*	1*. *Без сред. стойки*	*Без дефектов*	*Без угл. стойки*	*Без сред. стойки*
1	*4.5957 - 4.7322*	*4.3854*	*4.5075*	4.639	4.517	4.578
2	*4.9385 - 5.0741*	*4.7748*	*4.7785*	5.188	5.066	5.066
3	*6.5380 - 6.6476*	*6.2869*	*6.4808*	6.897	6.714	6.714
4	*17.378 - 16.685*	*16.833*	*17.195*	15.62	15.26	15.44
5	*18.755 - 17.996*	*18.372*	*18.553*	17.27	17.03	17.09
6	*24.733 - 24.102*	*24.298*	*24.663*	20.14	20.02	19.84
.....						
43	69.461	69.461	69.088			
44	71.381	70.941	***70.299***			
45	73.155	72.844	71.358			
46	74.561	***73.755***	73.006			
...	...	...	...			
50	84.908	84.397	84.078			

1* – акселерометры и регистраторы установлены на предпоследнем «этаже» по средней линии, 2** – на первом «этаже» по средней линии.

Таблица 4

Стенд «Этажерка». Локальные расчетные формы собственных колебаний (красный фон), идентифицирующие внесенные дефекты

№	Без дефектов	Удалена угловая стойка	Удалена средняя стойка
44	f_{44} = 71,381Гц	f_{44} = 70,941Гц	**f_{44} = 70,299Гц**
			
46	f_{46} = 74,561Гц	**f_{46} = 73,755Гц**	$f_{46(45)}$ = 73,006Гц
			

В <u>пятой главе</u> приведены результаты апробации разработанной методики мониторинга на высотном комплексе «Дирижабль» (г. Москва), возведенном с выявленными отступлениями от проекта.

В длительном процессе строительства «высотки», который проходил (с перерывом в два года) 6 лет, альтернативными обследованиями выявлены значимые отступления от проекта в «локализованных» зонах: по классу бетона ряда стен, колонн и перекрытий (до В15 вместо проектных В25) и по геометрии стен и колонн (отклонения-эксцентриситет до 135 мм, рис.2). По результатам обследований выполнены усиления стен и колонн на 4-м – 17-м этажах (общее количество усиленных элементов 75).

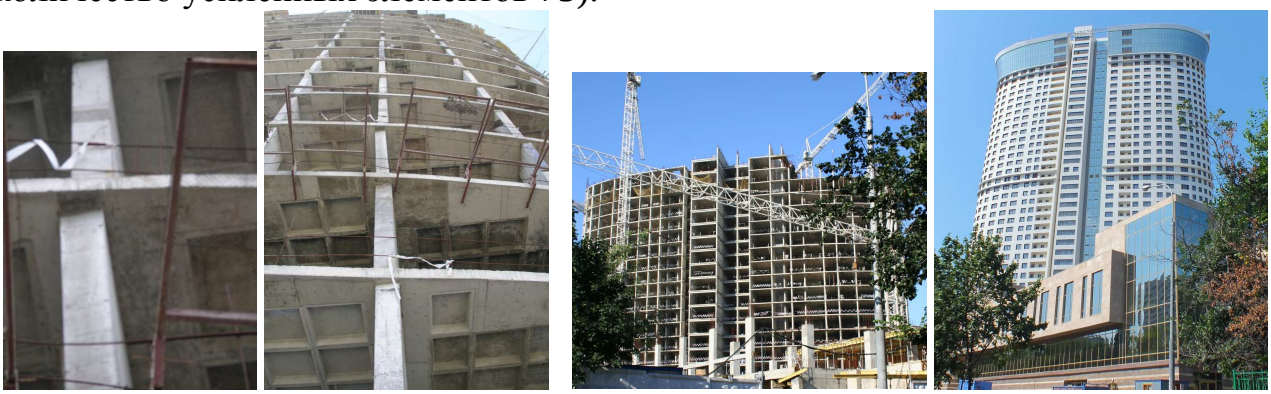


Рис.2. Высотный комплекс «Дирижабль». Отклонения от проекта, этапы строительства

На стадии проектирования построены, верифицированы и проанализированы альтернативные «идеальные» пространственные КЭ-модели

«неоднородное винклеровское основание – оболочечно-стержневой каркас» здания в программных комплексах *ANSYS*, *СТАДИО* и *MicroFe*, показавшие близкие распределения напряженно-деформированного состояния (НДС) и динамических характеристик (расхождение по 5-и низшим собственным частотам не более 5%) и обеспечение всех нормативно-регламентированных критериев несущей способности.

Разработанные модели адекватно отражают геометрико-жесткостные и инерционные свойства и нагрузочные характеристики строительных конструкций и основания высотного здания. При этом сетка КЭ на нижней плите фундамента не только обладает необходимой подробностью для воспроизведения перемещений, сил и моментов, но и приурочена к зонам свайных полей. Коэффициенты неоднородного винклеровского основания получены на нелинейной модели проф. Ю.К. Зарецкого для трехмерной системы «коробчатый фундамент – свайно-грунтовый массив» (ПК *Земля*, д.т.н. В.В. Орехов).

Сопоставление результатов для схем «одномоментного» (линейная задача) и поэтапного возведения (7 этапов, верифицированная опция «жизни-смерти» КЭ в ПК *ANSYS*) здания свидетельствует о слабом проявлении эффектов генетической нелинейности – расхождение по значимым перемещениям и усилиям составляет не более 2%.

Для стадии завершения строительства несущих конструкций разработаны и исследованы параметризованные КЭ-модели в ПК *ANSYS* с фактическим распределением физико-механических свойств бетона, эксцентриситетом и отклонением колонн, а также с учетом прогнозируемых и/или гипотетических ослаблений сечения колонн, стен и перекрытий. Снижение класса бетона ряда стен и колонн от проектного учитывается соответствующим понижением модуля упругости, а отклонение геометрического положения колонн – «жесткими вставками», что позволяет учесть как смещение элементов в плане, так и их наклон.

Установлена как близость вычисленных (блочный Ланцош) и измеренных (метод «стоячих волн») собственных частот и форм колебаний в достаточно широком диапазоне частот, так и «пропуск» ряда частот и форм при планировании измерений без опоры на результаты предварительно выполненного конечноэлементного моделирования (рис.3). В диапазоне собственных частот от 0 до 14 Гц (200 низших форм колебаний) указанные зафиксированные «локальные» отступления от проекта количественно не проявляются – частоты отличаются не более чем на 0,5%, сохраняется последовательность форм колебаний. Также не идентифицированы весьма существенные гипотетические ослабления сечения одиночной колонны (до 1/3 сечения).

В то же время, учет эксцентриситета и наклона колонн показал существенное возрастание расчетных статических изгибающих моментов в них, что подтверждает неуниверсальность динамического (как и всех иных видов) и необходимость синтеза различных видов мониторинга для уникальных объектов строительства.

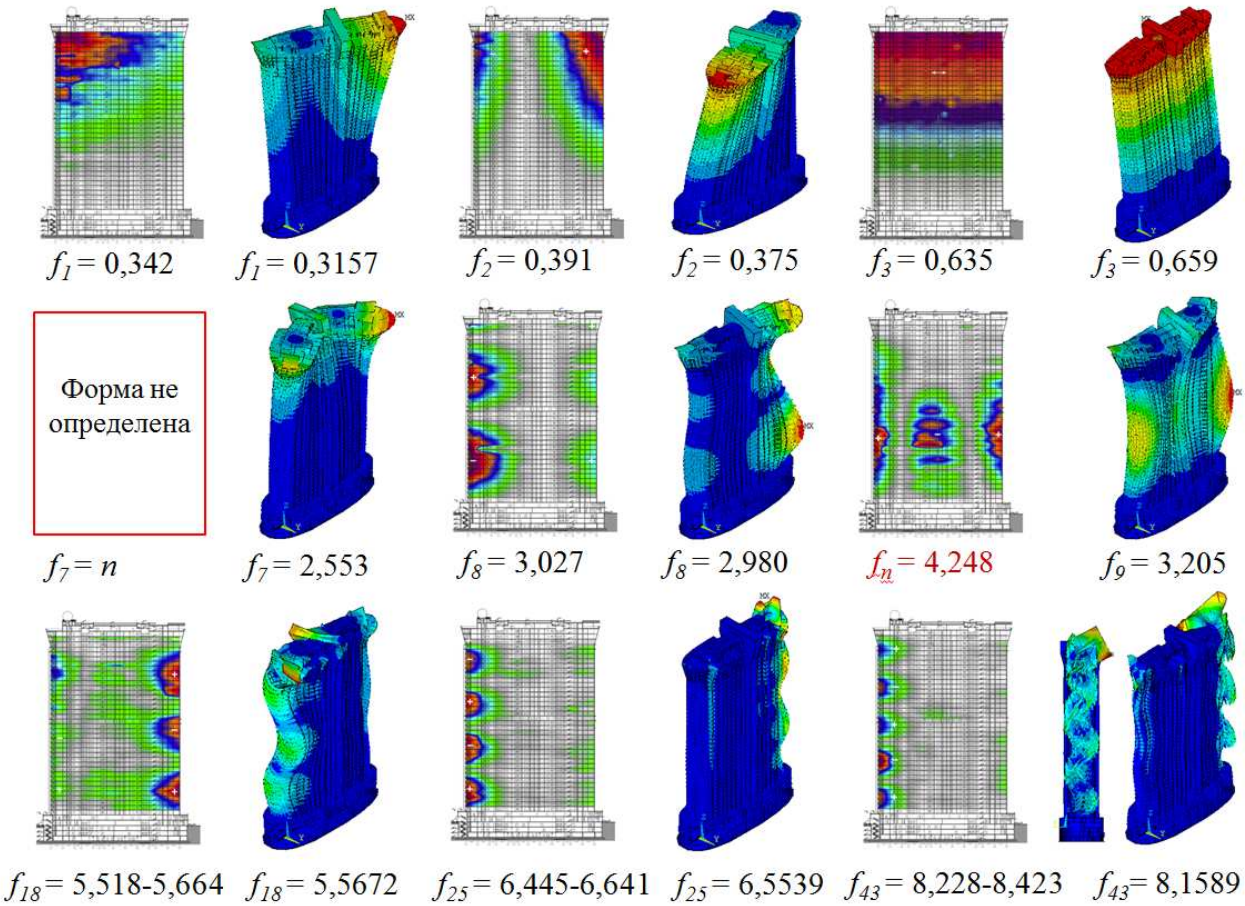


Рис.3. Измеренные (левые колонки) и вычисленные (правые) собственные частоты (Гц) и формы колебаний высотного здания

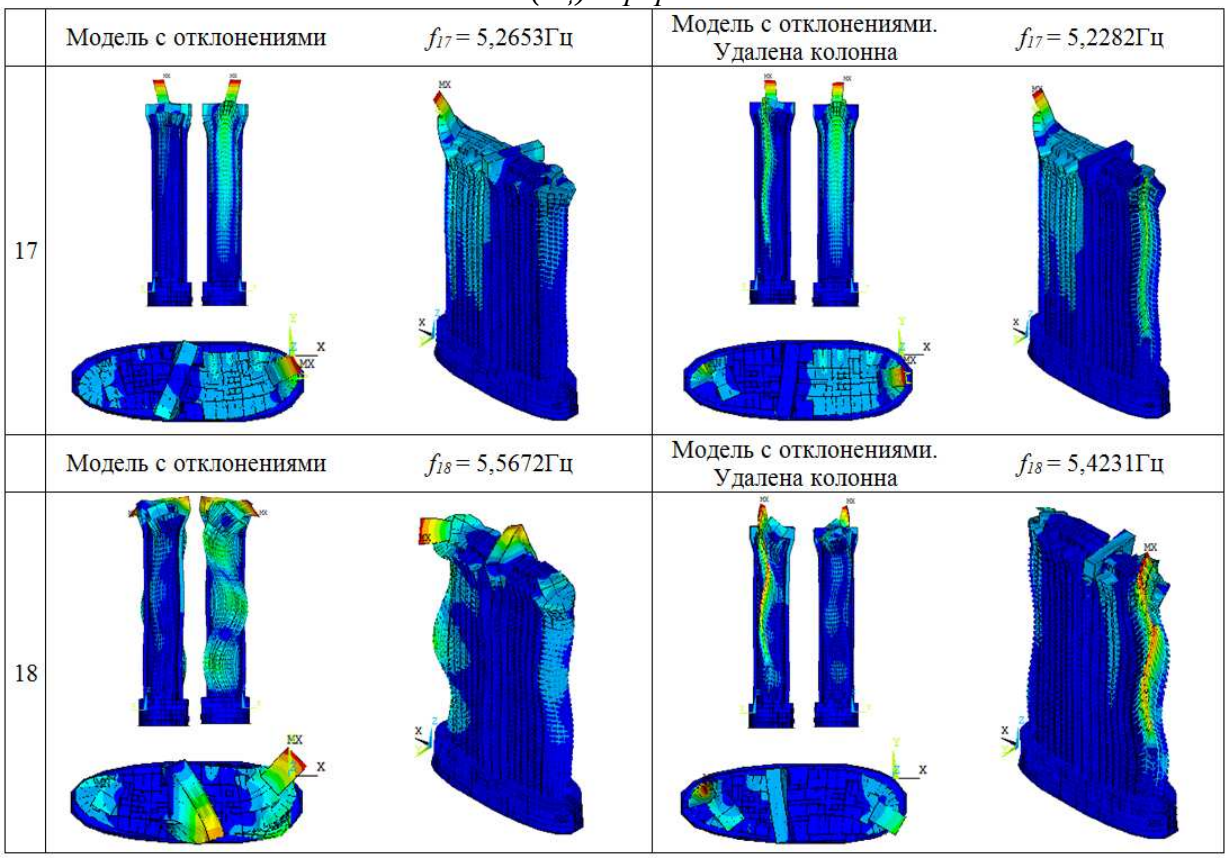


Рис.4. Собственные частоты и формы КЭ-моделей «фактической» и «гипотетической» (с удаленной колонной на 10-м этаже), значимые для идентификации дефекта.

Выполненные численные эксперименты показали, что гипотетическое «удаление» одной из несущих колонн или стен значимо сказывается на группе видоизменяемых и/или дополнительных локальных форм колебаний, приуроченных к зоне разрушения, и могут быть уверенно идентифицированы в ходе инструментального мониторинга методом «стоячих волн» (см. рис.4 для удаленной колонны 10-го этажа, начиная с 17-й формы на частотах выше 5 Гц).

Отклонения от проектных данных, затрагивающие значительную часть системы и влияющие на ее жесткостные и инерционные свойства (класс бетона, характеристики основания, величина и расположение масс, включение в динамическую работу формально ненесущих конструкций – перегородок, фасадов и др.) также идентифицируются в рамках предложенной методики.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Анализ действующей российской нормативно-методической базы показал, что основные положения по динамическому мониторингу нуждаются в конкретизации и развитии для уникальных (в том числе, высотных) зданий на базе расчетно-экспериментальных исследований и разработок.

2. Предложена и теоретически обоснована численная методика, основанная на параметризуемой и адаптируемой (по результатам измерений спектра собственных частот и форм колебаний объекта) большеразмерной динамической конечноэлементной модели, позволяющая оценить состояние несущих конструкций высотных зданий с учетом дефектов и отступлений от проекта (класс бетона, геометрические отклонения, ослабления контактов колонн и стен с перекрытиями и др.) на значимых стадиях строительства и эксплуатации.

3. В качестве инструментального метода динамического мониторинга выбран и показал эффективность метод «стоячих волн» в варианте, разработанном д.т.н. Емановым А.Ф. (СО РАН), до недавнего времени использовавшийся для определения динамических характеристик гидротехнических и иных сооружений.

4. Численная методика реализована в специализированном исследовательском программном комплексе (СИПК) «*ANSYS-Мониторинг*», разработанном на базе универсального верифицированного комплекса *ANSYS Mechanical*, и содержащем параметризованные пространственные динамические КЭ-модели двух экспериментальных стендов МГСУ – «Этажерка» и «Конструктор».

5. Разработанная расчетно-экспериментальная методика верифицирована на упомянутых стендовых моделях МГСУ (в «идеальном» и намеренно дефектных исполнениях) и показала возможность оценки фактического состояния и обнаружения значимых дефектов. Полученные результаты позволяют также более «тонко» настроить стендовые (в частности, минимизировать факторы неопределенности) и КЭ-модели для дальнейших исследований не только динамических характеристик, но и параметров напряженно-деформированного состояния.

6. Выполнена апробация разработанной методики на возведенном высотном здании – МФЖК «Дирижабль» с выявленными (по результатам альтернативных обследований) отступлениями от проекта, показавшая как близость вычисленных и измеренных частот и форм в широком диапазоне частот, так и «пропуск» ряда частот и форм при планировании измерений без учета результатов КЭ-моделирования.

7. Показано истинное «место» – возможности и ограничения – разработанной методики динамического мониторинга и количественно подтверждена необходимость синтеза различных видов мониторинга несущих конструкций для высотных зданий. Так, фактические «локализованные» отступления от проекта (класс бетона, эксцентриситет, наклон и ослабление сечения колонн и стен), слабо влияющие на жесткостные характеристики системы, значимо не проявляются в спектре собственных частот и форм. В то же время, полное разрушение одной из колонн, стены или фрагмента кессонного перекрытия, равно как и общесистемные отклонения от проектных данных (класс бетона, характеристики основания, изменения величины и расположения масс и др.) могут быть оперативно и уверенно идентифицированы в ходе инструментального мониторинга.

8. На основании выполненных исследований рекомендуется внедрить предложенную комплексную расчетно-экспериментальную методику для мониторинга несущих конструкций высотных зданий на стадиях их строительства и эксплуатации. При этом требуют дальнейшего обоснования и развития как методика измерений, так и численные процедуры адаптации-калибровки КЭ-моделей (наиболее перспективным представляется решение некорректных обратных задач идентификации с регуляризацией по Тихонову).

Основные положения и результаты диссертационной работы отражены в следующих публикациях:

В периодических изданиях, включенных в перечень рекомендованных ВАК:

1. Белостоцкий А.М., Дубинский С.И., Каличава Д.К., Пеньковой С.Б., Потапенко А.Л., Клепец О.Ю. Комплексное расчетное обоснование напряженно-деформированного состояния высотных многофункциональных комплексов. Строительная механика и расчет сооружений, №10, 2006, с.111-115

2. Белостоцкий А.М., Орехов В.В., Каличава Д.К. Substructure modeling of “soil base - structure” behavior of multifunctional building // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering, Volume 4, Issue 2, 2008, pp. 23-25

3. Белостоцкий А.М., Каличава Д.К. Математическое моделирование как основа мониторинга зданий и сооружений // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering, Volume 6, Issue 1&2, 2010, стр. 78-80;

4. Белостоцкий А.М. Каличава Д.К. Адаптируемые конечноэлементные модели в основе динамического мониторинга несущих конструкций высотных зданий. Часть 1. Основы разработанной расчетно-экспериментальной методики // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. Volume 8, Issue 4. 2012, pp.20-29

5. Белостоцкий А.М., Каличава Д.К., Нагибович А.И., Петряшев Н.О., Петряшев С.О. Адаптируемые конечноэлементные модели в основе динамического мониторинга несущих конструкций высотных зданий. Часть 2. Верификация методики на стендовых моделях // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. Volume 8, Issue 4. 2012, pp.29-44.

6. Белостоцкий А.М., Каличава Д.К., Аул А.А., Нагибович А.И. Адаптируемые конечноэлементные модели в основе динамического мониторинга несущих конструкций высотных зданий. Часть 3. Апробация методики на высотном комплексе, возведенном с выявленными отступлениями от проекта // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. Volume 8, Issue 4. 2012, pp.44-55.

Публикации в иных изданиях:

7. Белостоцкий А.М., Сидоров В.Н., Каличава Д.К. Сравнительный анализ программных комплексов СТАДИО и ROBOT на задачах расчета зданий и сооружений. Труды XX международной конференции «BEM&FEM-2003», С-Петербург, 2003, стр.82-88.

8. Белостоцкий А.М., Сидоров В.Н., Каличава Д.К. Сравнительный анализ программных комплексов СТАДИО и ROBOT на задачах расчета многоэтажных зданий. САПР и графика. 2004. №2, стр.66-75.

9. Белостоцкий А.М., Орехов В.В., Каличава Д.К., Пеньковой С.Б., Дубинский С.И. Расчетное обоснование НДС высотных многофункциональных комплексов. ANSYS Solutions. Русская редакция, М., №4, 2007, стр. 13-18.

10. Белостоцкий А.М., Орехов В.В., Каличава Д.К., Пеньковой С.Б., Дубинский С.И., Клепец О.Ю. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния высотных многофункциональных комплексов. Сб. научн. трудов МГСУ «Вопросы прикладной математики и вычислительной механики», М., 2007, стр. 89-96.

11. Лебедев В.Л., Семенов В.А., Семенов П.Ю., Каличава Д.К. К определению динамических характеристик высотных зданий. Сб.статей «Пространственные конструкции», выпуск №10, М., 2007, стр.39-43.

12. Белостоцкий А.М., Орехов В.В., Каличава Д.К., Пеньковой С.Б., Дубинский С.И., Аул А.А, Козырев О.А. Суперэлементное моделирование НДС системы "грунтовое основание - здание" высотных многофункциональных комплексов. Сборник трудов первой международной научно-практической конференции «Теория и практика расчета зданий, сооружений и элементов конструкций. Аналитические и численные методы», МГСУ, М. 2008 г., стр. 233-244.

13. Белостоцкий А.М., Каличава Д.К. Математическое моделирование как основа и в составе системы мониторинга несущих конструкций зданий и сооружений. Труды III международного симпозиума «Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений», Новочеркасск, 2010.

14. Белостоцкий А.М., Каличава Д.К. Математическое моделирование в основе инструментального мониторинга несущих конструкций высотных зданий. Основные подходы и результаты. Сб. научн. трудов МГСУ «Вопросы прикладной математики и вычислительной механики», М., 2010, стр. 112-119.

15. Белостоцкий А.М., Каличава Д.К. Математическое моделирование как основа и в составе системы мониторинга несущих конструкций зданий и сооружений. Труды конгресса «Строительная наука, техника и технологии: перспективы и пути развития». М.: МГСУ, 2010, стр. 300-304.

16. Белостоцкий А.М., Каличава Д.К. Адаптивные конечноэлементные модели в системе мониторинга зданий и сооружений. Труды XXIV международной конференции «BEM&FEM-2011», С-Петербург, 2011, стр.109-111.

17. Белостоцкий А.М., Каличава Д.К. Математические модели в основе инструментального мониторинга несущих конструкций высотных зданий-комплексов. Труды IV международного симпозиума «Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений», Челябинск, 2012.