

УДК 539.3:539.382.4

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТРЕЩИН В РОСТВЕРКАХ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ 25-ЭТАЖНОГО ЖИЛОГО ЗДАНИЯ

© 2014 М.Л. Бартоломей, А.А. Каменских

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Поступила в редакцию 18.11.2014

Исследовано напряженно-деформированное состояние 25-этажного жилого здания без учета и с учетом трещин в ростверках. Разработана численная модель конструкции, позволяющая определить уровень осадок в ростверках. Сделана математическая постановка задачи о деформировании здания с учетом грунтового основания и реализовано численное исследование влияния трещин в ростверках на осадки здания. Произведен сравнительный анализ напряженно-деформированного состояния конструкции.

Ключевые слова: *метод конечных элементов, трещина, осадка, дефект, фундамент*

В настоящее время огромное количество исследований в области строительства зданий и сооружений посвящено мониторингу состояния несущих конструкций. В [1-4] рассматриваются разные системы мониторинга строительных конструкций. В основе [1] автоматической системы мониторинга лежит метод акустической эмиссии, позволяющий оценивать влияние циклических нагрузок на конструкцию, отслеживать предельные состояния и степень разрушения. Вибродинамический метод неразрушающего контроля строительных конструкций, рассмотренный в [2], позволяет эффективно определить зону зарождения и развития дефектов. В [3] производится оценка работы динамического мониторинга, при этом в [4] рассказывается о проблеме обработки результатов динамического мониторинга. Ряд работ посвящен дистанционному мониторингу строительных конструкций при помощи датчиков [5, 6 и т.д.] и видеонаблюдения [5, 2 и т.д.]. При рассмотрении проблемы мониторинга строительных конструкций не малую роль отводят осадкам фундамента и возникающих в них дефектам [7, 8 и т.д.]. Существенное значение в развитии мониторинга строительных конструкций имеет разработка материала по исследованию технического состояния строений при возникновении в них дефектов с помощью математического моделирования.

*Бартоломей Мария Леонидовна, кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительной математики и механики. E-mail: mbartolomey@mail.ru*  
*Каменских Анна Александровна, кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительной математики и механики. E-mail: anna\_kamenskih@mail.ru*

В нашей работе рассмотрено моделирование несущей способности и работоспособности фундамента и основания 25-этажного жилого дома со встроено-пристроенными помещениями общественного назначения, в котором установлены дефекты и повреждения:

- трещины на горизонтальной (верхней) поверхности ростверков с распространением на боковые грани (вертикальные трещины по боковым граням), раскрытия трещин до 1,0 мм.
- направленные трещины на верхней поверхности ростверков без распространения на боковые грани, величина раскрытия до 2,0 мм.

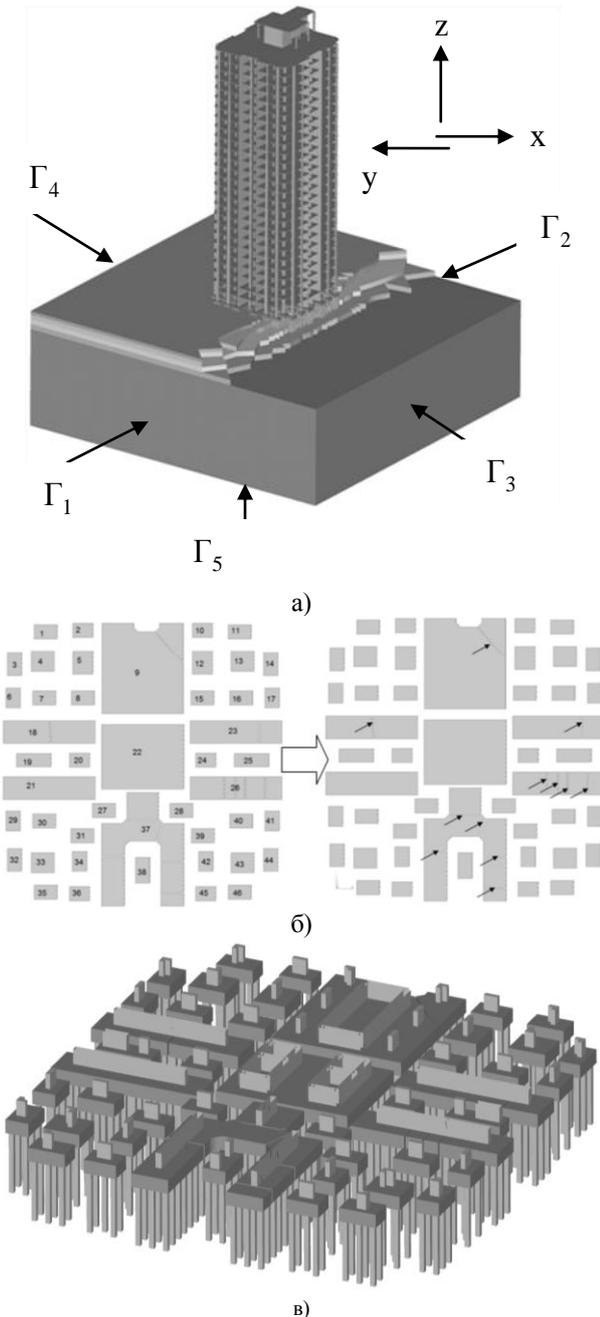
На рис. 1 показан общий вид расчетной схемы 25-этажного здания, а также схема расположения ростверков, места расположения трещин и схема сопряжения ростверков с несущими конструкциями здания.

В расчетной схеме учитывается собственный вес конструкции, равномерно распределенная нагрузка на плиты перекрытий и снеговая нагрузка, действующая на ее крышу. Также для всех стержней, в местах стыковки с пластинками, все перемещения и углы поворотов одинаковы, в силу того, что конструкция работает совместно.

Математическая постановка задачи определяется следующими уравнениями, записанными в матричной форме для любой точки срединной поверхности пластинок (перекрытий) [9] и стержневых элементов (колонн) конструкции:

### 1. Уравнения равновесия

$$B_2^p m^p + q^p = p^p, \quad B_2^s m^s + q^s = 0 \quad (1)$$



**Рис. 1.** Модель здания: а) общий вид; б) схема расположения ростверков и места задания сквозных трещин; в) сопряжение ростверков с несущими элементами здания

где  $\mathbf{m}^p = \{T_x T_y T_{xy} M_x M_y M_{xy}\}$  и  $\mathbf{m}^s = \{N Q_2 Q_3 M M_2 M_3\}$  – векторы усилий,  $\mathbf{m}^p$  включает продольные и касательную силы и изгибающие и скручивающий моменты в пластинке и  $\mathbf{m}^s$  включает продольную и поперечные силы и крутящий и моменты в стержне,  $q^p$  и  $q^s$  векторы массовых сил,  $p^p$  вектор поверхностных сил, действующих на плиты перекрытий и крышу,  $B_2^p$  и  $B_2^s$  – матрицы операций дифференцирования

$$B_2^p = \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\partial^2}{\partial x^2} & \frac{\partial^2}{\partial y^2} & -2\frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \end{pmatrix}$$

$$B_2^s = \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial \xi_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial \xi_1} & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial \xi_1} & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial \xi_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial \xi_1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial \xi_1} \end{pmatrix}$$

## 2. Физические соотношения

$$\mathbf{m}^p = D^p \boldsymbol{\varepsilon}^p, \quad \mathbf{m}^s = D^s \boldsymbol{\varepsilon}^s \quad (2)$$

где  $\boldsymbol{\varepsilon}^p = \{\varepsilon_x \varepsilon_y \gamma_{xy} \chi_x \chi_y \chi_{xy}\}$  и  $\boldsymbol{\varepsilon}^s = \{\varepsilon_1 \varphi_2 \varphi_3 \chi \chi_2 \chi_3\}$  – векторы деформаций срединной поверхности пластинки и стержня,  $D^p$  и  $D^s$  – матрицы упругих констант,  $E, \nu$  – модуль упругости и коэффициент Пуассона соответственно,  $h$  – толщина пластины,  $A$  – площадь поперечного сечения стержня,  $GJ$  – жесткость стержня при кручении,  $I_2$  и  $I_3$  – главные моменты инерции поперечного сечения стержня относительно осей  $\xi_2$  и  $\xi_3$  соответственно.

$$D^p = \begin{pmatrix} \bar{E} & \nu \bar{E} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \nu \bar{E} & \bar{E} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \bar{G} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\bar{E}h^2}{12} & \frac{\nu \bar{E}h^2}{12} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\nu \bar{E}h^2}{12} & \frac{\bar{E}h^2}{12} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\bar{G}h^2}{12} \end{pmatrix},$$

$$D^s = \begin{pmatrix} EA & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & GJ & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & EI_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & EI_3 \end{pmatrix};$$

где  $\bar{E} = \frac{Eh}{1-\nu^2}$ ,  $\bar{G} = \frac{Eh}{(1+\nu)}$ ,

### 3. Геометрические соотношения

$$\boldsymbol{\varepsilon}^p = \mathbf{B}_1^p \mathbf{U}^p, \quad \boldsymbol{\varepsilon}^s = \mathbf{B}_1^s \mathbf{U}^s \quad (3)$$

где  $\mathbf{U}^p = \{U_x, U_y, U_z\}$  и  $\mathbf{U}^s = \{u_1, u_2, u_3, \varphi_1\}$  – векторы перемещений,  $\mathbf{B}_1^p$  и  $\mathbf{B}_1^s$  – матрицы операций дифференцирования.

$$\mathbf{B}_1^p = \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{\partial^2}{\partial x^2} \\ 0 & 0 & -\frac{\partial^2}{\partial y^2} \\ 0 & 0 & -\frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{B}_1^s = \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial \xi_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial \xi_1} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial \xi_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial \xi_1} \\ 0 & 0 & -\frac{\partial^2}{\partial \xi_1^2} & 0 \\ 0 & -\frac{\partial^2}{\partial \xi_1^2} & 0 & 0 \end{pmatrix};$$

### 4. Граничные условия

Все граничные боковые поверхности пластинок являются свободными от нагрузки:

$$\begin{aligned} Q_{xx}|_{x,y,z} &= Q_{xy}|_{x,y,z} = Q_{xz}|_{x,y,z} = \\ &= M_{xx}|_{x,y,z} = 0, (x, y, z) \in L_1, \\ Q_{yy}|_{x,y,z} &= Q_{yx}|_{x,y,z} = Q_{yz}|_{x,y,z} = M_{yy}|_{x,y,z} = \\ &= 0, (x, y, z) \in L_2, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $L_1$  и  $L_2$  – границы пластинки параллельные координатным осям  $y$  и  $x$  соответственно,  $Q_{xx}, Q_{xy}, Q_{xz}, M_{xx}, Q_{yy}, Q_{yx}, Q_{yz}, M_{yy}$  – усилия и моменты, действующие на соответствующих границах.

Считается, что грунт работает в рамках теории упругости. Таким образом, математическая постановка, описывающая поведения грунтового основания строительной конструкции, включает:

- уравнения равновесия

$$\operatorname{div} \hat{\sigma} = 0, \quad \bar{x} \in V \quad (5)$$

- геометрические соотношения

$$\hat{\varepsilon} = \frac{1}{2} (\nabla \bar{u} + (\nabla \bar{u})^T), \quad \bar{x} \in V \quad (6)$$

- физические соотношения

$$\hat{\sigma} = \lambda I_1(\hat{\varepsilon}) \hat{I} + 2\mu \hat{\varepsilon}, \quad \bar{x} \in V \quad (7)$$

где  $\lambda$  и  $\mu$  – параметры Ламе,  $\hat{\sigma}$  – тензор напряжений,  $\hat{\varepsilon}$  – тензор деформаций,  $\bar{u}$  – вектор перемещений,  $\bar{x}$  – радиус-вектор произвольной точки,  $I_1(\hat{\varepsilon})$  – первый инвариант тензора деформаций,  $\hat{I}$  – единичный тензор,  $V$  – область, занятая грунтом.

При геологических изысканиях установлено, что грунтовое основание строительной конструкции состоит из 4-х разных видов грунта: суглинок тяжелый, пылеватый, мягкопластичный; суглинок тяжелый, пылеватый, полутвердый; гравийный грунт с суглинистым и песчаным заполнителем; песчаник сильновыветренный с прослоями аргиллита сильновыветренного. Кинематические граничные условия для грунта:

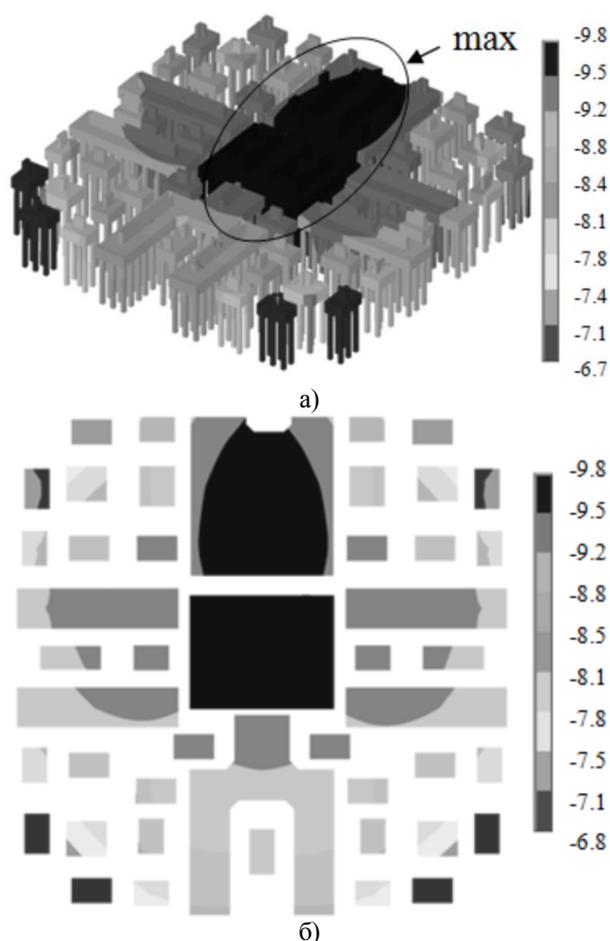
$$\bar{u}|_{x,y,z \in \Gamma_5} = 0, \quad u_y|_{x,y,z \in \Gamma_1 \cup \Gamma_2} = 0, \quad u_x|_{x,y,z \in \Gamma_3 \cup \Gamma_4} = 0. \quad (8)$$

Обобщенное решение краевой задачи (1)-(8) осуществлялось численно методом конечных элементов в рамках программного комплекса ANSYS. Для дискретизации исследуемого объекта были выбраны оболочечные конечные элементы типа SHELL63 для плит межэтажных перекрытий и балочные конечные элементы типа BEAM188 для колонн, для грунта выбран объемный элемент типа SOLID45.

В рамках исследования были произведены расчеты 25-этажного жилого здания без учета и с учетом трещин в ростверках и сделано сравнение результатов. Вертикальные  $u_z$  и горизонтальные  $u_x$  перемещения с учетом сквозных трещин в ростверках и без не имеют значительных

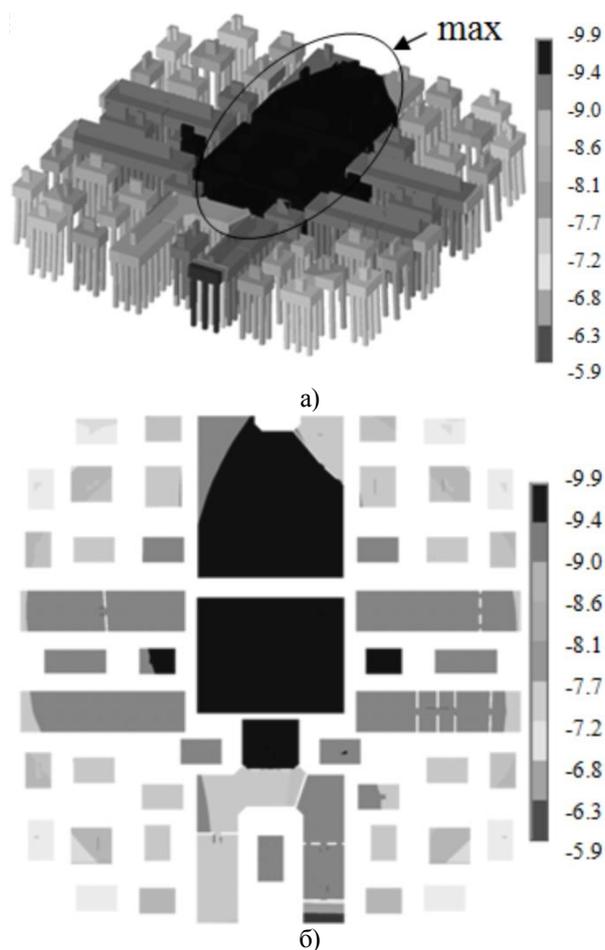
отличий, при этом их максимальные значения совпадают  $u_{z_{max}} = 10,7$  см и  $u_{x_{max}} = 1$  мм максимальные вертикальные перемещения и горизонтальные перемещения верха здания равны соответственно. Горизонтальные перемещения верха здания  $u_y$  при учете сквозных трещин в ростверках равны 1,3 см, без учета трещин – 2,0 см. Деформация основания здания не превышает 3% при учете трещин.

При исследовании наибольший интерес представляют осадки ростверков без учета (рис. 2) и с учетом (рис. 3) трещин, на рисунках осадки показаны в сантиметрах.



**Рис. 2.** Осадка ростверков без учета трещин: а) сопряжение ростверков с несущими элементами здания; б) схема расположения ростверков

Анализируя результаты осадок ростверков без учета (рис. 2.) и с учетом (рис. 3.) трещин, можно сделать следующие выводы. Максимальные осадки отличаются мало и равны -9,8 см и -9,9 см для моделей без учета трещин и с учетом трещин в ростверках соответственно. При этом зона максимальных осадок в модели без учета трещин достаточно симметрична и принадлежит 9 и 22 ростверкам. В случае модели учитывающей трещины, симметричность теряется и распространяется на 20, 24 и часть 37 ростверка.



**Рис. 3.** Осадка ростверков с учетом трещин: а) сопряжение ростверков с несущими элементами здания; б) схема расположения ростверков

При общей зоне увеличения площади максимальных осадок значительного количественного увеличения не происходит. Максимальные осадки фундамента составили 10 см, согласно приложению Д СП 22.13330.2011 [10] предельные осадки фундамента для зданий монолитных конструкций не должны превышать 15 см. Максимальный крен здания составил 0,00027, согласно приложению Д СП 22.13330.2011 [10] предельное значение крена для жестких сооружений высотой до 100м не должно превышать 0,004.

**Выводы:** по результатам исследования 25-этажного жилого здания можно сделать вывод о незначительном влиянии трещин в ростверках на напряженно деформированное состояние конструкции. Результаты исследования могут быть использованы в системах мониторинга технического состояния зданий и сооружений.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ проект № 14-08-31333 мол.а.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Сысоев, О.Е. Автоматизированная система мониторинга предельных состояний конструкций зданий и сооружений // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2013. № 3(15). С. 107-112.

2. *Кадомицев, М.И.* Вибродиагностика строительных конструкций / *М.И. Кадомицев, А.А. Ляпин, Ю.Ю. Шатилов* // Инженерный вестник Дона. 2012. № 3(21). С. 576-579.
3. *Савин, С.Н.* Динамический мониторинг строительных конструкций на примере пандуса киноконцертного зала «Пушкинский» // Инженерно-строительный журнал. 2012. № 7. С. 58-62.
4. *Завалишин, С.И.* Математические проблемы восстановления векторов перемещений по данным динамических обследований / *С.И. Завалишин, М.С. Хлыстунов, Ж.Т. Могилук* // Известия вузов. Строительство. 2013. № 7. С. 72-76.
5. *Кобелев, Н.С.* Дистанционный мониторинг состояния несущих конструкций покрытий зданий и сооружений в виде железобетонных куполов / *Н.С. Кобелев, Л.Ю. Ступишин, А.В. Масалов* // Известия ЮЗГУ. Серия Техника и технологии. 2011. № 1. С. 32-35.
6. *Мищенко, В.Я.* Мониторинг дефектов и учета старения строительных конструкций жилого фонда / *В.Я. Мищенко, Д.А. Драпалюк, Е.А. Солнцев* // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. 2009. № 4. С. 118-123.
7. *Воробьев, А.В.* Адаптивные модели краткосрочного прогноза оседания земной поверхности и определение наиболее неблагоприятного положения здания в мульде сдвижения / *А.В. Воробьев, Г.Г. Кашеварова* // Инженерно-строительный журнал. 2013. № 9. С. 10-18.
8. *Бартоломей, М.Л.* Конечно-элементное моделирование процесса формирования зон растрескивания в трехслойной пластине / *М.Л. Бартоломей, Н.А. Труфанов, И.Н. Шардаков* // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2011. Т. 13. № 4(4). С. 1061-1068.
9. *Розин, Л.А.* Вариационные постановки задач для упругих систем. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1978. 224 с.
10. СП 22.13330.2011. Основания зданий и сооружений.

## THE ANALYSIS OF CRACKS IN GRILLAGES INFLUENCE ON STRESS-STRAIN STATE AT 25-STOYED RESIDENTIAL BUILDING

© 2014 M.L. Bartolomey, A.A. Kamenskikh

Perm National Research Polytechnical University

Stress-strain state of 25-storeyed residential building without account and taking into account cracks in grillages is investigated. The numerical model of design allowing to determine settling level deposit in grillages is developed. The mathematical problem definition about deformation of the building taking into account the soil basis is made and numerical research of influence of cracks in grillages on building settling is realized. The comparative analysis of stress-strain state of construction is made.

Key words: *finite element method, crack, settling, defect, base*

---

*Maria Bartolomey, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Computation Mathematics and Mechanics Department. E-mail: mbartolomey@mail.ru*  
*Anna Kamenskikh, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Computation Mathematics and Mechanics Department. E-mail: anna\_kamenskih@mail.ru*