

Библиографические ссылки

1. Горохов М. М., Корепанов А. В., Тенев В. А. Моделирование пространственных турбулентных течений около поверхностей со сложной геометрией // Вестн. Ижев. гос. техн. ун-та. – 2013. – № 3. – С. 155–160.

2. Горохов М. М. Математическое моделирование обтекания и горения гранул твердого топлива в турбулентных потоках : дис. ... д-ра физ.-мат. наук : 01.02.05. – М., 2005. – 258 с.

3. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости : пер. с англ. под ред. В. Д. Виленского. – М. : Энергоиздат, 1984. – 136 с.

4. Корепанов А. В. Численное моделирование горения твердого гранулированного топлива в турбулентном потоке : дис. ... канд. физ.-мат. наук : 05.13.18. – М., 2004. – 106 с.

* * *

М. М. Gorokhov, DSc (Physics and Mathematics), professor, department of Information systems, Kalashnikov Izhevsk State Technical University
A. V. Korepanov, PhD (Physics and Mathematics), Associate Professor, department of Information systems, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

V. A. Tenenev, DSc (Physics and Mathematics), Professor, department of Mathematics, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

Research of surface geometry and roughness influence on flow structure and parameters

The paper presents the research of roughness influence on flow parameters. The critical value of sphere roughness is determined, which leads to earlier transformation to the turbulent flow as compared to a smooth surface. The influence of the streamline surface geometry on the flow structure is investigated.

Keywords: roughness, turbulence, numerical modeling

Получено: 07.10.13

УДК 51-74+624.04+519.673

В. И. Данилов, заместитель главного инженера – начальник отдела качества;

ФГУП «ГУССТ № 8 при Спецстрое России»

В. Е. Лялин, доктор технических наук, профессор

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

ВЕРИФИКАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СООРУЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПРОВЕДЕНИЯ НАТУРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ДЕФОРМАЦИИ И РАЗРУШЕНИЙ СУЩЕСТВУЮЩЕГО СТРОЕНИЯ С УЧЕТОМ ИЗМЕНЕНИЯ ЛИТОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГРУНТА

Рассмотрена процедура верификации математической модели сооружения на основе проведения натурального эксперимента деформации и разрушений существующего строения с учетом изменения литологического состояния грунта. Анализ результатов позволяет сделать вывод, что появление трещин на фасаде здания действительно было вызвано неравномерной осадкой фундамента, которая, в свою очередь, возникла в результате локального ухудшения свойств грунтового массива.

Ключевые слова: деформация и разрушение строения, моделирование, осадки фундамента

Математическое моделирование с применением численных методов и ЭВМ (численное моделирование) является одним из наиболее эффективных способов (а во многих ситуациях – единственно возможным) установить действительный характер работы конструкций, зданий и сооружений и позволяет путем относительно невысоких затрат детально исследовать работу самых сложных сооружений, находящихся в разнообразных условиях эксплуатации и внешних воздействий [1, 4, 7]. Необходим поиск решений практических задач, выполняемых при проектировании реальных сооружений, что позволит обеспечить безопасность сооружения окружающей застройки в ходе строительно-монтажных работ, существенно сократить материалоемкость и затраты на строительство.

Для обеспечения безаварийной эксплуатации уже существующих зданий и конструкций расчетная схема должна выбираться адекватной реальному

строению, а это возможно лишь при использовании достаточно точных и сложных расчетных моделей с учетом процессов их структурного разрушения и выявления резервов их несущей способности.

Постановка задачи

Жилое пятиэтажное кирпичное здание было построено в 1962 г. По результатам геологических изысканий на период строительства грунтовое основание являлось *однородным* до глубины 12 м. Известны физико-механические характеристики грунтов: удельный вес $\gamma = 18,1\text{--}18,3 \text{ КН/м}^3$; угол внутреннего трения $\varphi = 19\text{--}21^\circ$; удельное сцепление $c = 25\text{--}35 \text{ КПа}$; модуль деформации $E = 6\text{--}8 \text{ МПа}$.

Здание имеет 4 секции общей длиной 60 м, шириной 12 м, высотой 16 м с техническим подпольем (типовой проект серии 1-447С), с продольными несущими стенами. Толщина наружных стен 0,65 м, внутренних – 0,45 м. Материал наружных и внутренних стен – кирпич марки 100 и раствор марки 50.

Перемычки – сборные железобетонные. Фундаменты сборные по железобетонной ленте, глубина заложения фундамента 1,8 м.

Через четыре года на восточном фасаде появилась сквозная трещина осадочного происхождения по всей высоте здания. В результате визуальных и инструментальных наблюдений за домом в течение всего 1965 г. было обнаружено, что стены здания дали относительную неравномерную осадку от 2 до 4 мм. Несущие конструкции здания, несмотря на наличие сквозной трещины, вели себя удовлетворительно, вокруг здания и поблизости от него каких-

либо провалов дневной поверхности обнаружено не было. За поведением дома в 1966 г. было продолжено наблюдение, для чего по периметру здания на уровне цоколя было установлено 12 марок. Результаты наблюдений показали, что осадки дома продолжались и происходили неравномерно (перемещения составляли 4–8 мм), однако видимых разрушений на стенах здания не было. Но в 1998–2000 гг. во всех несущих стенах (а также торцевых) начали образовываться трещины (особенно вблизи лестничных клеток), они показаны на рис. 1.

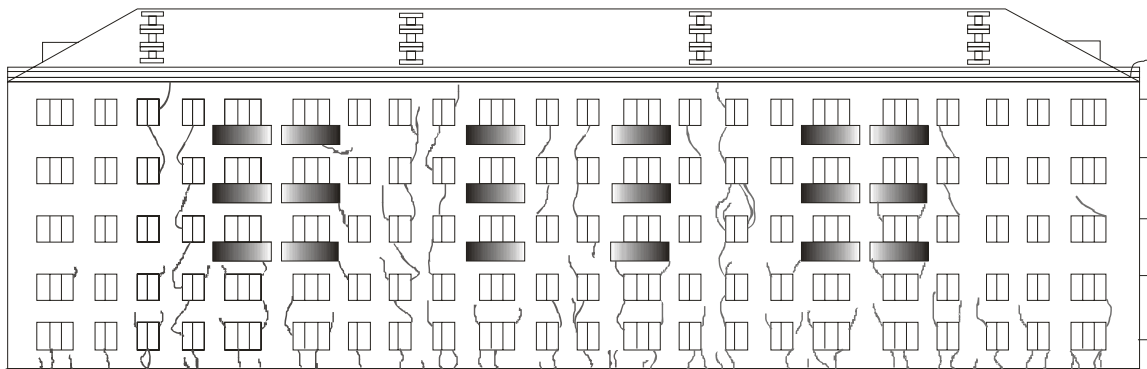


Рис. 1. Распространение трещин по зданию

Измеренные значения осадок $u_z^{(i)}$ по внешней части здания показаны на рис. 2. Максимальные осадки фундамента при этом составили 72 мм. При дальнейшем их возрастании существовала опасность разрушения несущих стен, и было необходимо провести скорейшие мероприятия для предотвращения развития трещин и осадок фундамента.

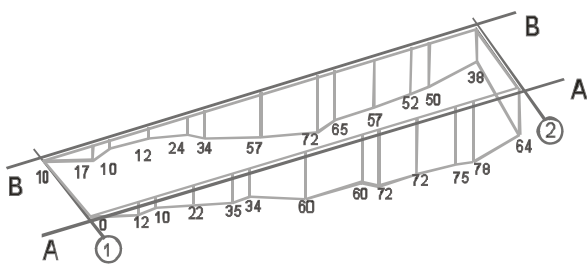


Рис. 2. Фактические осадки фундамента (в мм)

Так как первоначально грунтовое основание было однородным, заключили, что свойства грунта изменились локально, из-за протечки воды в зоне 2-й секции здания. Действительно, геологические изыскания, проведенные в 2000 г., показали изменение свойств грунта под зданием и вблизи здания (замеры проводились в плоскости подошвы фундамента). Образовались три зоны с разными свойствами (рис. 3).

Измененные физико-механические характеристики грунта в локальных зонах А, В и С приведены в таблице.

Теоретические исследования проводились в два этапа:

1-й этап – моделирование системы «грунт – фундамент – строение» (ГФС) и расчет напряженно-

деформированного состояния системы с учетом изменившихся свойств основания (неоднородности грунта).

2-й этап – расчет напряженно-деформированного состояния (НДС) пятиэтажного кирпичного здания и фундамента на действие собственного веса и кинематическое воздействие в виде неравномерной осадки здания в нелинейной постановке с учетом накопления повреждений.

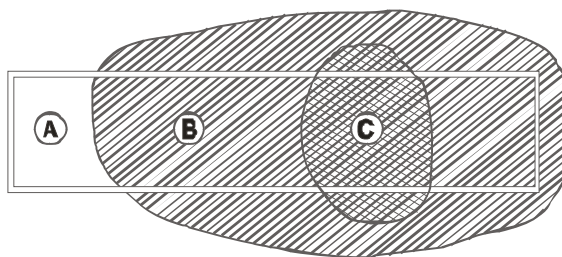


Рис. 3. Зоны изменения свойств грунтового основания

Физико-механические характеристики грунта в локальных зонах

Зона	γ , КН/м ³	φ (°)	c , КПа	E , МПа
А	19,1–19,3	19–21	26–28	8–10
В	18,3–18,6	13–15	14–16	5–6
С	17,1–17,4	11–13	11–13	3–5

Для проведения исследований на 1-м этапе использовалась разработанная базовая математическая модель (1), (2) с линейными определяющими соотношениями (3). Напряженно-деформированное состояние системы можно определить с помощью тен-

зора напряжений $\hat{\sigma}$ с компонентами σ_{ij} и с помощью тензора деформаций $\hat{\varepsilon}$ с компонентами ε_{ij} .

Уравнения равновесия выглядят так:

$$\sigma_{ij,j}(\vec{x}) + \rho(\vec{x})F_i = 0, \quad \vec{x} \in V, \quad (1)$$

где \vec{x} – радиус-вектор пространственного положения частицы; $\rho(\vec{x})$ – плотность материала; ρF_i – компоненты вектора внешних массовых сил.

Геометрические уравнения Коши (деформации будем считать малыми):

$$\varepsilon_{ij}(\vec{x}) = \frac{1}{2}(u_{i,j}(\vec{x}) + u_{j,i}(\vec{x})), \quad \vec{x} \in V, \quad (2)$$

где u_i – компоненты вектора перемещения \vec{u} .

Взаимосвязь напряжений и деформаций (изотропная линейно-упругая кусочно-однородная среда) выглядит таким образом:

$$\sigma_{ij} = \lambda(\vec{x})\theta\delta_{ij} + 2\mu(\vec{x})\varepsilon_{ij}, \quad \vec{x} \in V, \quad (3)$$

где λ и μ – упругие параметры Ляме, которые являются функциями координат для материала с неоднородными свойствами; $\theta = \varepsilon_{ii} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$ – относительная деформация объема материала. Порой коэффициент μ обозначают модулем сдвига, представляют в виде G .

Рассматривались две модели закрепления грунта, т. е. граничные условия принимались в виде (4–5) и (6–7):

$$u_i(\vec{x}) = 0, \quad \vec{x} \in (\Gamma_1 \cup \Gamma_8 \cup \Gamma_9 \cup \Gamma_{10} \cup \Gamma_{11}); \quad (4)$$

$$\sigma_{ij}(\vec{x})n_j(\vec{x}) = 0 \quad \vec{x} \in (\Gamma_2 \cup \Gamma_3 \cup \Gamma_4 \cup \Gamma_5 \cup \Gamma_6 \cup \Gamma_7); \quad (5)$$

$$u_i(\vec{x}) = 0, \quad \vec{x} \in \Gamma_1; \quad (6)$$

$$\sigma_{ij}(\vec{x})n_j(\vec{x}) = 0,$$

$$\vec{x} \in (\Gamma_2 \cup \Gamma_3 \cup \Gamma_4 \cup \Gamma_5 \cup \Gamma_6 \cup \Gamma_7 \cup \Gamma_8 \cup \Gamma_9 \cup \Gamma_{10} \cup \Gamma_{11}), \quad (7)$$

где V – объем системы «грунт – фундамент – строение», ограниченный поверхностью Γ .

Конечно-элементная модель здания была создана с помощью программного комплекса ANSYS. В модели учтены все несущие конструкции и перекрытия с фактическими размерами, все проемы окон и перемычки. Дверные проемы и лестничные марши в модели не включены в силу их незначительного веса по сравнению с весом несущих конструкций и перекрытий (вес перекрытий содержит в себе вес перегородок). Не включены в данную модель двухскатная кровля здания (для ее учета был введен дополнительный слой покрытия) и балконные плиты. Ленточный фундамент модели имеет истинные размеры. На рис. 4 показана полученная конечно-элементная модель системы ГФС.

Характеристики материалов принимались соответственно [2, 3, 5]: для кирпичной кладки: модуль

упругости $E = 3\,600$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,25$, плотность $\rho = 1\,900$ кг/м³; для бетона: $E = 23\,000$ МПа, $\nu = 0,22$, $\rho = 2\,400$ кг/м³; для арматуры: $E = 200\,000$ МПа, $\nu = 0,28$, $\rho = 7\,800$ кг/м³.

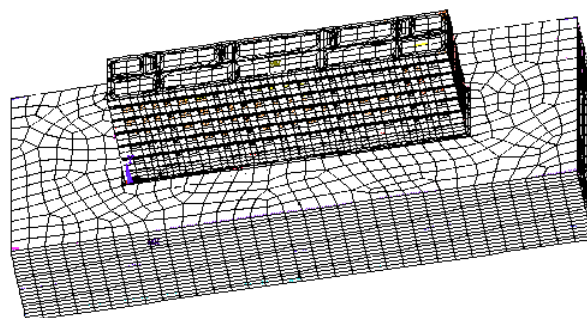


Рис. 4. Конечно-элементная модель системы «грунт – фундамент – строение»

Во время описания свойств грунта (беря в расчет локальное замачивание) выдвинуто предположение о том, что каждая зона по глубине характеризуется формой гиперболического параболоида

$$z = x^2/a^2 - y^2/b^2, \quad (8)$$

значит, основание смоделировано 3 зонами грунта, которые имеют различные свойства при учете данной закономерности.

В результате численной реализации получены расчетные значения осадок фундамента здания при разных вариантах закрепления массива грунта, которые показаны на рис. 5. Здесь же нанесены значения фактических осадок, полученные в результате наблюдений.

Главное звено в системе «грунт – фундамент – строение» – это здание. Расчетные методы основываются на процессах деформации и разрушения, зафиксированных в эксперименте. Следующим этапом является вычисление фактических осадок фундамента здания (рис. 2), который использует разработанную математическую модель механического поведения упруго-хрупкого материала (описание процессов деформаций в кирпичной кладке, железобетонных перекрытиях, фундаменте и т. д.).

Граничные условия в этой задаче имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{ij}(\vec{x})n_j(\vec{x}) = 0, \quad \vec{x} \in (\Gamma_2 \cup \Gamma_4 \cup \Gamma_5 \cup \Gamma_6 \cup \Gamma_7); \\ \text{при } z = -1,8 \text{ (на подошве фундамента)} \\ u_z(\vec{x}) = U, \quad u_x(\vec{x}) = u_y(\vec{x}) = 0. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Численное решение нелинейной задачи строилось на основе метода конечных элементов. На каждом шаге решения для получения сходимости выполнялись равновесные итерации с помощью метода Ньютона–Рафсона.

В результате решения определено напряженно-деформированное состояние несущей конструкции дома, учитывая структурное разрушение (рис. 6–9), и вычислены картины формирования трещин в несущей конструкции дома, которые качественно коррелируют с фактическими (рис. 10).

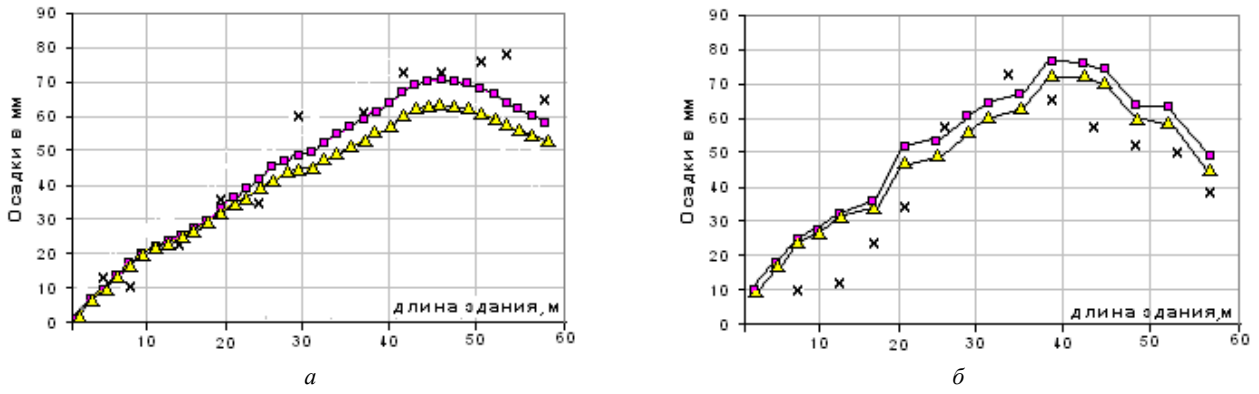


Рис. 5. Вычисленные и действительные осадки дома: а – ось А-А; б – ось В-В; × – действительные осадки; ■ – вычисленные осадки (граничные условия – вариант 1); ▲ – вычисленные осадки (граничные условия – вариант 2)

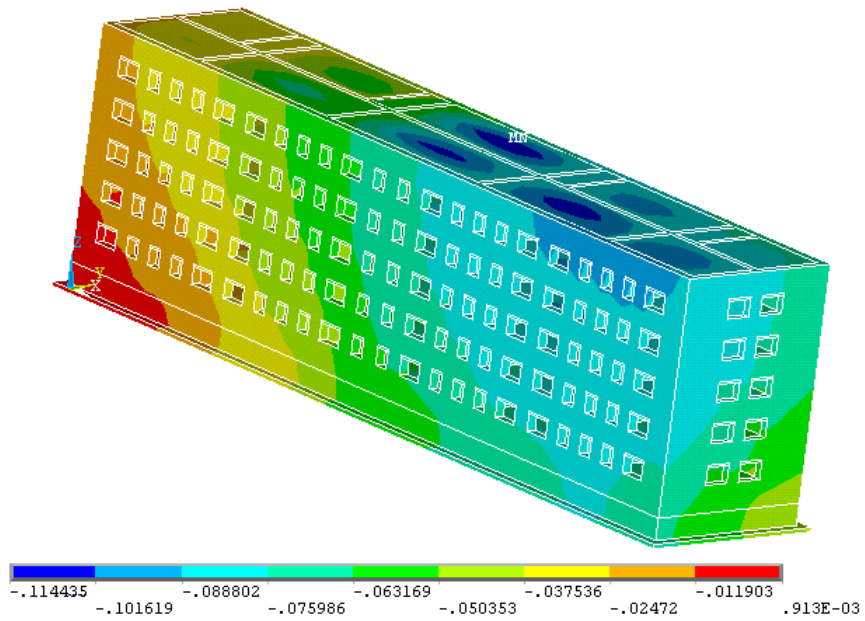


Рис. 6. Перемещения u_z

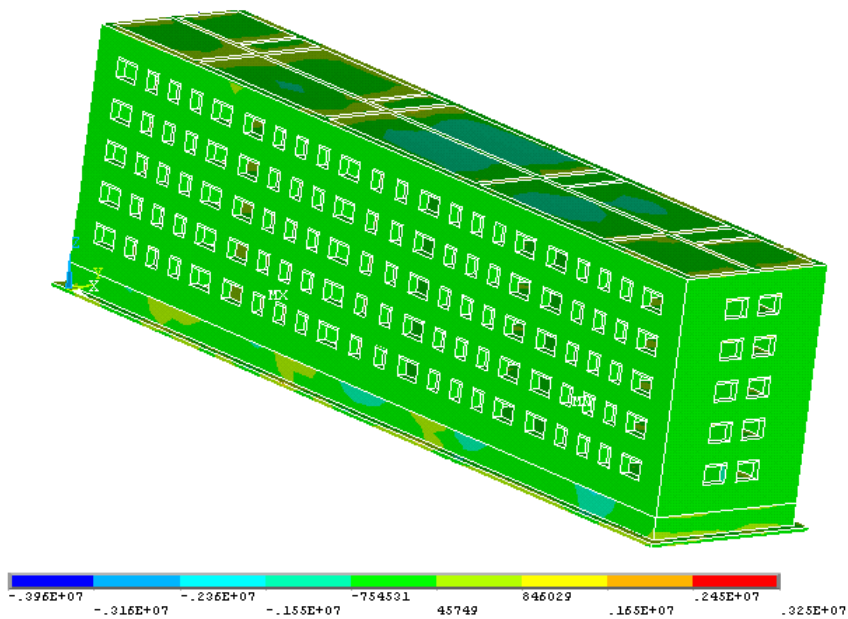


Рис. 7. Напряжения σ_x

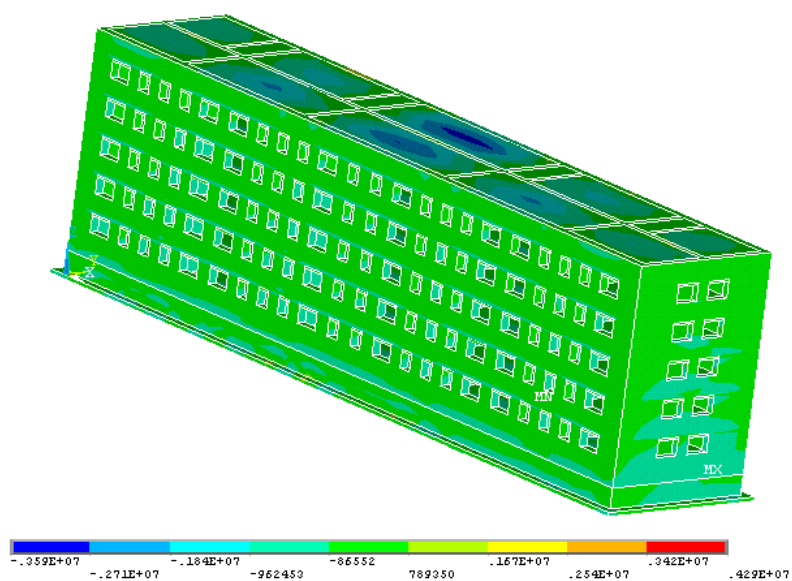


Рис. 8. Напряжения σ_y

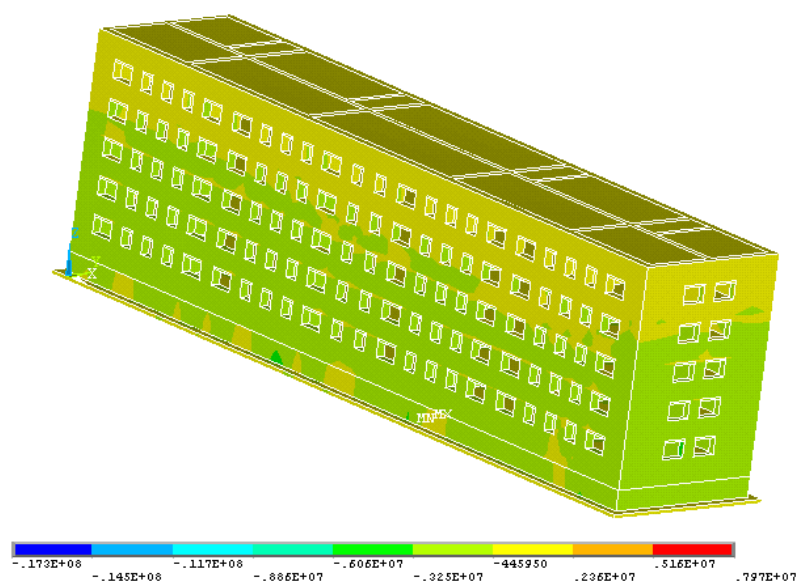


Рис. 9. Напряжения σ_z

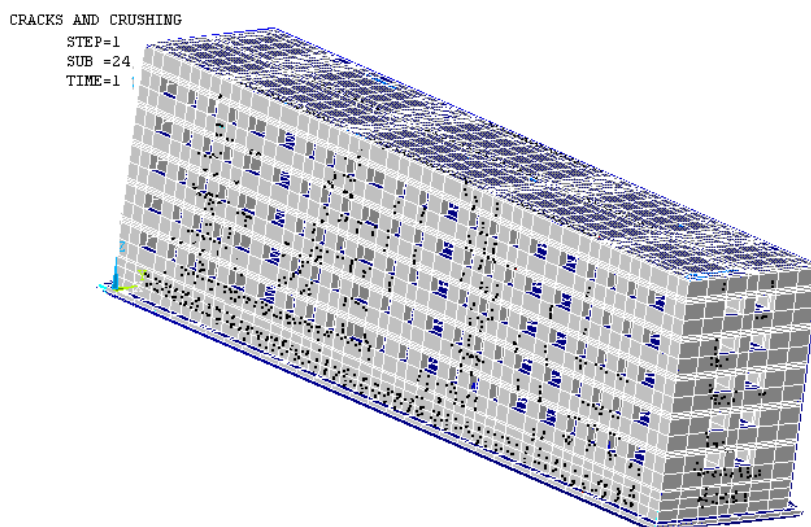


Рис. 10. Картина распространения трещин в несущих стенах здания

Анализ результатов позволяет сделать вывод, что появление трещин на фасаде здания действительно было вызвано неравномерной осадкой фундамента, которая, в свою очередь, возникла в результате локального ухудшения свойств грунтового массива. Можно считать, что построенная *пространственная модель* системы «грунт – фундамент – строение» адекватна реальной системе и ее можно использовать для анализа НДС аналогичных строений.

Библиографические ссылки

1. Горбунов-Пассадов М. И., Маликова Т. А., Соломин В. И. Расчет конструкций на упругом основании. – М.: Стройиздат, 1984. – 679 с.
2. СНиП 2.01.03-84*. Бетонные и железобетонные конструкции. Нормы проектирования.
3. Елисеев В. Н., Телегина М. В. Особенности моделирования взаимосвязи пространственных данных различно-

го характера // Приволж. науч. вестн. – 2012. – № 5. – С. 13–15.

4. Муравьев К. А. Методики оценки трещиностойкости конструктивных стале // Приволж. науч. вестн. – 2012. – № 3. – С. 18–27.

5. Юшков Б. С., Добрынин А. О. Определение величины выпора куста из двуконусных свай силами морозного пучения в полевых условиях // Приволж. науч. вестн. – 2012. – № 12. – С. 23–37.

6. Зубенко В. Л., Емельянова И. В., Емельянов Н. В. Методика применения САД/САМ/САЕ-систем в научных исследованиях // Приволж. науч. вестн. – 2013. – № 2. – С. 18–23.

7. Корнилов Д. Ю., Гурьянова А. С. Применение метода свободного высоконагруженного удара для улучшения прочностных характеристик силикатных строительных материалов // Приволж. науч. вестн. – 2011. – № 2. – С. 5–7.

8. Алейников С. М. Метод граничных элементов в контактных задачах для упругих пространственно неоднородных оснований. – М.: АСВ, 2000. – 754 с.

* * *

V. I. Danilov, Deputy Chief Engineer-head of quality, Main department of special construction №8 of Russia Federal Agency of Special Construction

V. E. Lyalin, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

Verification of a mathematical model based on the construction of a natural experiment deformation and destruction of the existing building for the changes in lithology ground conditions

This article considers the process of verification of the mathematical model based on the construction of a natural experiment of deformation and destruction of the existing building for the changes in lithology ground conditions. Analysis of the results suggests that the appearance of cracks in the facade of the building was indeed caused by the uneven foundation settlement, which, in turn, is the result of deterioration of local soil mass.

Keywords: deformation and failure of the structure, design, foundation settlement

Получено: 14.11.13

УДК 539.1.07

И. Н. Ефимов, доктор технических наук, профессор;

Е. А. Морозов, доктор технических наук, профессор

Чайковский технологический институт (филиал)

Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова

ФОКУСИРОВКА И УСКОРЕНИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В ВЫСОКОЧАСТОТНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Рассмотрена возможность ускорения заряженных частиц и их прецизионная фокусировка для получения высоких энергетических характеристик потока на мишени.

Ключевые слова: ускорение, прецизионная фокусировка, заряженные частицы, магнитное поле

Введение

Общая конструкция системы, обеспечивающей ускорение и фокусировку заряженных частиц, зависит от двух факторов. Первый определяется выбором вида равновесной траектории – траектории, в окрестности которой движутся заряженные частицы и на которой происходит их фокусировка. Второй – выбором типа поля, которое будет осуществлять ускорение и фокусировку. При этом на равновесной траектории функция потенциальной энергии частицы в выбранном поле должна иметь локальный минимум. Если равновесной траекторией является

окружность, то в качестве фокусирующего поля можно выбрать аксиально-симметричное магнитное поле. Такое поле строится на основе использования системы соосно расположенных контуров с током. Кроме того, если магнитное поле будет возрастать во времени, то возникающее индукционное электрическое поле будет осуществлять ускорение частиц.

Отметим два вида технических устройств с равновесной траекторией-окружностью и аксиально-симметричным магнитным полем. В электронных магнитных спектрометрах или бета-спектромет-