

Математическое моделирование пространственной структуры сооружения как объективный критерий проектов реконструкции фундаментов и строений, построенных на местности со сложным рельефом

В.Е. Лялин

д.т.н., проф., заслуженный
изобретатель РФ,
ИжГТУ им. М.Т. Калашникова

В.И. Данилов

заместитель главного инженера,
начальник отдела качества
ФГУП «ГУССТ № 8 при Спецстрое России»

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.

Рассмотрим жилое пятиэтажное кирпичное здание. По результатам геологических изысканий на период строительства грунтовое основание являлось однородным до глубины 12 м. Здание является реализацией типового проекта серии 1-447С. Через несколько лет на восточном фасаде появилась сквозная трещина осадочного происхождения по всей высоте здания. В результате визуальных и инструментальных наблюдений за домом в течение года было обнаружено, что стены здания дали относительную неравномерную осадку от 2 до 4 мм. Результаты наблюдений показали, что осадки дома за следующий год продолжались и происходили неравномерно (перемещения составляли 4...8 мм), но видимых разрушений на стенах здания не было. Через десятилетие в стенах по периметру здания обнаружили трещины различной ширины (особенно вблизи лестничных клеток), места их дислокации показаны на *рис. 1*.

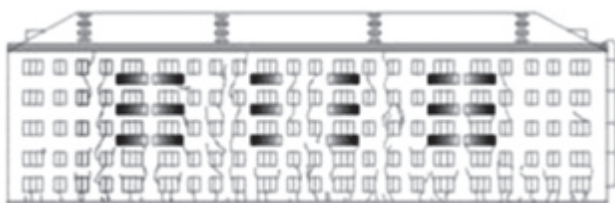


Рис. 1. Трещины на фасаде по оси А-А

Значения осадок вдоль стен дома показаны на *рис. 2*. Максимальные осадки фундамента при этом составили 72 мм. При дальнейшем их возрастании существует опасность разрушения несущих стен, поэтому необходимо применение регламентированных мер для консервации их дальнейшего разрушения.

Проведенные геологические изыскания показали изменение свойств грунта под зданием и вблизи него (замеры проводились в плоскости подошвы фундамента). Образовалось три зоны с разными свойствами.

Теоретические исследования проводились в два этапа [1]: 1-й этап – моделирование системы строения, фундамента и грунта и расчет напряженно-деформированного состояния системы с учетом изменившихся свойств основания (неоднородности грунта); 2-й этап – расчет напряженно-деформированного состояния (НДС) пятиэтажного кирпичного строения и фундамента на действие собственного веса и кинематическое воздействие в виде неравномерной осадки здания в нелинейной постановке.

В модели учтены все несущие конструкции и перекрытия с фактическими размерами, все проемы окон и перемычки. Дверные проемы и лестничные марши в модель 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 двускатная кровля здания (для ее учета был введен дополнительный слой покрытия) и балконные плиты. Ленточный фундамент модели имеет истинные размеры.

В результате численной реализации получены расчетные значения осадок фундамента здания при разных вариантах закрепления массива грунта, которые показаны на *рис. 3*. Здесь же нанесены значе-

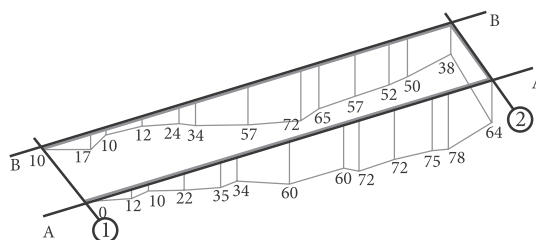


Рис. 2. Фактические осадки фундамента, мм



ния фактических осадок, полученные в результате наблюдений.

На 2-м этапе рассчитываются фактические осадки фундамента (рис. 3) с помощью рассмотренных ранее моделей возможного состояния упруго-хрупких конструкционных материалов.

Численное решение нелинейной задачи строилось на основе метода конечных элементов с использованием пошаговой процедуры. На каждом шаге решения для получения сходимости выполнялись равновесные итерации с помощью метода Ньютона – Рафсона. В результате решения определено напряженно-деформированное состояние несущей конструкции здания с дислоцированными трещинами (рис. 4–7) и получена схема локализации трещин в стенах здания, идентичная реальной картине разрушения (рис. 8).

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 строения, фундамента и грунта адекватна реальной системе, и ее можно использовать для анализа НДС аналогичных строений. Нормы проектирования зданий и сооружений не исключают возможности появления в несущих и ограждающих конструкциях деформаций и трещин, допускаемых по условиям эксплуатации и устранимых при проведении ремонта. Для предупреждения возникновения новых трещин и развития имеющихся использовали укрепление твердости грунта путем цементации на большой глубине.

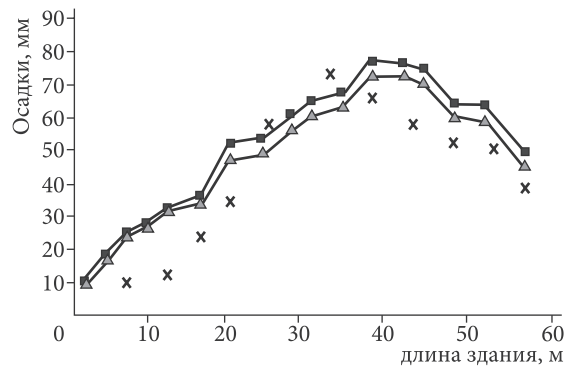
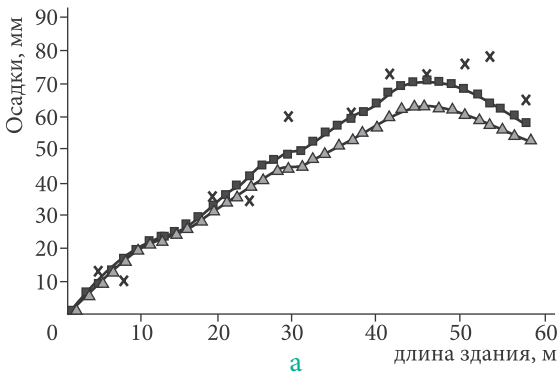


Рис. 3. Расчетные и фактические осадки по всей длине сооружения: а – ось А–А; б – ось В–В

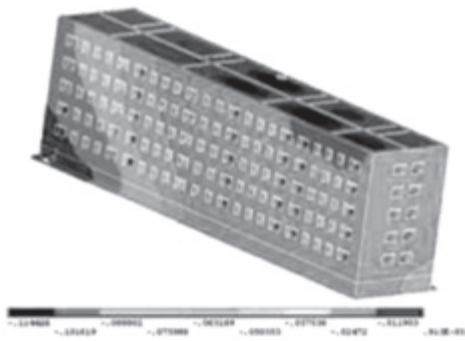


Рис. 4. Перемещения u_z

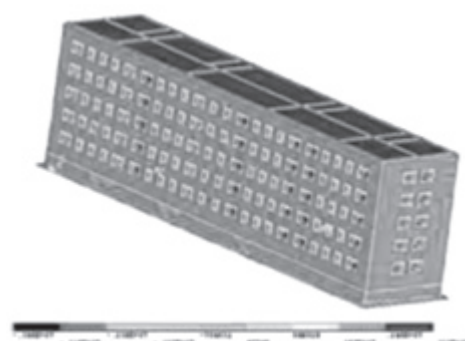


Рис. 5. Напряжения σ_x

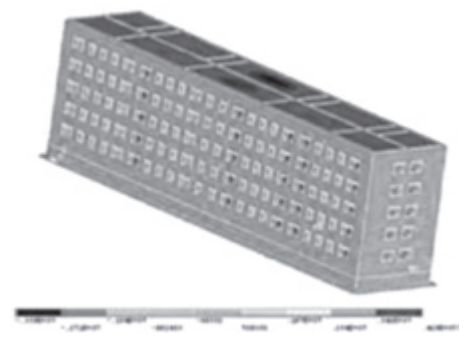


Рис. 6. Напряжения σ_y

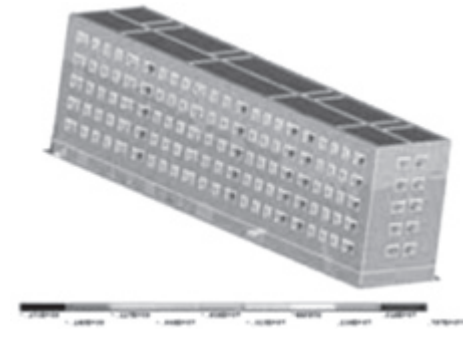


Рис. 7. Напряжения σ_z

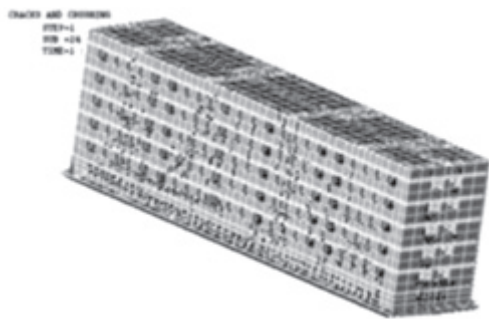


Рис. 8. Картина распространения трещин в несущих стенах здания

Проведено имитационное моделирование проектов безопасной реконструкции существующих строений, расположенных на территориях развития карста. Создан проект реконструкции двухэтажного кирпичного здания, предполагающий надстройку мансарды, пристройку лестничной клетки с одной стороны здания, пристройку нового здания с другой стороны. При этом необходимо учесть возможность выхода на поверхность карстовых воронок, т.е. обеспечить безопасность реконструкции на закарстованной территории.

При решении данной проблемы было реализовано три задачи:

1. Определены дополнительные осадки в результате пристраивания конструкций и проведен анализ напряженно-деформированного состояния здания и фундамента.

2. Проанализировано напряженно-деформированное состояние системы строения с учетом возникновения карстовых воронок.

3. Проведен численный анализ напряжения и деформаций усиленного фундамента базового строения.

Было смоделировано появление двух карстовых воронок [2, 3], наиболее неблагоприятное расположение которых изображено на схеме рис. 9. Одна в наиболее опасном месте – угол здания (в месте примыкания к пристрою), вторая – в центре под фундаментом существующего здания.

Как показал расчет, запас прочности фундамента достаточен, чтобы выдержать появление карстовой воронки в центральной части здания, но карст под углом в месте примыкания пристроя крайне опасен. Дополнительные осадки после появления воронок невелики и не превышают значения 4 см, что меньше предельного значения 10 см. Но растягивающие напряжения в бетоне фундамента составляют 3,54 МПа по оси x и 4,97 МПа по оси y (мансарда, пристрой) (рис. 10), что превышает предельные значения (0,9 МПа). Напряжения в кирпичной кладке стены по осям x и y не превысят предельных значений при условии отсутствия трещин в бетоне.



Рис. 9. Схема образования карстовых воронок под фундаментом

Учитывая полученные результаты, а также то, что невозможно точно предсказать место выхода карстовой воронки на поверхность, необходимо усиливать существующий фундамент. В результате проведенных численных экспериментов определен вариант усиления железобетонным каркасом с шагом 3 м и шириной ребра 1 м (рис. 11).

Выбор такого варианта усиления по сравнению с традиционной сплошной плитой усиления обусловлен тем, что даже в наихудшей ситуации плита будет работать лишь на 10% ее площади. Каркас же будет задействован примерно на 30% и позволит перераспределить напряжения с торцевой части здания. Кроме того, сооружение каркаса потребует

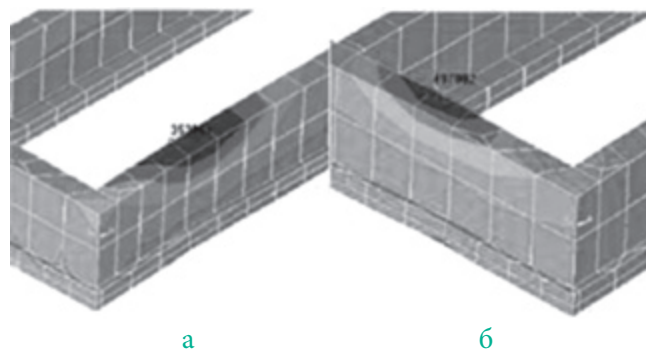


Рис. 10. Максимальные значения напряжений в фундаменте после образования карстовых воронок (с учетом мансарды и пристроев): а – по направлению оси x ; б – по направлению оси y

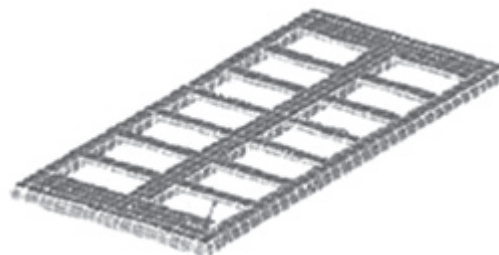


Рис. 11. Железобетонный каркас усиления фундамента



меньших затрат рабочего времени и меньшего расхода материалов.

Численные расчеты показали, что возникающие растягивающие напряжения полностью воспринимаются арматурой. Максимальные напряжения в арматуре каркаса усиления значительно ниже предельных (рис. 12). Перераспределение напряжений позволит снизить усилия в торцевых стенах более чем в два раза. Трещины в бетоне после первоначального раскрытия и перераспределения напряжений на арматуру полностью закрываются.

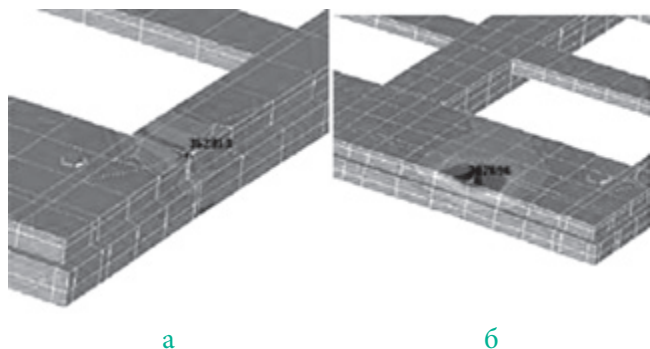


Рис. 12. Максимальные значения напряжений в каркасе усиления фундамента (с учетом карстовых воронок, мансарды и пристроев):
а – по направлению оси *x*; б – по направлению оси *y*

Авторами также рассмотрены математическое моделирование и вычислительный эксперимент пространственной структуры сооружения как объективный критерий проектов реконструкции фундаментов и строений, построенных на местности со сложным рельефом. По наружным стенам двухэтажного здания должны быть предусмотрены железобетонные пояса в двух уровнях. Существующие фундаменты – ленточные (ступенчатая схема заложения по высоте со снижением отметок подошвы в направлении уклона грунта), из фундаментных блоков (бетон В15), уложенных по монолитным бетонным подушкам на естественном основании. Основание под фундаментом состоит из текучепластичных и мягкопластичных глин.

В данном направлении решались две задачи:

1. Расчет осадок и несущей способности фундамента и здания с учетом усиления грунта буронабивными сваями (характеристики усиленного грунта взяты из отчета по обследованию).
2. То же, но в случае неусиленного грунта.

В работе рассматривался четырехслойный грунт разной толщины с осредненными свойствами общей толщиной 15 м, лежащих под нижней поверхностью железобетонного фундамента. Свойства грунтового основания приняты по материалам инженерно-геологических изысканий.

В расчете учитывались следующие нагрузки: нагрузки от собственного веса здания, вес конструкций крыши – в виде поверхностной нагрузки 100,78 кг/м² и вес металлического шпиля (517 кг), опирающегося на внутреннюю стену; временные нагрузки: ветровая, снеговая и полезная на перекрытия.

Задача определения напряженно-деформированного состояния системы строения, фундамента и грунта решалась методом конечных элементов с использованием нелинейной модели Друккера – Прагера. Для дискретизации трехмерных областей (фундамент, основание, конструктивные элементы зданий) применялись объемные восьмиузловые конечные элементы первого порядка шести- и пятигранной конфигурации. Оконные проемы не моделировались. Составлена программа построения и расчета системы строения, фундамента и грунта на языке *APDL* и получены результаты решения – компоненты тензоров напряжений и деформаций. На рис. 13 и 14 показаны вертикальные перемещения системы в метрах, полученные при решении первой задачи (с усиленным грунтом).

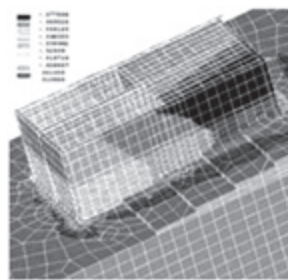


Рис. 13. Схема осадок здания с учетом усиления фундамента

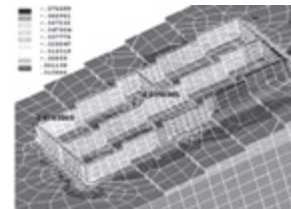


Рис. 14. Осадки здания (укрупнено, фундамент)

Максимальная осадка фундамента получилась равной 7,5 см, а разность осадок частей фундамента составила приблизительно 5 см. Таким образом, максимальная осадка фундамента $s_{max} = 7,5$ не превышает значения предельной средней осадки СНиП 15 см, значение относительной разности осадок $\Delta s/L = 6,5/2860 = 0,00227$ не превышает предельной относительной разности осадок 0,0024.

При решении второй задачи (неусиленного грунта) результаты получились практически такими же. На рис. 15 показаны вертикальные перемещения системы ЗФО второго случая.

Осадка фундамента в данном случае изменяется от 0 в самом благополучном месте до 5 см в месте ослабленного грунта. Разность осадок частей фундамента при этом по-прежнему составляет 5 см, но характер осадок уже совершенно иной.

Как показали вычислительные эксперименты, предложенное усиление только одной части здания

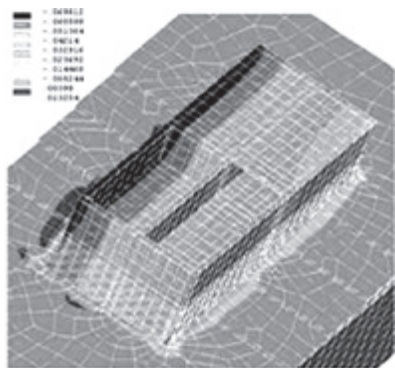


Рис. 15. Значения и характер осадки в случае неусиленного грунта

не достигает нужного результата: значения осадок не меняются, а изменяется только их вид. Это объясняется ступенчатой конструкцией фундамента, которая не обладает достаточной жесткостью, что приводит к смещению оси строения относительно горизонтали. Укрепление здания в нижнем углу приводит к осадке расположенной выше части строительной конструкции, т.к. строение стремится к более устойчивому положению. Пространственная численная модель системы строения, фундамента и грунта, учитывающая все виды нагрузок и грунтовых особенностей, позволяет прогнозировать действительный характер осадок и дает возможность предсказывать необходимость применения усиления фундамента.

Анализ напряженного состояния конструкций сооружения показал, что в несущих стенах и фундаменте исследуемого здания напряжения не превышают допустимых значений, и стены находятся в относительной безопасности. Бетонные пояса усиления практически полностью разгружают стены здания.

В грунте (слабосжимаемая текучепластичная глина) в отдельных наиболее опасных местах возникают большие растягивающие напряжения (рис. 17), превышающие несущую способность грунта, и может произойти выпучивание грунта, что в свою очередь может привести к разрушению бетонной подготовки пола цокольного этажа. Для восприятия этих напряжений предложено ввести арматурную сетку, что и было реализовано на практике.

Таким образом, на основе применения ретроспективного анализа причин трещинообразования в несущих стенах сооружения из кирпича доказано, насколько адекватна разработанная математическая модель деформирования и разрушения пространственной системы «здание – фундамент – основание», которая учитывает процесс структурного разрушения и деформационное разупрочнение. С помощью численных исследований установлено возможное решение трехмерной проекторочной задачи о безопасном реконструировании и надстройке сооружения на закарстованной территории с учетом выхода на поверхность карстовых воронок, также были обоснованы варианты конструкции усиления данного сооружения. Методом вычисли-

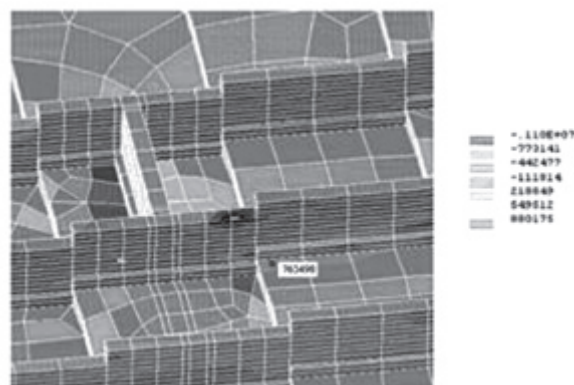


Рис. 16. Напряжения, возникающие в конструкции фундамента и основания по оси x

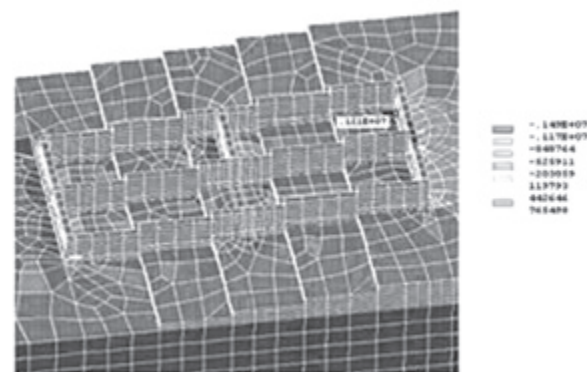


Рис. 17. Напряжения, возникающие в конструкции фундамента и основания по оси y

тельного эксперимента сделан прогноз изменения напряженно-деформированного состояния фундамента и строения, дислоцированных на закарстовых территориях, при стационарных и экстремальных динамических и кинематических возмущениях.

Литература

1. Данилов В.И., Лялин В.Е. Верификация математической модели сооружения на основе проведения натурного эксперимента деформации и разрушений существующего строения с учетом изменения литологического состояния грунта // Интеллектуальные системы в производстве. – 2013. – № 2. – С. 142–154.
2. Данилов В.И., Кашеварова Г.Г. Имитационное моделирование проектов безопасной реконструкции существующих строений, расположенных на территориях развития карста // Материалы междунар. заочной науч.-практ. конф. «Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика». – Воронеж, 2013. – С. 113–115.
3. Данилов В.И., Лялин В.Е. Моделирование проектов безопасной реконструкции существующих строений, расположенных на территориях развития карста, при условии пристраивания конструкции // Вестник ИжГТУ. – 2013. – № 4(60). – С. 188–192.