

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЗДАНИЙ И ОСНОВАНИЙ: МЕТОДЫ РАСЧЕТА И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ

А. Г. ШАШКИН – канд. техн. наук., член РОМГГиФ, генеральный директор НПО «Геореконструкция-Фундаментпроект».

К. Г. ШАШКИН – канд. техн. наук, ведущий специалист НПО «Геореконструкция-Фундаментпроект».

Одной из ключевых проблем современной геотехники и проектирования зданий и сооружений является синтез расчетов оснований, фундаментов и надземных конструкций. До настоящего времени в мировой практике проектирования развитие получили отдельные расчеты оснований и зданий. В пространственной постановке реализованы только методы расчета надземных конструкций, основание моделируется с помощью упрощенных моделей (коэффициентами постели). Трехмерные совместные расчеты зданий и оснований остаются уникальными. Причиной этого является огромный объем конечно-элементных схем для совместного расчета и отсутствие эффективных методов решения больших систем линейных алгебраических уравнений. В настоящем докладе представлен программный комплекс FEM models, в котором впервые преодолены трудности решения трехмерных задач совместного расчета, что сделало возможным моделирование реальных строительных и реконструкционных ситуаций конечно-элементными схемами, характеризующимися порядками миллиона степеней свободы. Совместные расчеты, выполненные для конкретных объектов, позволили выявить особенности совместной работы зданий, сооружений и их оснований, не всегда проявляющиеся при отдельном подходе к их расчету.

ВВЕДЕНИЕ

Современное новое строительство и реконструкция кварталов городской застройки невозможны без расчетного обоснования оптимальных конструктивных решений надземных конструкций и фундаментов зданий. В то же время при расчете зданий зачастую складывается достаточно парадоксальная ситуация: специалист-надземщик рассматривает здание как стоящее на *абсолютно неподатливом основании* (на скале) и полученные из такого расчета реакции передает фундаментщику; последний же прикладывает эти реакции на упругую, упругопластическую или вязкую среду как *абсолютно гибкую* нагрузку. Спрашивается: какое же у нас основание – абсолютно жесткое или податливое? Какое у нас здание: абсолютно гибкое или конечной жесткости? Для разрешения этого парадокса необходимо

сделать совместный расчет основания и надземных конструкций здания.

Российские нормативные документы содержат прямые указания на необходимость проведения совместных расчетов. Однако на практике эти требования чаще всего остаются декларативными. При расчете конструкций жилых зданий деформируемость основания учитывается в лучшем случае с помощью упрощенных подходов. Развитие получили методы расчета на упругом основании, моделируемом по гипотезе Винклера или упругого полупространства. Однако применимость этих подходов весьма ограничена. Они не позволяют с достаточной точностью рассчитывать подземные сооружения, здания с глубокими подвалами, здания на отдельно стоящих или свайных фундаментах, учитывать влияние разделительных стенок, котлованов и подземных выработок и т.д. Кроме того, практически все упрощенные модели основания не позволяют получить решение задач с учетом нели-

нейного характера работы грунтов, что также значительно ограничивает область их применения.

Поэтому более перспективным представляется моделирование основания с использованием более подробных методов расчета оснований, прежде всего, использующих метод конечных элементов (МКЭ). Такой подход к расчету основания получил широкое развитие, в том числе в работах российских исследователей. В связи с ограниченными возможностями существовавших ранее вычислительных машин преимущественно решались плоские и осесимметричные задачи. Это не давало возможности решать задачи совместного расчета, поскольку работу здания в большинстве случаев невозможно свести к плоской постановке. Кроме того, развитие совместных расчетов сдерживало отсутствие расчетных программ, объединяющих модели надземных конструкций и сложные нелинейные модели основания.

1. ПРОГРАММНЫЙ ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ СОВМЕСТНОГО РАСЧЕТА

Для решения задач совместного расчета была разработана программа FEM models. Программа состоит из ряда компонентов.

Ядром программы является «*решатель*», осуществляющий процедуру формирования разрешающей матрицы системы конечных элементов из матриц отдельных конечных элементов и после этого – процедуру решения системы линейных алгебраических уравнений. Особенностью «*решателя*» является возможность решения физически и геометрически нелинейных задач методом последовательных приближений, в том числе с возможностью перестроения конечно-элементной сетки. При этом задачи могут рассматриваться в плоской, осесимметричной, пространственной постановке с учетом изменения расчетной схемы во времени.

Основной проблемой для решения пространственных задач совместного расчета является их исключительная вычислительная сложность. Для их решения приходится решать системы линейных уравнений размером от 200000 до нескольких миллионов

уравнений, что представляет значительную сложность даже при современном уровне развития вычислительной техники.

При разработке «*решателя*» был проведен детальный анализ различных алгоритмов решения задач линейной алгебры и создан новый оригинальный алгоритм, позволяющий осуществлять сложные совместные расчеты в десятки или сотни раз быстрее, чем традиционно применяемые в расчетных программах методы. Собственно, именно наличие эффективного «*решателя*» позволяет рассматривать практические случаи взаимодействия здания и основания.

Вторым компонентом программы является оригинальный *графический редактор*, представляющий собой систему создания пространственных конечно-элементных схем, которые могут изменяться во времени. Пользователю предоставляется возможность работать в виртуальном четырехмерном пространстве – времени. Графический редактор построен таким образом, чтобы максимально упростить процедуру создания конечно-элементных схем и свести ее к визуально контролируемому процессу черчения в трехмерном пространстве. Он позволяет также осуществлять анализ результатов вычислений в удобной и наглядной форме (в виде изолиний, эпюр, графиков, деформированных схем и т. п.).

Третьим компонентом программы является *среда разработчика* конечно-элементных моделей, которая позволяет создавать, тестировать и анализировать расчетные модели. Среда разработчика дает возможность пользователю создавать конечно-элементные модели, при этом от него не требуется глубоких знаний в области программирования. Практически все описание модели осуществляется на математическом языке.

Наконец, четвертым компонентом программы является *библиотека моделей*, в которой хранятся конкретные конечно-элементные модели. При решении практических задач пользователем из этой библиотеки выбирается адекватная модель.

Стержнем программы, соединяющим в единое целое перечисленные компоненты, является *структура универсального конечного элемента*, позволяющего описать практически

любую модель МКЭ. Описанный в рамках данной структуры конечный элемент может иметь неограниченное число различных степеней свободы в каждом узле (перемещения, ускорения, напоры воды, температуры и т. д.). Предусмотрено введение новых неизвестных в узлах элемента по усмотрению автора модели. В узлах могут присутствовать также силы или иного рода воздействия. Каждый элемент описывается определенным набором параметров, задаваемых пользователем при расчете, число которых определяется автором модели.

Автор модели при работе в среде разработчика заполняет описанную структуру универсального конечного элемента конкретной информацией о создаваемой им модели. Тем самым автор наделяет элемент определенным перечнем «знаний и умений», таких как способность формировать матрицу жесткости элемента, определять удобный способ визуализации на экране, вычислять внутренние усилия по полученным в результате решения перемещениям узлов и т. п. Заполненная описанным способом структура универсального конечного элемента превращается в конкретный конечный элемент, отвечающий предложенной автором модели, после чего автоматически встраивается в библиотеку моделей и тем самым становится составной частью программы.

Таким образом, с программой FEM models могут работать как ученые – разработчики моделей среды, так и пользователи – расчетчики, занимающиеся расчетами по готовым моделям.

В настоящее время программа активно используется на практике, реализованные в ее рамках модели изложены в 3 кандидатских и 2 докторских диссертациях. В рамках программы разработан ряд моделей, описывающих работу основания и сооружения. Среди них:

- линейно- и нелинейно-упругие модели (изотропные, ортотропные, анизотропные среды), модели объемно-несжимаемых сред;
- упругопластические модели (идеальная упругопластичность, шатровые модели);
- реологические модели;
- стационарная и нестационарная задача теплопроводности, с учетом фазовых переходов;
- модели структурно-неустойчивых сред;

задачи динамики сплошных сред;

задачи термовязкоупругопластичности.

В программе FEM models реализован принципиально новый подход к созданию конечно-элементных моделей. Его отличительными чертами являются:

прозрачность, т. е. свобода доступа ко всем деталям реализации конкретной модели, а также математическая ясность самого описания модели для автора, пользователя и любого эксперта;

открытость, т. е. возможность пополнения программы новыми моделями;

простота использования разработанных моделей для практических расчетов;

отсутствие инерции в практическом использовании новейших научных разработок и исследований.

В рамках программы реализован модуль, позволяющий по данным геологических изысканий строить пространственную картину залегания слоев грунта, а также с помощью математических методов оценивать достоверность такой картины. Этот модуль используется для анализа данных инженерно-геологических изысканий, а также непосредственно для построения конечно-элементных сеток основания, учитывающих сложное пространственное залегание слоев грунта.

2. СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА С ДАННЫМИ НАТУРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Рассмотрим основные эффекты, проявляющиеся при совместном расчете основания и надземных конструкций зданий.

Для описания работы основания будем использовать упругопластическую модель (по той причине, что стандартные российские инженерно-геологические изыскания нацелены на получение параметров именно этой модели). Работу конструкций здания будем моделировать упругими пластинчатыми и стержневыми элементами.

Вначале сравним результаты расчетов с данными натурных наблюдений (рис. 1, 2). Рассматриваемое административное здание интересно тем, что за ним в течение всего периода существования велись геодезические наблюдения. Здание имеет корытообразный фундамент, с двух сторон к зданию пристро-

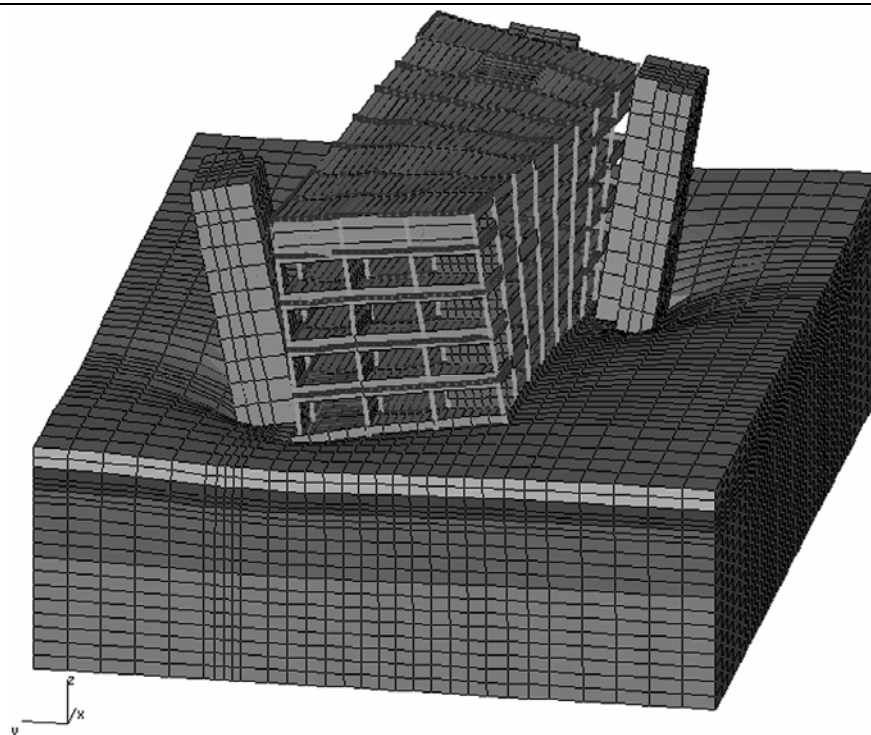


Рис. 1. Деформации здания по расчету (масштаб деформаций увеличен в 50 раз)

ны лестничные клетки, расположенные также на плитных фундаментах. По проекту они отделены от основного здания деформационным швом. За период существования здания лестницы получили крен в сторону от здания до 30 см (рис. 1).

Как показал расчет, причиной такого по-

ведения являлось зависание конструкций лестничной клетки на конструкциях основного объема здания. Действительно, как было выявлено в процессе обследования, деформационный шов был выполнен некорректно, что и привело к подобному зависанию. Как показывает сравнение результатов расчетов

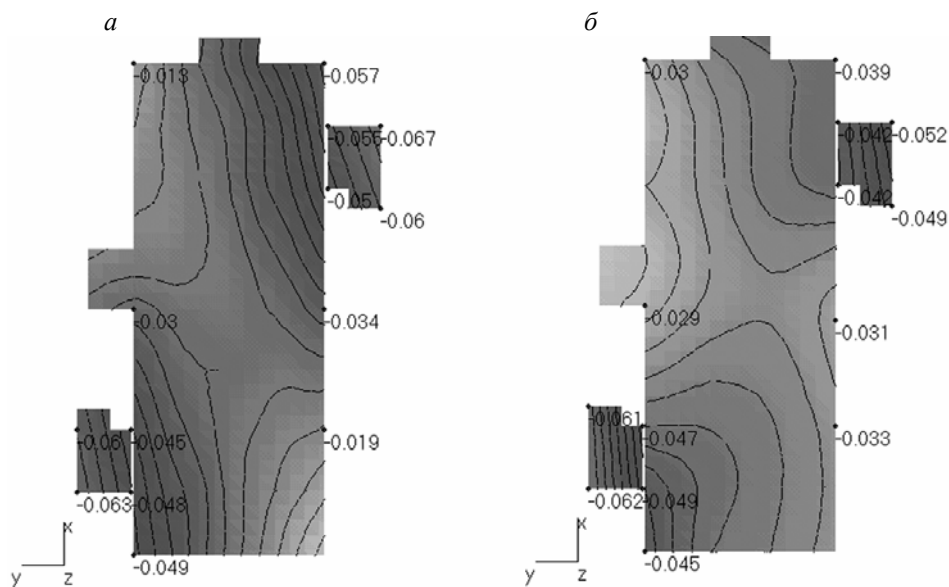


Рис. 2. Изолинии осадок фундаментов: а – по расчету; б – по результатам геодезических измерений

a



б

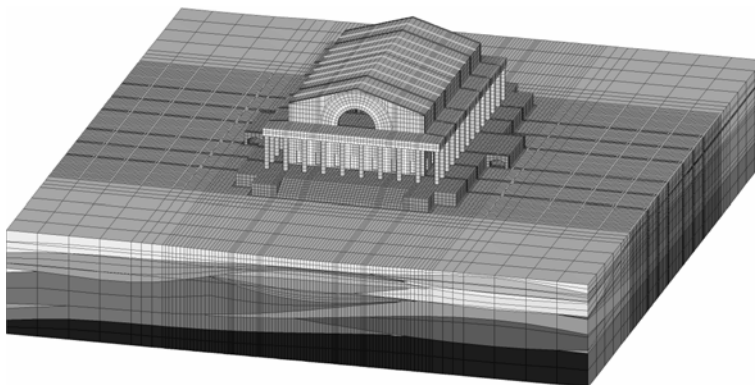


Рис. 3. Здание Биржи *a* – общий вид; *б* – расчетная схема основания и конструкций (рис. 2) с данными геодезических наблюдений, совместный расчет позволяет с достаточной степенью точности предсказать не только величины осадок, но и общий характер работы здания.

Весьма любопытным является сопостав-

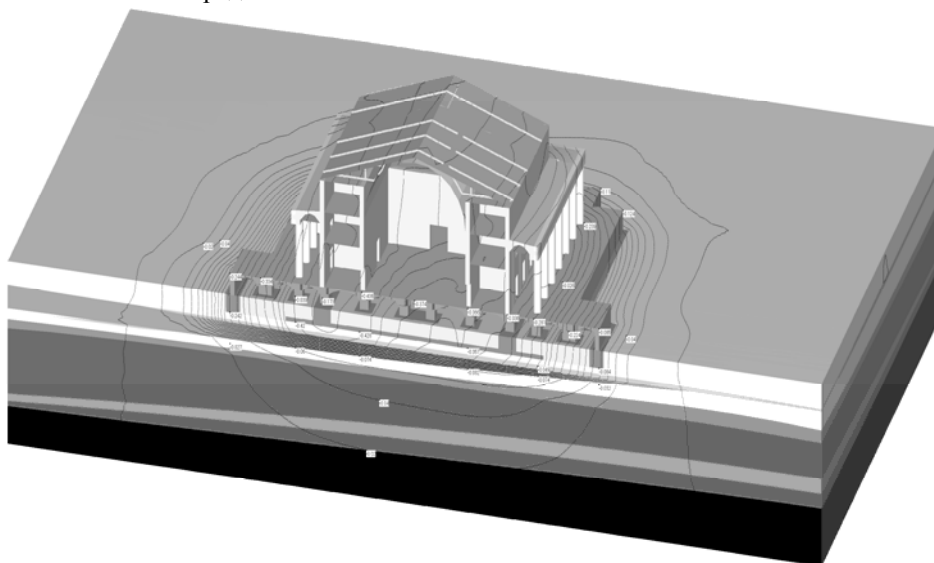


Рис. 4. Изолинии осадок здания и основания по разрезу (м). Изолинии проведены через 2 см

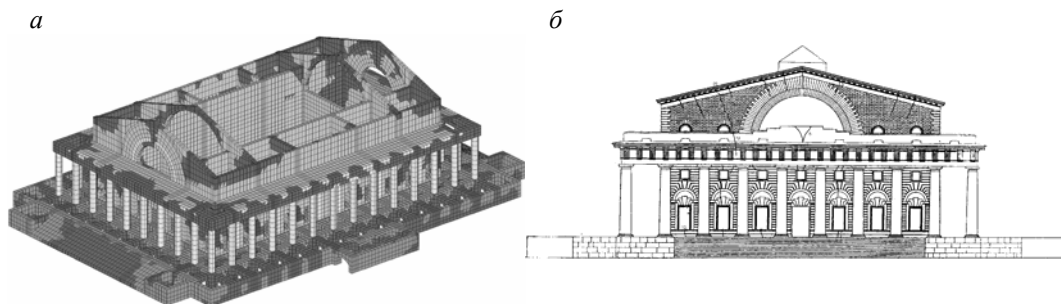


Рис. 5. Места возможного развития трещин в кирпичной кладке (а) (темным цветом обозначены зоны главных растягивающих напряжений) и расположение трещин по результатам обследования (б)

ление результатов совместного расчета и данных геодезических измерений для одного из самых известных зданий Санкт-Петербурга – Биржи на Стрелке Васильевского острова (рис. 3).

Конечно же, геодезические наблюдения за осадками этого здания не проводились с момента его строительства. Тем не менее геодезические измерения позволяют установить неравномерность осадок здания путем нивелировки баз колонн и пилястр, изначальное положение которых было, очевидно, близким к горизонтальному. Расчеты с учетом реальной пространственной неоднородности залегания грунтов в основании позволили получить картину деформаций, полностью совпадающую с наблюдаемой с помощью

геодезических измерений (рис. 4, 5).

Здание получает крен в сторону Большой Невы, обусловленный соответствующим увеличением толщи сильносжимаемых заторфованных супесей. Анализ напряженного состояния кирпичной кладки позволил оконтурить зоны возможного образования трещин, что полностью подтвердилось визуальным освидетельствованием (рис. 5). Такое совпадение подтверждает корректность применяемой методики расчета.

3. РАСЧЕТ ЗДАНИЙ НА ЕСТЕСТВЕННОМ ОСНОВАНИИ

Следующие примеры касаются расчета многоэтажных зданий на естественном осно-

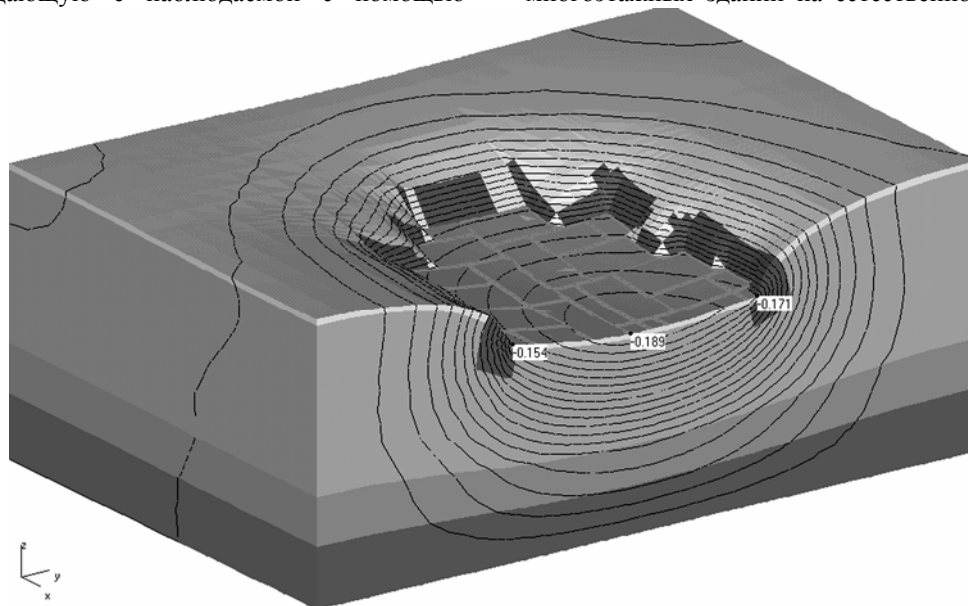


Рис. 6. Деформированная схема и изолинии осадок (м) фундаментной плиты и окружающего грунта (темным цветом обозначены зоны предельного состояния грунта)

вании (на плитных фундаментах). При расчете фундаментных плит достаточно часто возникает ситуация, когда при расчете плиты на гибкие нагрузки (без учета жесткости здания) она получает осадки, допустимые по абсолютной величине, но недопустимые по относительной неравномерности. Такая ситуация была выявлена при расчете панельного здания в районе Шувалово-Озерки (рис. 6, 7, 8).

Естественно предположить, что жесткость надземных конструкций должна выравнивать неравномерности осадок. Однако для учета этого фактора необходим был совместный расчет, от проведения которого в данном случае проектировщики надземных конструкций отказались. В результате было запроектировано здание на дорогостоящих свайных фундаментах.

Рассмотрим принципиальную возможность устройства здания на фундаментной плите. Как видно на рис. 7, при совместном расчете здание получает практически равномерные осадки, т.е. работает как жесткий штамп.

Под краями здания образуются классические области пластических деформаций. Однако усилия в конструкциях существенным

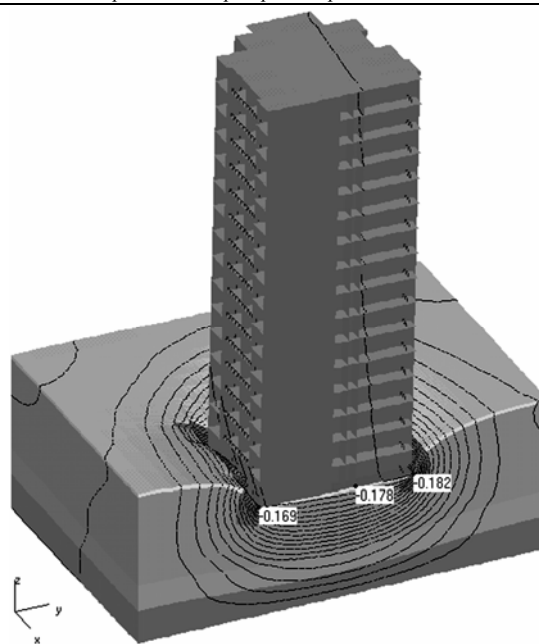


Рис. 7. Деформированная схема и изолинии осадок (м) здания и окружающего грунта (разрез) (красным цветом обозначены зоны предельного состояния грунта)

образом отличаются от получаемых по расчету без учета деформируемости основания. На рис. 8 слева изображены погонные вертикаль-

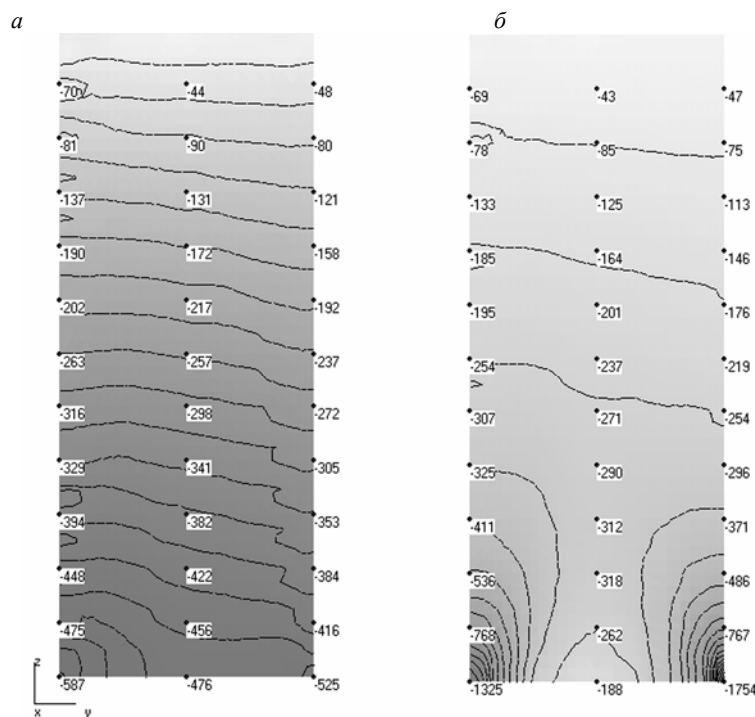


Рис. 8. Изолинии усилий в поперечной стенке: *а* – без учета деформируемости основания; *б* – по совместному расчету (кН/мм)

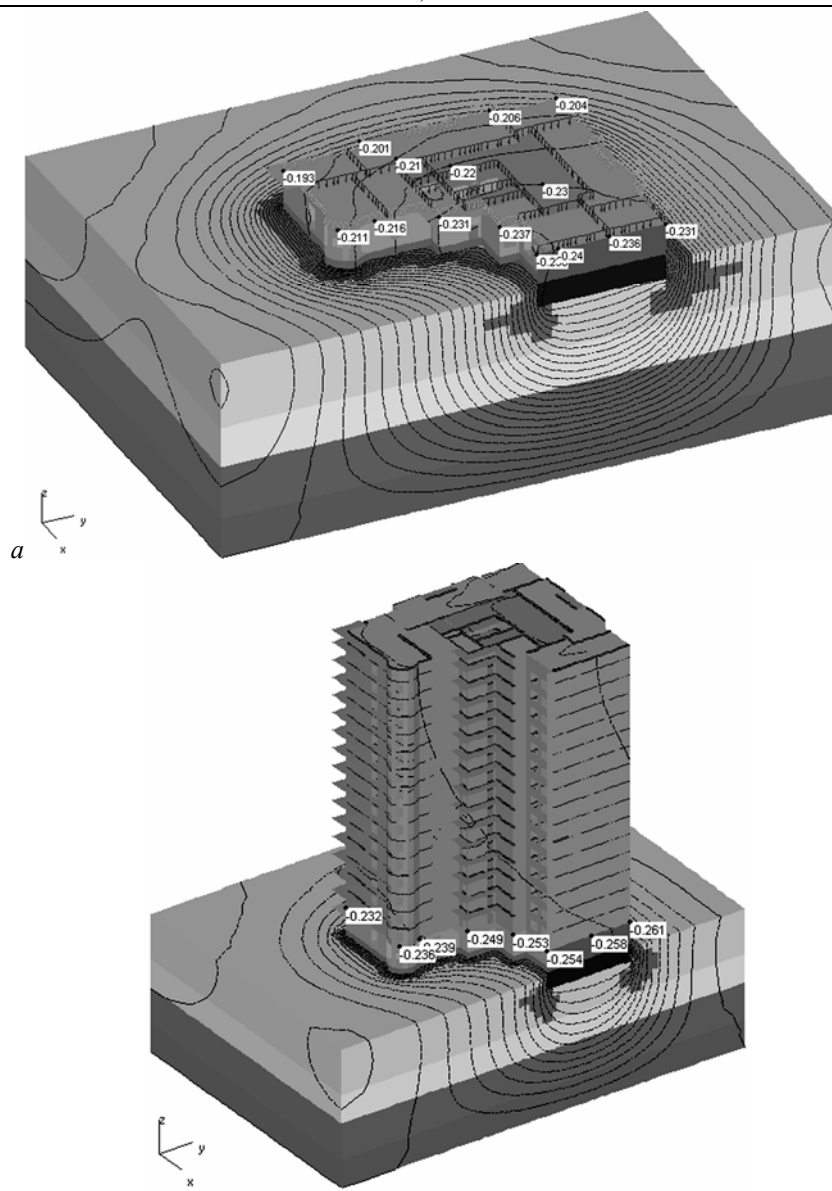


Рис. 9. Изолинии осадок здания (м): *а* – без учета жесткости кирпичных стен; *б* – с учетом жесткости всей конструкции (красным цветом показаны области предельного состояния грунта)

ные усилия в поперечной стене здания без учета деформируемости основания (как обычно считают надземщики). Справа приведены усилия по данным совместного расчета. В крайних частях стены, сопротивляющихся общему изгибу фундаментной плиты, напряжения увеличиваются более чем в 3 раза.

Именно такой ситуации позволяют избежать заложенные в нормативные документы предельные величины неравномерностей осадок. С другой стороны, при соответствующем

конструировании участков стен вариант устройства здания на фундаментной плите мог оказаться возможным и экономически более эффективным.

Это подтверждает и другой пример проектирования здания в похожих инженерно-геологических условиях. В данном случае по результатам совещаний с проектировщиками было принято решения об устройстве в пределах 2 нижних этажей монолитных железобе-

тонных конструкций с дополнительными поперечными стенами.

Как показал расчет (рис. 9) такое мероприятие позволило снизить неравномерности осадок до допустимых значений даже без учета жесткости расположенных выше кирпичных стен. При учете работы кирпичных стен получаемые в них напряжения практически не отличаются от результатов раздельного расчета и не превышают допустимых значений (рис. 10).

4. РАСЧЕТ ЗДАНИЙ НА СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТАХ

Рассмотрим расчет комплекса зданий на свайных фундаментах (рис. 11–13). Комплекс зданий расположен на Васильевском острове и составляет так называемый морской фасад города (рис. 11).

Комплекс составляют разноэтажные корпуса, разделенные деформационными швами, по всей площади застройки устраивается подземный гараж. Расчеты позволили оценить осадки (рис. 12) зданий с учетом взаимного влияния, а также вычислить усилия в сваях (рис. 13).

Эти усилия отличаются от полученных в результате раздельного расчета: наиболее нагруженными оказываются крайние сваи, а со

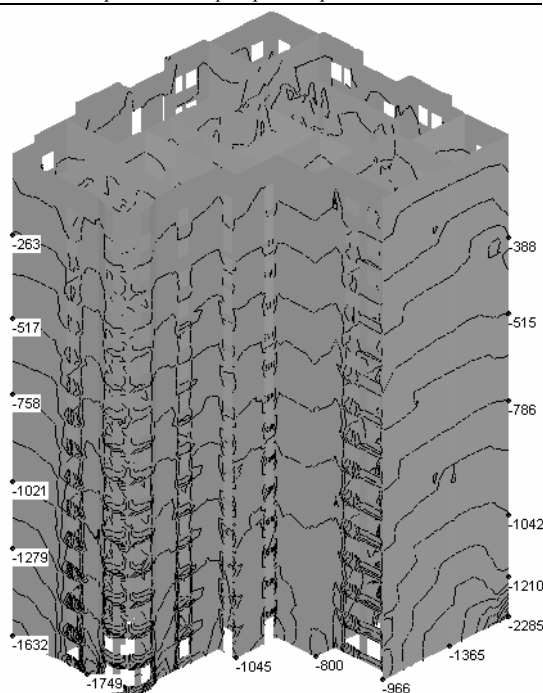


Рис. 10. Изолинии вертикальных нормальных напряжений (кПа) в кирпичных стенах здания

свай, расположенных в центре, часть нагрузок снимается. Такой эффект известен для свайных кустов. При большой длине свай он может проявляться и в пределах свайного поля.



Рис. 11. Компьютерный макет застройки

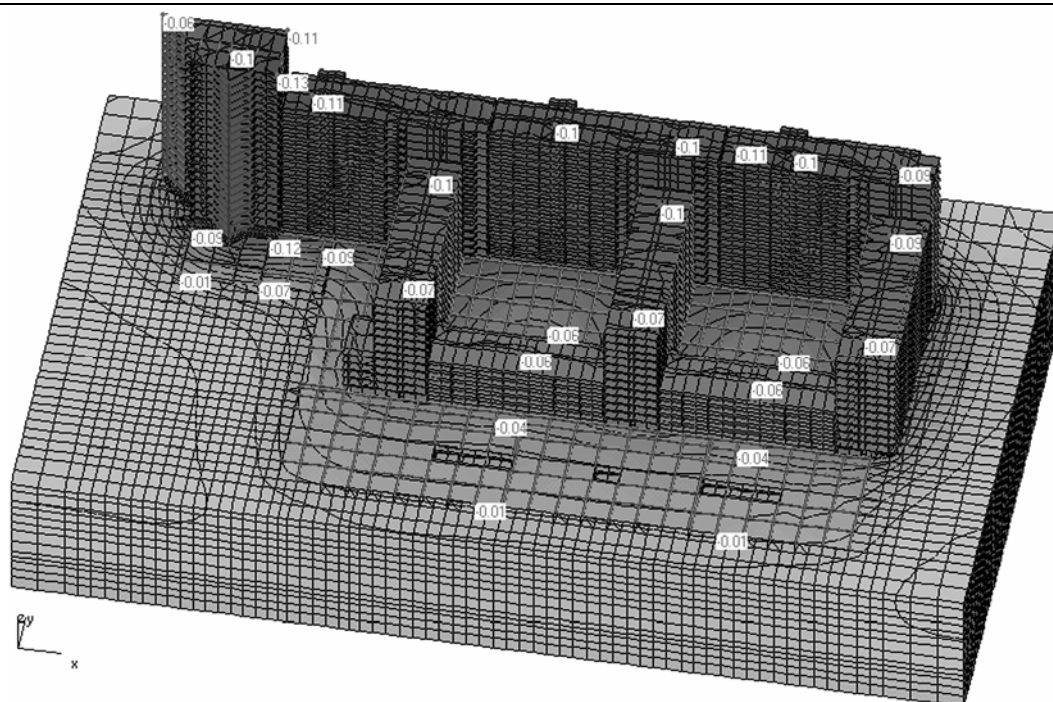


Рис. 12. Изолинии вертикальных перемещений (м)



Рис. 13. Нагрузки на сваи (тс) в области примыкания 20-ти этажного здания

5. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЙ

Особенно актуальны совместные расчеты для проектирования высотных зданий. В Петербурге в последние годы наблюдается устойчивая тенденция повышения этажности новых зданий. Строятся жилые дома и офис-

ные центры высотой 25, 27 этажей, рассматриваются проекты 120-метровых зданий.

Высотное здание обычно имеет вид башни, для которой размеры в плане существенно меньше высоты. Естественно, что грунт под фундаментами такого здания работает, как в основании жесткого штампа.

Как известно, для протяженных зданий основным критерием по II группе предельных состояний является неравномерность деформаций и, прежде всего, кривизна подошвы фундаментов. Для высотных зданий на первое место, очевидно, выходит общий крен, обусловленный перекосом фундаментов как жесткого целого.

Действующие российские нормы допускают для многоэтажных зданий любых типов крен 0,005, что, например, для строений высотой 100 м приводит к смещению поверху до 0,5 м. Очевидно, что такие допуски не подходят для высотных зданий.

Известно, что крен зданий может быть вызван:

a



б

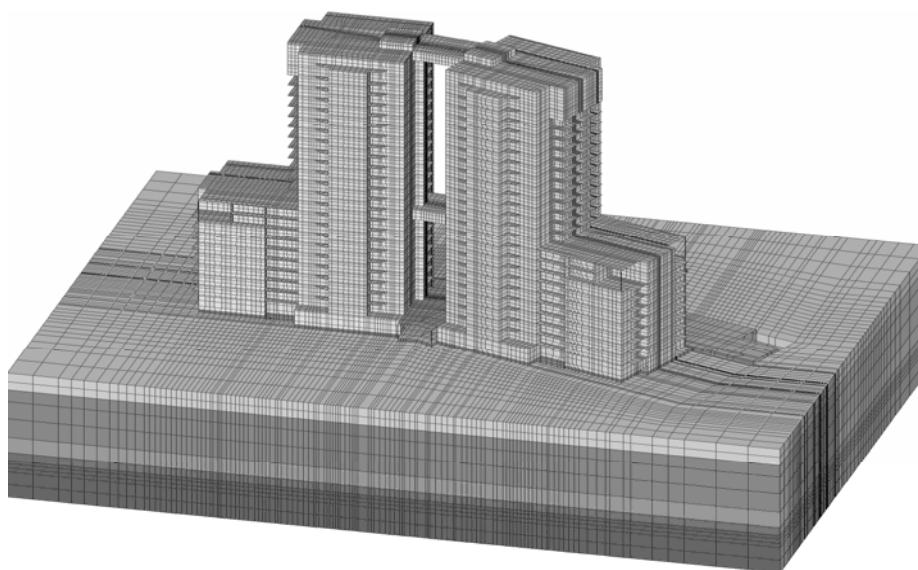


Рис. 14. Фасад здания (*a*) и расчетная схема (*б*)

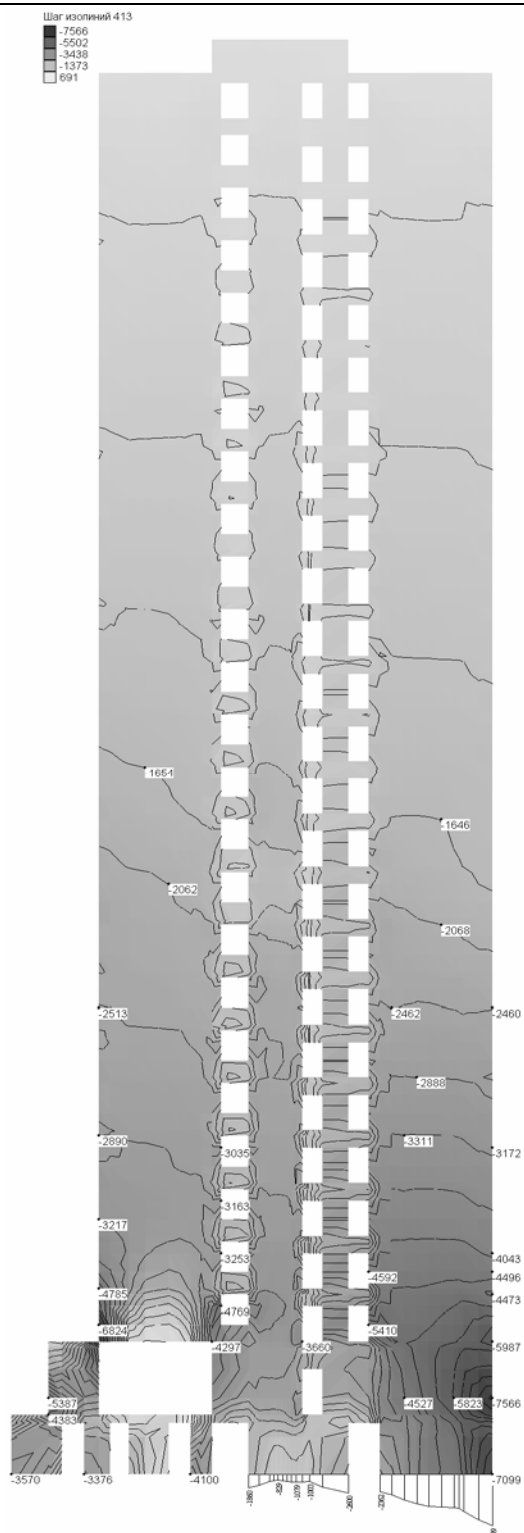


Рис. 15. Изолинии вертикальных нормальных напряжений (кПа) в поперечной стене, приводящих к неравномерному нагружению основания и крену здания вправо

пространственной неоднородностью грунтов основания;

асимметричностью поля нагрузок.

Но имеется еще одна – не столь очевидная причина развития крена: значительная асимметрия в распределении жесткостей здания. Такая ситуация была выявлена нами при расчете 25-этажного здания в Санкт-Петербурге высотой 83 м (рис. 14), которое для сложных инженерно-геологических условий региона является весьма значительным сооружением.

Здание абсолютно симметрично по архитектурно-планировочному решению, за исключением участка в одном крыле, где поперечные стены цокольного и первого этажей прорезаны значительными проемами для устройства бассейна. Это привело к перераспределению напряжений в коробке здания, в результате чего усилия передавались на основание преимущественно через более жесткие стены, не ослабленные проемами. Таким образом, нагрузка передавалась на основание эксцентрично, что привело к крену здания до 9 см поверху (рис. 15). Такой эффект может быть выявлен только при совместном расчете здания и основания.

К сожалению, в Петербурге имеются случаи, когда крен приводил к аварийной ситуации даже в случае сравнительно невысоких 17-этажных зданий. Особенно опасен крен для зданий на естественном основании (рис. 16).

Допускаемое российскими нормами развитие зон пластики под фундаментами на 1/4 ширины подошвы при оценке применимости фундаментов в виде сплошной плиты может оказаться весьма опасным. Если расчет *осадок* по упругой стадии (по методике норм) мало отличается от расчета с учетом нелинейной работы грунта (см. кривую 1 на рис. 17), то *крен* здания для этих моделей расчета различается весьма значительно: при нагрузке, равной расчетному сопротивлению, крен здания в 1,5 раза превышает расчетные ожидания по методике норм (см. кривую 2 на рис. 17).

Кроме того, крен порождает дополнительный эксцентриситет нагрузок, что способствует несимметричному увеличению зон пластики, дальнейшему перекосу фундамен-

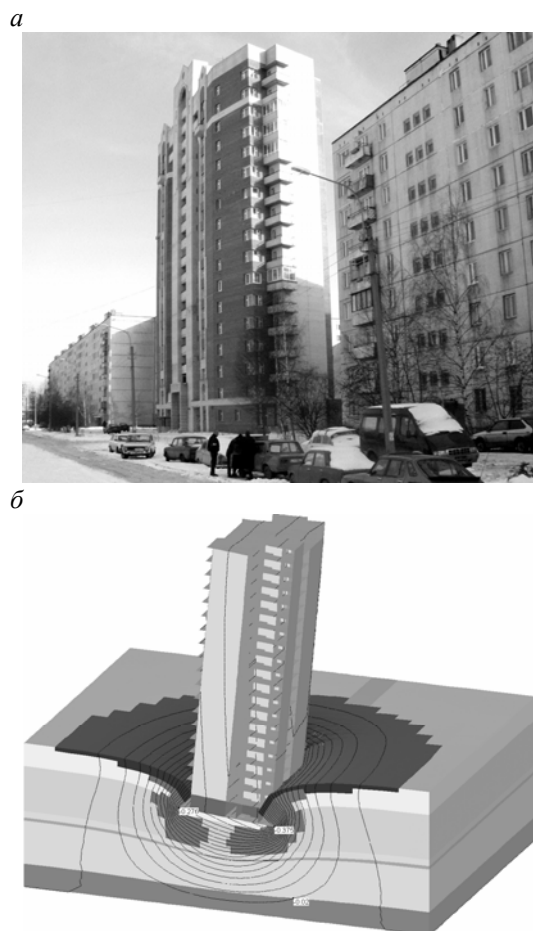


Рис. 16. Общий вид (а) и деформированная схема и изолинии осадок накренившегося здания (б)

тов. Для здания высотой 80 м при нагрузках, равных расчетному сопротивлению грунта, крен увеличивается до 2 раз по сравнению с результатами, полученными при решении упругой задачи (кривая 3 на рис. 17).

При определенных значениях прочностных свойств грунтов такой механизм становится «самозапускающимся», приводящим к потере устойчивости здания даже при формальном удовлетворении требованиям норм по I группе предельных состояний для основания. Секрет этого парадокса в том, что при расчете несущей способности по методике норм не учитывается высота здания. Теряет устойчивость не само основание, а высотное сооружение на основании. Простой иллюстрацией этого эффекта является падение карандаша, вертикально поставленного на стол, от случайного воздействия, при этом сам материал столешницы, разумеется, устойчивости не теряет.

Как видим, чрезвычайно важно обеспечить защемление здания в основании. Очевидно, что в наилучшей степени это обеспечивается свайными фундаментами, которые должны исключить эффект опрокидывания и иметь для этого соответствующее армирование.

В практику проектирования прочно вошел расчет на ветровые нагрузки, который, безусловно, необходим. Тем не менее,

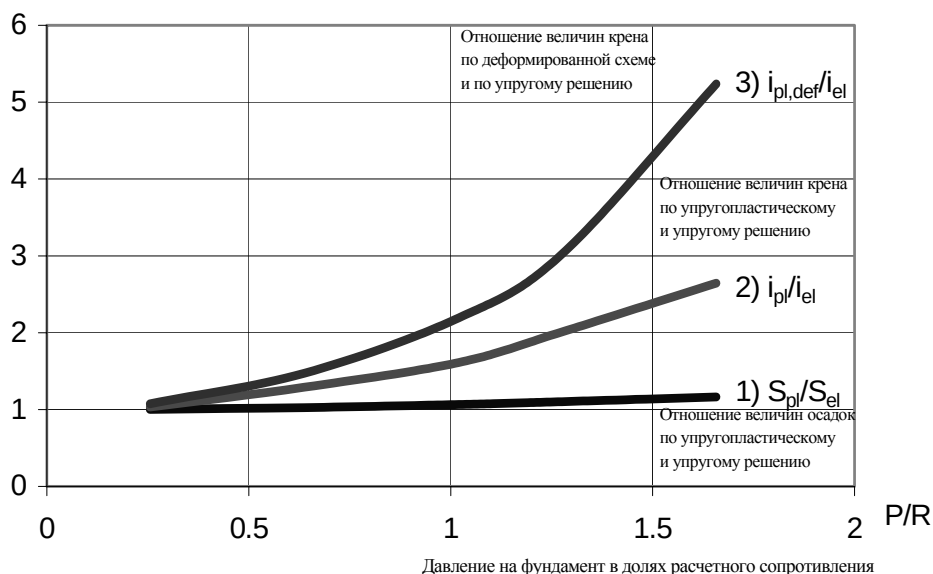


Рис. 17. Зависимости отношения величин осадок и крена по упругопластическому и упругому решениям

a



б

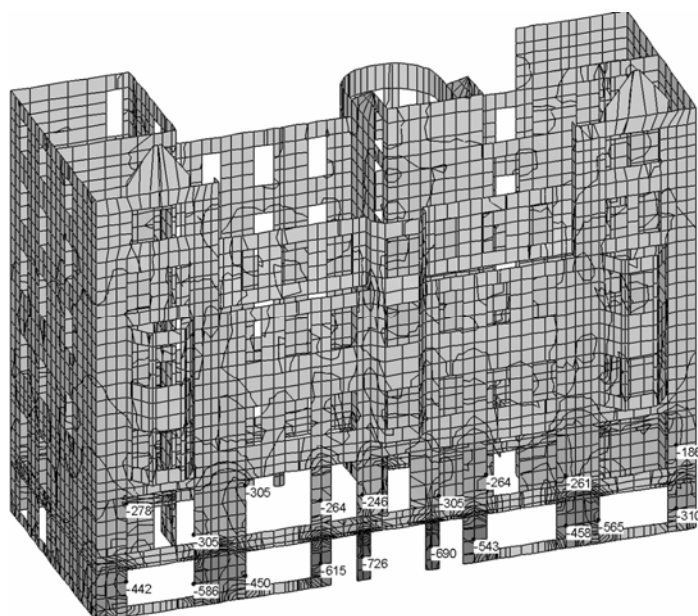


Рис. 18. Компьютерный макет здания (*a*) и изолинии вертикальных нормальных напряжений (кПа) в сохраняемых кирпичных стенах при жестком сопряжении с вновь возводимыми конструкциями (*б*)

практика показывает, что недоучет напряжений, возникающих вследствие взаимодействия жесткого здания и податливого основания, во многих случаях может оказаться гораздо опаснее, чем недоучет ветровых нагрузок.

Таким образом, успешное строительство высотных зданий невозможно без совместного расчета здания и основания.

6. СОВМЕСТНЫЕ РАСЧЕТЫ В РЕКОНСТРУКЦИОННЫХ СИТУАЦИЯХ

В заключение рассмотрим совместные расчеты в реконструкционных ситуациях. Особенностью этого класса задач является необходимость ответа на вопрос о распределении усилий между сохраняемыми фрагментами здания, элементами усиления и вновь устраиваемыми конструкциями. Такой ответ может быть получен только в результате

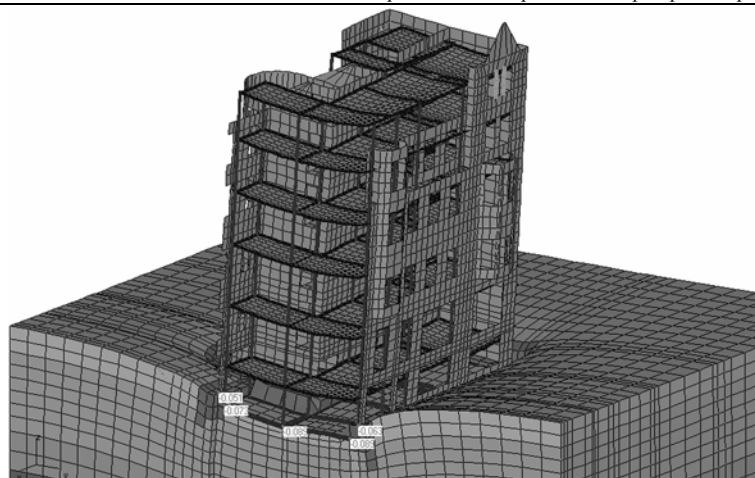


Рис. 19. Деформированная схема при жестком соединении существующих стен и каркаса (красным цветом показаны зоны предельного состояния грунта. Подписаны величины осадок в м)

совместного расчета реконструируемого здания и основания. Рассматриваемое здание расположено по адресу: Владимирский пр., 19 (рис. 18, 19). После реконструкции в нем предполагается устройство торгово-гостиничного комплекса. Основным требованием было сохранение наружных исторических стен здания. Поэтому проектом реконструкции предусмотрено устройство внутреннего несущего железобетонного каркаса. Возможны два варианта сопряжения старых и новых конст-

рукций: гибкое и жесткое. Как показал расчет, при жестком сопряжении (рис. 18) на сохраняемые стены, находящиеся в ветхом состоянии, передаются недопустимые нагрузки.

Поэтому был принят вариант гибкого сопряжения, при котором сохраняемые стены фиксируются только от горизонтальных смещений (рис. 19).

Другой пример реконструкционной ситуации – здание по ул. Большой Морской (рис. 20). В данном случае сохраняется только

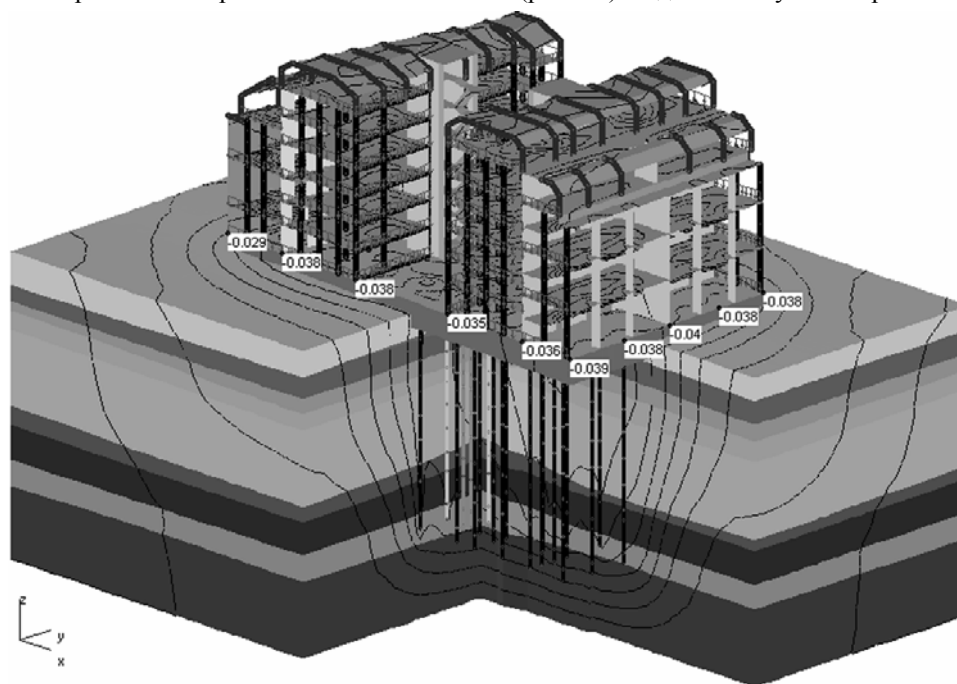


Рис. 20. Изолинии вертикальных перемещений (м) основания и здания. Под частью здания элементы основания условно не показаны

одна стена, остальные возводятся заново. Необходимость воссоздания облика здания и стремление заказчика разместить в нем как можно больше квартир привело к крайне нерегулярной конструктивной схеме (рис. 21).

Расчет такой схемы инженерными методами практически невозможен. Применение разработанной методики позволило рассчитать здание с учетом деформируемости основания и надежно спроектировать его несущие конструкции.

Совместные расчеты также позволяют выявить причины развития деформаций существующих зданий, что дает возможность принимать адекватные меры по их усилению. Численное моделирование работы конструкций здания или сооружения и его основания стало надежным обоснованием для возрождения Константиновского дворца в Стрельне и Меншиковского дворца в Ораниенбауме. Оно позволило выявить причины образования трещин в здании Биржи на Васильевском острове, а также трагического разрушения жилого дома на Двинской ул. (рис. 22).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Учет взаимодействия зданий и их оснований позволил выявить следующие основные закономерности:

- пространственная жесткость надземных конструкций здания обуславливает снижение

неравномерностей осадок по сравнению с традиционным расчетом основания на гибкие нагрузки;

- сопротивление развитию неравномерных осадок обеспечивается нижней частью здания, сопоставимой по высоте с его шириной (в соответствии с принципом Сен-Венана); здесь происходит значительное (в несколько раз) увеличение усилий преимущественно в краевых зонах, препятствующих развитию неравномерных деформаций;

- этот же эффект обуславливает возникновение наибольших усилий в краевых рядах свайного поля и разгрузку свай в его центральных зонах;

- возникновение крена здания возможно не только при неоднородном напластовании грунтов или несимметричном нагружении, но и при выраженной асимметрии жесткостных характеристик здания;

- образование локальных зон предельного состояния грунта под фундаментами высотных зданий на естественном основании может обуславливать развитие аварийных кренов здания; эти явления могут происходить без классической потери устойчивости основания;

- распределение усилий в реконструируемых зданиях между сохраняемыми и вновь возводимыми конструкциями зависит не только от их жесткостей, но и от их потенциальных осадок.

Учет этих особенностей взаимодействия

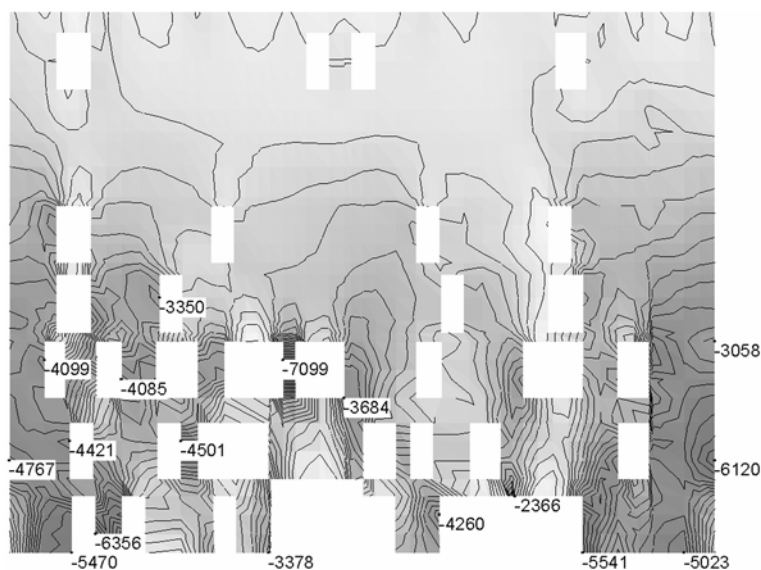


Рис. 21. Изолинии вертикальных нормальных напряжений в несущей стене здания

а



б

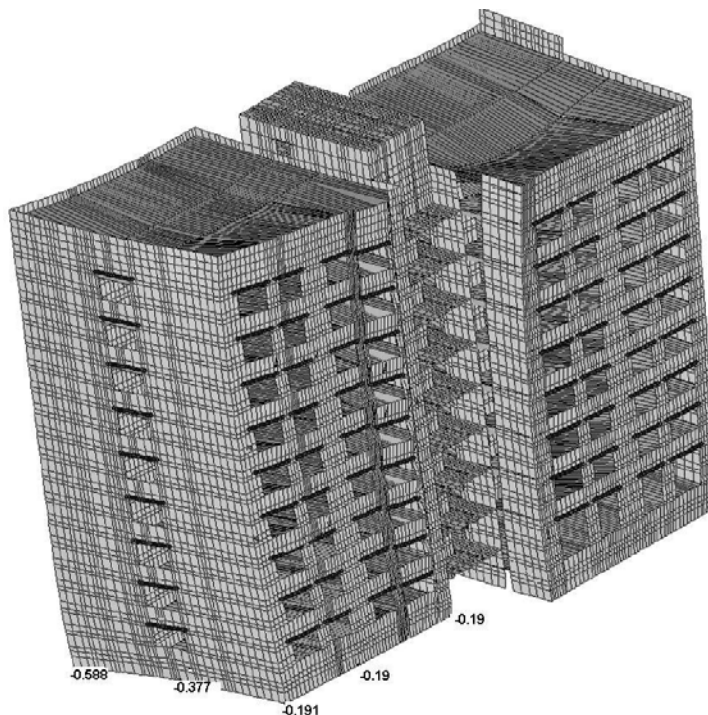


Рис. 22. Вид здания перед разрушением (а) и деформированная схема здания (по результатам расчета) в случае выноса грунта из-под подошвы фундамента (б)

здания и основания во многих случаях становится определяющим при выборе конструктивной схемы здания и типа его фундаментов. Программный комплекс FEM models позволяет не только прогнозировать работу проектируемых объектов и проводить многофакторный анализ их поведения, но и выполнять

ретроспективный поиск причин аварийных ситуаций. Этот инструмент впервые в расчетной практике делает доступным решение сложных задач пространственного расчета взаимодействия здания и его основания, обеспечивая надежность проектных решений.