

ОСНОВЫ СОВМЕСТНЫХ РАСЧЕТОВ ЗДАНИЙ И ОСНОВАНИЙ

Генеральный доклад, прочитанный на международной конференции
«Взаимодействие оснований и сооружений: Методы расчета и инженерная практика»
(Санкт-Петербург, 26–28 мая 2005 г.)

В. М. УЛИЦКИЙ – д-р техн. наук, профессор, лауреат Государственной премии РФ, научный руководитель «НПО «Геореконструкция-Фундамент-проект», зав. кафедрой оснований и фундаментов ПГУПС, председатель Городской экспертно-консультационной комиссии по основаниям, фундаментам и подземным сооружениям при Администрации Санкт-Петербурга.

Решение геотехнических задач с необходимой степенью точности расчетов требует улучшения качества инженерно-геологических изысканий и расчетных моделей механики грунтов. Доклад посвящен основам моделирования взаимодействия сооружений и оснований и рекомендациям по повышению надежности зданий, возводимых в сложных грунтовых условиях.

1. НЕМНОГО О ФИЛОСОФИИ ВОПРОСА

Процесс научного познания, как известно, начинается с *анализа феномена*, выявления отдельных закономерностей, причин и следствий. *Следующий шаг* – это *синтез*, объединение частных проявлений феномена единой теорией.

Исторически при проектировании конструкций зданий сложилось разделение труда: работу конструкций (иногда, включая фундаменты) рассматривает инженер-конструктор, а работу грунтового основания – геотехник. Такая специализация вполне понятна: конструктор имеет дело с искусственно полученными объектами – железобетонными, металлическими и другими конструкциями, а геотехник – с природной средой – грунтом. Характеристики конструкций могут быть заданы, а параметры свойств грунтов можно лишь выявить с той или иной степенью точности. Принципиально иным является и поведение грунтов под нагрузкой, которое изучает специальная научная дисциплина – механика грунтов. Работу конструкций обычно стремятся ограничить упругой областью, а механика грунтов имеет дело с нелинейно-деформируемыми средами.

© В. М. Улицкий, 2005

Механизм взаимодействия конструкторов и геотехников в российской (да и в мировой) практике обычно таков. Конструктор передает геотехнику информацию о нагрузках от здания на основание. При этом сбор нагрузок, независимо от того, выполнен он вручную или является продуктом решения конечно-элементной задачи расчета надземных конструкций, осуществляется без учета деформируемости основания. Иными словами, расчет нагрузок на основание производится так, как если бы здание стояло на некоем жестком столе. Геотехник получает эти нагрузки от здания и прикладывает их как гибкие (!) к основанию, которое моделирует, используя достижения механики грунтов. Спрашивается: какое у нас основание – абсолютно жесткое (как думает конструктор) или податливое (как справедливо полагает геотехник); какое у нас здание – гибкое (как моделирует геотехник) или конечной жесткости (как представляется конструктору)?

Выход из этой ситуации кажется весьма простым: необходимо рассчитывать здание совместно с его основанием. Это требование уже давно содержится в российских нормативных документах. Но как его реализовать?

Internet: www.georec.spb.ru

2. ОБ УПРОЩЕННЫХ МЕТОДАХ РАСЧЕТА

Исторически совместные расчеты развивались для фундаментных плит, которые бессмысленно рассчитывать без учета их взаимодействия с основанием. Для них еще в 1950–1970-х гг. были разработаны довольно эффективные методы расчета, наиболее полно использующие возможности вычислительной техники того времени. При этом пришлось пойти на существенные жертвы. Главной «жертвой» стало основание. Его упрощали по двум направлениям. Первое – основание было заменено упругой изотропной средой. Излишне говорить, что все встречающиеся в природе грунты (кроме, пожалуй, нетрещиноватых скальных) представляют собой анизотропные, слоистые, нелинейно-деформирующиеся неупругие среды.

Другое направление – введение так называемых коэффициентов постели, более удобных для численных расчетов и получивших широкое распространение. Учитывая русскую семантику термина «коэффициент постели», проиллюстрируем суть этих моделей на соответствующих примерах.

В простейшей модели Винклера реальное основание заменяется подобием пружинного дивана без обшивки. Если вы сядете на такой диван, то деформируются только те пружины, которые находятся под вами, а соседние останутся неподвижными. Очевидно, что такая вольная модель весьма условна: не приходится ожидать ни появления в расчетах мульды оседания, ни влияния на соседние здания и т. п.

Существует множество модификаций этого подхода, когда используются два или три коэффициента постели. Это все тот же пружинный диван, на который натянута обшивка определенной жесткости. Отдельные модели добавляют еще одно усложнение – что-то вроде слоя поролона поверх пружин. Это позволяет несколько приблизиться к реальности: присаживаясь на диван, вы увидите мульду оседания и повлияете на соседа по дивану. Недосток всех этих моделей очевиден: непонятно, каким образом «пружинная аналогия» отражает работу реального основания. Не вызывает сомнений,

что, манипулируя жесткостями пружин, эластичностью покрытия и т. п., можно добиться приближения к экспериментальным данным. Несколько утрируя, можно сказать, что этот метод хорош для прогноза в том случае, когда результат известен заранее. На практике существуют способы подбора коэффициентов постели, позволяющие приблизиться к решению задачи о деформировании упругого слоя.

Главное в том, что *упрощенные методы* в принципе применимы для решения единственного класса задач – для расчета фундаментальных плит. Но они абсолютно неприменимы для расчета подземных сооружений, зданий с глубокими подвалами, зданий на отдельно стоящих свайных фундаментах, для оценки влияния разделительных стенок, котлованов, подземных выработок – словом, всех других классов геотехнических задач, не говоря уже о том, что упрощенные модели не позволяют рассматривать нелинейную работу основания.

Повторим: эти методы соответствовали уровню развития вычислительной техники своего времени и с успехом применялись при проектировании множества сооружений. Сегодня возможности вычислительной техники возросли настолько, что мы имеем реальную возможность применять достижения механики грунтов при проектировании конструкций зданий и сооружений. Задача современной геотехники – научиться использовать эти возможности.

3. ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ РАСЧЕТЫ И МЕХАНИКА ГРУНТОВ

Пространственные расчеты надземных конструкций вошли в повседневную проектную практику, а пространственные расчеты оснований, к сожалению, остаются уникальными. Это не вина, а беда геомеханики. Дело в том, что достаточно подробная конечно-элементная сетка почти любого здания может уложиться в систему размерностью 200 тысяч уравнений, а моделирование основания для того же здания может потребовать решения миллиона уравнений. Поэтому до последнего времени мы могли решать задачи геомеханики только в плоской или осесимметричной

постановке. Свести же конструкции здания к этим постановкам практически невозможно.

В последние годы с появлением быстродействующей вычислительной техники и развитием эффективных математических методов решения больших систем уравнений делаются первые шаги в направлении решения пространственных задач совместного расчета.

В практику проектирования уже входят расчеты зданий на упругом слоистом основании, которое моделируется объемными конечными элементами. Это, безусловно, достижение, поскольку мы получаем возможность увидеть, как распределяются напряжения и деформации в массиве грунта. Уже в этих расчетах начинают проявляться основные эффекты взаимодействия основания и здания, на которых остановимся чуть позже.

Очевидно, что моделирование основания упругой среды является весьма смелым, хотя и привычным для геотехников, допущением. Такое допущение, введенное еще К. Терцаги и развитое в России Н. М. Герсевановым, и по сей день лежит в основе так называемых инженерных методов расчета осадок. Основоположники последних не раз подчеркивали, что эти методы позволяют получить лишь порядок ожидаемой осадки здания, а следовательно, и относительной неравномерности осадок. Не будем спрашивать у проектировщика надземных конструкций, устроит ли его такая точность, например для армирования конструкций.

Одной из главных условностей этих методов расчета осадки является ограничение мощности сжимаемой толщи. Правила определения глубины сжимаемой толщи разработаны для фундаментов на естественном основании – основного типа фундаментов в период возникновения этих методов. Поэтому они очень плохо «работают» в случае свайных фундаментов. Для глубоких свай часто оказывается, что глубина сжимаемой толщи равна нулю, следовательно, осадки также равны нулю, что не согласуется с действительностью.

При решении геотехнических задач численными методами условности ограничения сжимаемой толщи проявляются еще более отчетливо. Рассмотрим актуальный пример. Рядом с историческим зданием на естествен-

ном основании возводится новое – на сваях. Глубина сжимаемой толщи под ними разная, следовательно, они не могут существовать в рамках одной расчетной схемы.

Выход один – использовать модели работы грунта, способные автоматически локализовать активную зону основания и не требующие от расчетчика принудительного ограничения расчетной схемы снизу.

В геомеханике такие модели разработаны для нормально уплотненных и переуплотненных грунтов – это различные модификации так называемых шатровых моделей.

4. ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ СЛАБЫХ ГРУНТОВ

Родоначальниками шатровых моделей были К. Н. Roscoe и J. В. Burland (модель Сам Clay). Механизм ограничения сжимаемой толщи заложен в самой модели: с глубиной возрастает модуль деформации, а следовательно, затухают осадки.

В тех случаях, когда на территории распространены недоуплотненные грунты, эти модели требуют уточнения. В частности, в основании Петербурга залегают различные недоуплотненные грунты. Добавим, что характерной особенностью слабых петербургских грунтов является отсутствие увеличения сопротивления сдвигу с глубиной. Ярчайшим примером «нелогичного поведения» недоуплотненных грунтов на этой территории является наличие в палеодолине на Васильевском острове суглинков текучей консистенции на глубине 90 м от поверхности! Эти суглинки существуют в течение десятков тысячелетий без заметных для человеческого глаза изменений.

Это заставляет задуматься об адекватности описания поведения слабых грунтов исходя только из представления об их уплотнении. (В большинстве моделей основное внимание уделяется именно процессу уплотнения.) Однако многочисленные исследования, выполненные Р. Э. Дашко, А. В. Голли и др., свидетельствует о том, что фильтрационная консолидация в глинистых грунтах незначительно влияет на сроки существования здания. Например, под острием свай, погруженных в глинистые грунты на глубину 30 м,

классическая фильтрационная консолидация (90 %) растягивается на период более 1000 лет, что едва ли актуально для реального здания.

Считаю, что для слабых глинистых грунтов актуален следующий вопрос: *не переоцениваем ли мы значение осадок уплотнения, в то же время недооценивая деформации формоизменения.* Этот вопрос заслуживает глубокой проработки и является приоритетным для механики слабых грунтов.

Петербургская геотехническая школа активно работает в этом направлении. Созданный нами программный комплекс FEM models позволяет решать задачи совместной работы зданий и нелинейно-деформируемого основания с учетом фактора времени.

В библиотеке моделей программного комплекса содержатся различные модели грунтов – от простейших упругопластических до весьма сложных реологических, учитывающих особенности поведения слабых глинистых грунтов при нагружении.

5. ЭФФЕКТЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЗДАНИЯ И ОСНОВАНИЯ

Рассмотрим основные эффекты, проявляющиеся при совместном расчете здания и нелинейно-деформируемого основания.

Эти эффекты известны с момента появления механики грунтов. Их «новизна» является, скорее, психологической проблемой, возникшей из-за традиционной разобщенности расчетов зданий и их оснований. В любом учебнике по механике грунтов мы обнаружим хорошо известную эпюру контактных давлений под жестким штампом. Для теоретического решения упругой задачи она имеет параболический вид с выходом в бесконечность в краевых зонах. Для реальных грунтов она имеет характерную седлообразную форму, которая изменяется при значительных давлениях, когда здание близко к состоянию потери устойчивости. Очевидно, что усилия в самом штампе будут такими же. Поэтому не стоит удивляться, если при замене штампа реальной

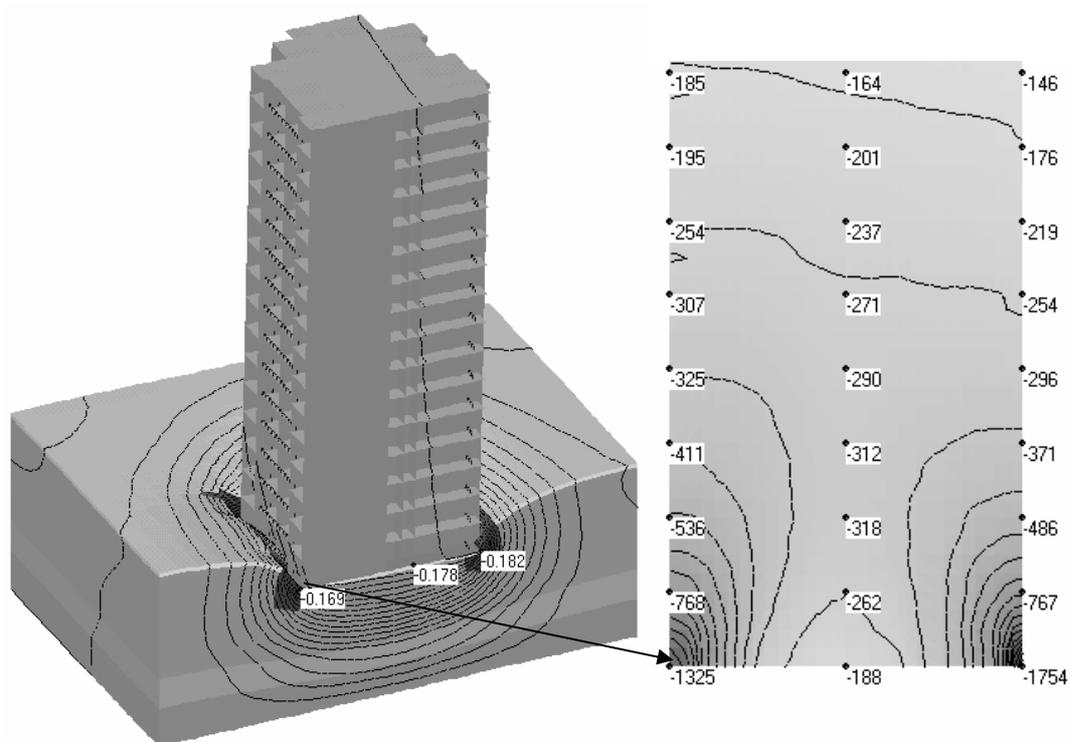


Рис. 1. Изолинии осадок (м) при совместном расчете здания на плитном фундаменте и основания и изолинии вертикальных усилий (кН/м) в поперечной стене

конструкцией здания вертикальные нормальные напряжения в краевых зонах окажутся сильно увеличенными. Увеличение проявляется в зоне, высота которой примерно равна ширине здания. Эта фундаментальная закономерность характерна для зданий как на естественном основании, так и на свайных фундаментах.

В свайном поле эффект жесткости здания приводит к увеличению нагрузок на сваи краевых зон и разгрузке свай в центре здания. Этот общепризнанный факт подтвержден многочисленными измерениями.

При всей простоте и ясности описанного эффекта решение задачи является достаточно сложным. А ведь проектировщику важно не абстрактное знание о наличии эффекта, а его конкретное численное значение.

Чтобы использовать современные нелинейные модели механики грунтов, нам следует перестроить на европейский лад всю практику определения свойств грунтов. Согласитесь, что нелепо иметь в руках тонкий инструмент для расчета оснований, а параметры свойств грунтов брать «с потолка». Сегодняшняя отечественная практика инженерно-геологических изысканий грешит нелюбовью к исследованию механических свойств грунтов. *Но пока мы не повысим уровень изысканий, бессмысленно говорить о точности*

геотехнических расчетов. Кроме того, следует накапливать результаты наблюдений за осадками уникальных зданий и рядовой застройки – это создает базу для совершенствования геотехнических моделей.

Механика грунтов располагает моделями для расчета осадок во времени, но отсутствие реологических параметров грунтов в практике изысканий исключает возможность таких расчетов.

Сегодняшний прогноз конечной осадки зачастую напоминает остановившиеся часы, которые дважды в сутки показывают абсолютно точное время. Всякая предсказанная осадка (особенно для слабых грунтов) когда-нибудь произойдет. При этом в самом невыгодном положении оказываются геотехники, точно предсказавшие осадку, поскольку они рискуют не дожить до ее появления.

6. РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Не хотелось бы, чтобы конструкторы подземной части здания заподозрили нас, геотехников, в посягательстве на их сферу деятельности. Геотехник обычно вполне доволен, если ему удастся правильно предсказать величину абсолютной осадки. Конструктора же волнует ее неравномерность и в его

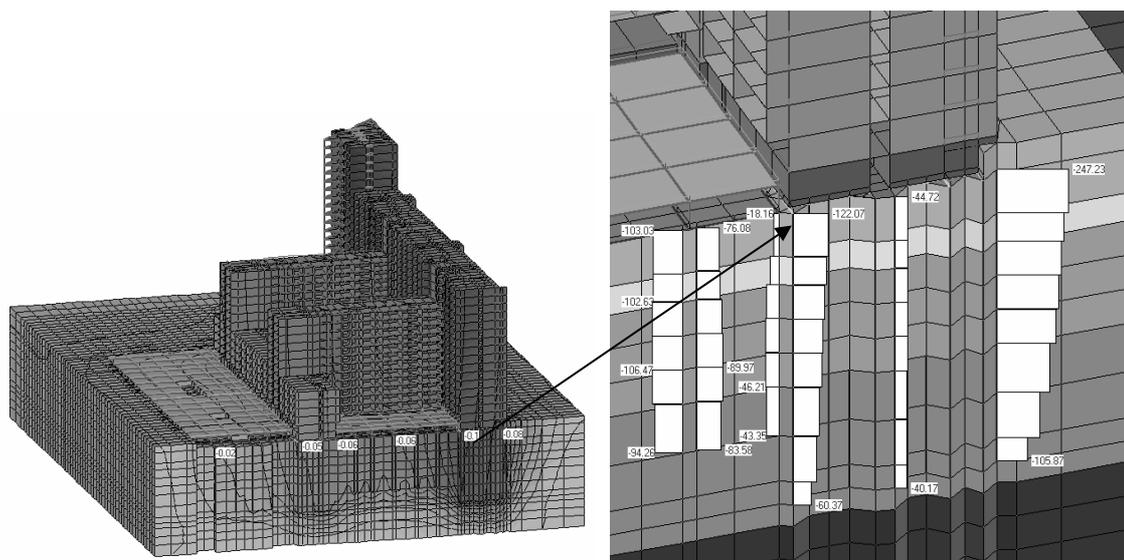


Рис. 2. Изолинии осадок (м) при совместном расчете группы зданий на свайном фундаменте и основания и эпюры продольных усилий по длине свай

интересах сотрудничать с геотехником, поскольку неравномерность может быть получена только из совместного расчета.

Разумеется, невозможно дать рекомендации проектировщику на все случаи жизни: особенности взаимодействия зданий и оснований многообразны, и каждый случай заслуживает отдельного рассмотрения.

Тем не менее, особое внимание конструктора должно быть уделено нижней части здания (по высоте примерно равной ширине), в которой наблюдаются концентрации напряжений, обусловленные эффектом совместной работы. В этой зоне следует повышать жесткость и прочность конструкций, стремясь к формированию жесткого «постаменты» для вышерасположенных конструкций (последние в этом случае можно проектировать по привычной схеме). В краевых зонах свайного основания количество свай целесообразно увеличивать.

Оригинальное предложение по выравниванию усилий в сваях было сделано профессором Р. Катценбахом при проектировании фундаментов высотных зданий во Франкфурте-на-Майне. В однородном грунте он предложил устроить свайное поле с существенным увеличением длины свай к центру здания. В

условиях Санкт-Петербурга этот подход следует применять с осторожностью, поскольку мы рискуем расположить острия свай в крайне разнородных грунтах.

Совместные расчеты важны на всех этапах строительства здания. Взаимодействие основания и конструкций необходимо рассматривать при расчете подземных сооружений, ограждений котлованов и т. п. Эти вопросы, относящиеся к так называемой технологической механике грунтов (термин введен академиком В. А. Ильичевым), особенно нуждаются в учете фактора времени. Очевидно, что в процессе изготовления сваи или при устройстве котлована грунт работает иначе, чем при долговременном нагружении. Последовательность технологических этапов не сводится к суперпозиции отдельных задач. Каждый последующий расчет должен учитывать результаты предыдущих.

Важное значение имеют совместные расчеты в задачах динамики, например при расчетах высотных зданий при пульсационной составляющей ветра. Учет взаимодействия здания и основания вносит существенные коррективы в частоты и амплитуды колебаний высотных зданий от ветровых нагрузок.

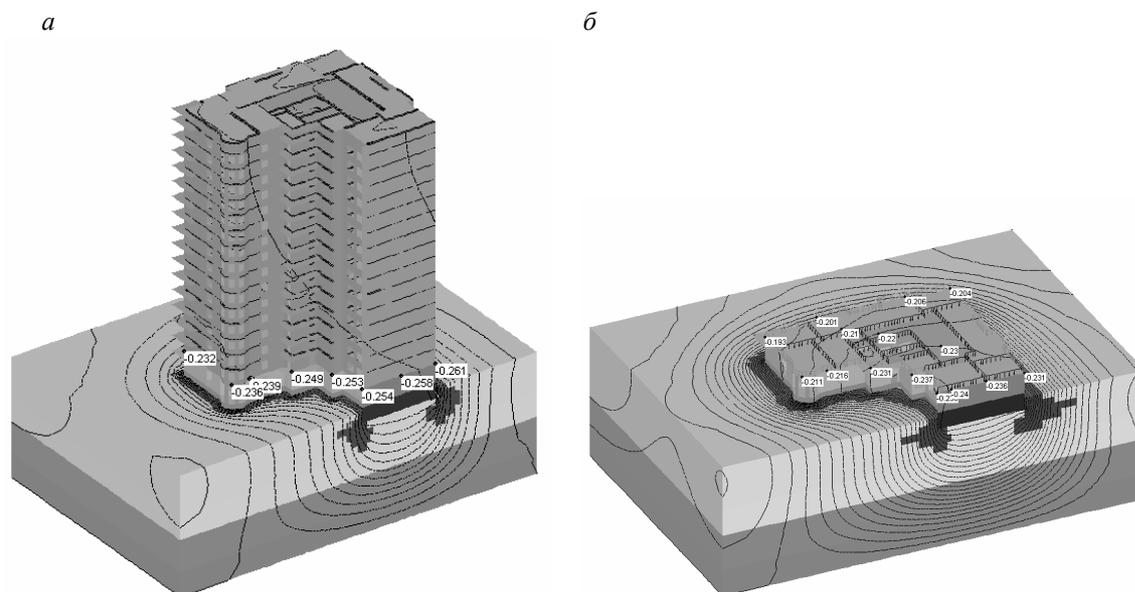


Рис. 3. Изолинии осадок кирпичного здания (м) при устройстве в пределах нижних этажей жесткой железобетонной конструкции: *a* – с учетом жесткости всей конструкции; *б* – без учета жесткости расположенных выше кирпичных стен

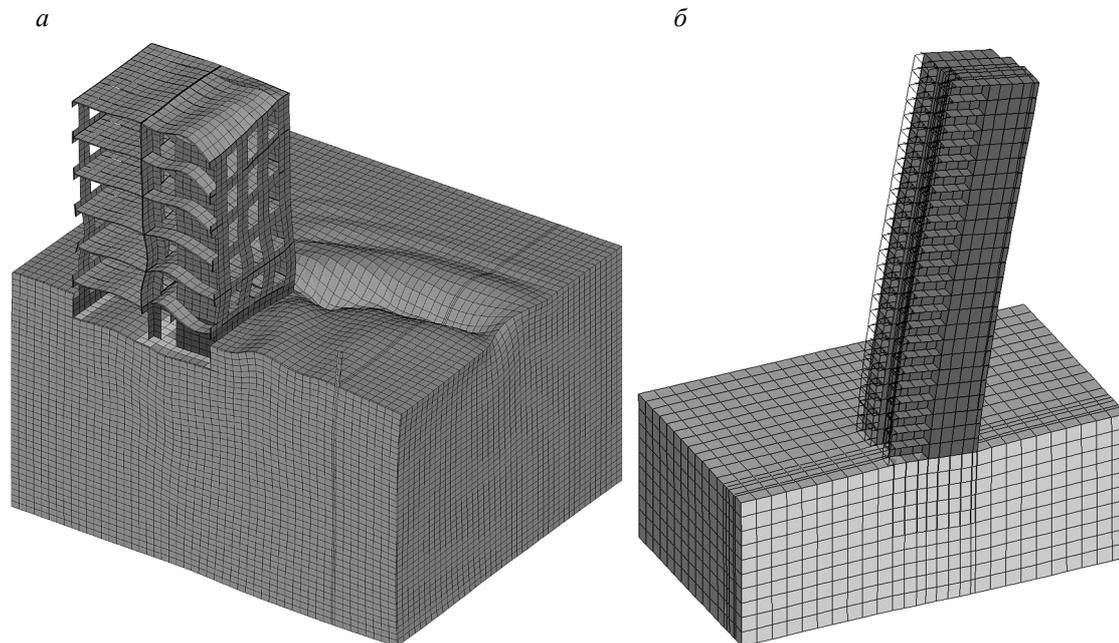


Рис. 4. Примеры динамических задач взаимодействия здания и основания: колебания здания при забивке свай (промышленная сейсмика) (а); колебания здания при пульсации ветровой нагрузки (б)

Развитие вычислительной техники, появление таких программных комплексов, как Fem models, является залогом того, что в ближайшее время совместные расчеты станут неотъемлемой составляющей всякого проектного процесса. Надо отвыкать от мысли о том,

что совместные расчеты – это расчеты на винклеровских пружинах. Мы обязаны использовать возможности современной вычислительной техники и внедрять в расчеты достижения механики грунтов.