

УДК 624.151.6

*З.Г. ТЕР-МАРТИРОСЯН, д-р техн. наук, А.З. ТЕР-МАРТИРОСЯН, канд. техн. наук,  
Московский государственный строительный университет*

## Некоторые проблемы подземного строительства

*Приведена количественная оценка взаимодействия подземной и надземной частей высотных зданий и сооружений повышенной ответственности с развитой подземной частью, возводимых в глубоких котлованах. Показано, что основной задачей при этом является количественная оценка напряженно-деформированного состояния, далее (НДС) массива грунта, вмещающего подземную часть с учетом их взаимодействия. Такая оценка необходима для определения равномерных и неравномерных осадок, а также НДС несущих конструкций подземной и высотной частей на всех этапах строительства. Она связана с решением комплекса вопросов, в том числе инженерных изысканий, архитектурно-конструкторских разработок и расчетно-теоретических исследований НДС системы «массив – подземная и надземная части», далее (система) с привлечением современных методов численного моделирования с помощью программных комплексов, в том числе Plaxis, Ansys, FLAC и др. Приведены примеры решения таких задач в ходе научного сопровождения проектов и строительства некоторых высотных зданий с развитой подземной частью, выполненные кафедрой механики грунтов, оснований и фундаментов МГСУ (МИСИ) за последние десятилетия.*

**Ключевые слова:** научно-техническое сопровождение, подземное строительство, глубокие котлованы, геотехнические изыскания.

Мировой опыт строительства и эксплуатации крупномасштабных и тяжелых сооружений (ГЭС, АЭС, ТЭС и др.), а также высотных зданий с развитой подземной частью показывает, что во многих случаях негативные явления (чрезмерные и неравномерные осадки, крен и др.) связаны с недостаточной изученностью инженерно-геологических условий площадки строительства, геомеханических процессов и ошибочной оценкой расчетных параметров грунтов, слагающих рассматриваемый массив, необходимые для достоверной оценки его напряженно-деформированного состояния (НДС).

Отличительная особенность высотных зданий и комплексов с развитой подземной частью заключается в том, что они, как правило, возводятся в глубоких котлованах (до 30 м), имеют большую площадь опирания (более 50 тыс. м<sup>2</sup>) и передают значительные нагрузки (до 1000 кПа) на грунты основания. При этом во взаимодействие с подземной частью высотного здания вовлекаются огромные массивы грунта как под фундаментом, так и за ограждением котлована, объемом десятки тысяч кубометров.

При взаимодействии грунтового массива с вмещаемой подземной частью в них формируется сложное НДС, которое трансформируется в пространстве и во времени в период строительства и эксплуатации высотного здания и стабилизируется длительное время после завершения строительства и ввода в эксплуатацию здания.

В результате на контакте фундамента и основания возникают равномерные и неравномерные напряжения и осадки, а также осадки земной поверхности за ограждением котлована, включая дополнительные осадки окружающих застроек. Достоверность и точность количественной оценки этих перемещений определяют безопасность и нормальные условия эксплуатации надземной части здания. Она связана с многочисленными факторами, в том числе с:

- конструктивными особенностями здания, т. е. его габаритами (высота, площадь), а также с глубиной подземной части и технологией ее устройства;
- инженерно-геологическими (ИГ) и гидрогеологическими (ГГ) условиями площадки строительства;
- правильным выбором расчетной геомеханической модели при численном моделировании НДС массива, вмещающего подземную часть, т. е. с его размерами, граничными условиями, геологическим строением, исходным НДС, наличием в расчетной области карста и др.;
- правильным выбором и определением расчетных параметров физико-механических свойств грунтов, слагающих рассматриваемый массив, в том числе деформационные и прочностные в реальном диапазоне действующих (исходных) и дополнительных напряжений;
- использованием современных лабораторных и полевых методов испытания грунтов, в том числе компрессионного и трехосного сжатия, одноплоскостного среза в статическом и динамическом режимах нагружения с программным управлением;
- использованием современных численных методов математического моделирования НДС неоднородных массивов (МКЭ, МГЭ, МКР) с учетом взаимодействия подземной и высотной частей здания, а также поэтапности строительства, реализуемых с помощью программных комплексов Plaxis, Ansys, FLAC и др.

Следует отметить, что учет этих факторов в научных сопровождениях проектов и строительства высотных зданий в Москве, Санкт-Петербурге и Казани успешно осуществлялся в последние десятилетия сотрудниками кафедры «Механика грунтов, оснований и фундаментов» Московского государственного строительного университета. Возможности учета этих факторов еще больше расширились благодаря открытию в 2011 г. научно-образовательного центра (НОЦ)

«Геотехника» при Институте гидротехнического и энергетического строительства (ИГЭС) МГСУ под научным руководством д-ра техн. наук, профессора З.Г. Тер-Мартirosяна и д-ра техн. наук, профессора А.Д. Потапова. Руководителем центра назначен канд. техн. наук А.З. Тер-Мартirosян. Центр оборудован самыми современными приборами из Германии и России для испытания грунтов в условиях компрессионного и трехосного сжатия, в том числе несимметричного трехосного сжатия для испытания образцов кубической формы ( $10 \times 10 \times 10$  см) и одноплоскостного среза с программным управлением испытания при широком диапазоне нагрузок, в том числе при ступенчатом, с заданной скоростью нагружения, а также при циклическом и вибрационном (от 0,01 до 100 Гц) воздействиях. Последние позволяют определить параметры виброползучести грунтов.

Ниже приведены анализ и оценка степени влияния некоторых упомянутых выше факторов, влияющих на результаты количественного прогноза взаимодействия массива грунта с подземной и надземной частями высотного здания на различных объектах строительства высотных зданий с развитой подземной частью.

#### Инженерно-геологические и гидрогеологические условия площадки строительства

Известно, что ИГ и ГГ условия площадки строительства являются основным и определяющим фактором при выборе конструкции подземной части и технологии ее устройства. Поэтому изыскателям следует обратить особое внимание на достоверную оценку геологического строения и гидрогеологических условий, на расчетную глубину активной зоны [1], определение расчетных параметров физико-механических свойств грунтов, слагающих рассматриваемый массив, с учетом истории его формирования, т. е. исходного НДС. При этом инженерно-геологические изыскания следует выполнять совместно с проектной организацией, чтобы учесть все особенности взаимодействия будущего сооружения с грунтовым основанием. А в особых случаях целесообразно привлекать геотехников, специализирующихся в области подземного строительства, в том числе строительства в глубоких котлованах.

На количественную оценку НДС грунтового массива, вмещающего подземную часть, существенное влияние оказывает история образования массива, т. е. исходное НДС. Оно характеризуется коэффициентом бокового давления в условиях естественного залегания, который колеблется от 0,5 до 1 в нормально уплотняемых грунтах в зависимости от плотности-влажности и от 1 до 1,5 в переуплотненных грунтах. Расчеты показывают, что учет исходного коэффициента бокового давления может до двух раз уменьшить прогнозируемую осадку основания [1].

В отчетах по ИГ изысканиям для высотного строительства часто приводится сводная таблица физико-механических свойств грунтов площадки строительства без учета особенностей высотного строительства. Испытания грунтов часто проводятся в пределах стандартных нагрузок до 300 кПа, независимо от глубины отбора образца, глубины котлована, нагрузки от сооружения. Такие испытания приводят к грубым ошибкам при определении деформационных параметров грунтов, т. е. к заниженным параметрам. Рассчитанные на этой основе осадки оказываются выше допустимых и поэтому проектировщики часто принимают оши-

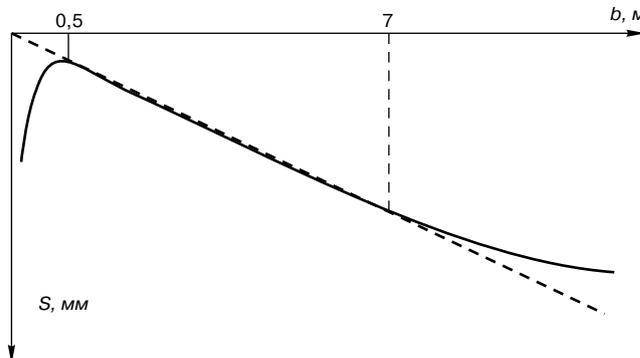


Рис. 1. Зависимость осадки  $S$  фундаментов от его ширины  $b$

бочное решение в пользу дорогостоящего, технологически сложного свайно-плитного фундамента с огромным запасом по устойчивости и по осадкам. Между тем в современных программных комплексах возможно использование более совершенных нелинейных грунтовых моделей с учетом реологических свойств. Правильное их использование дает возможность более точно моделировать поведение грунтов основания, что в свою очередь может привести к значительной экономии и снижению запасов, т. е. в частном случае к замене плитно-свайного фундамента более экономичным и технологичным плитным фундаментом. Практика научного сопровождения МГСУ имеет многочисленные успешные решения по обоснованию изменения проектных решений в пользу плитных фундаментов или плитно-свайных с меньшим количеством свай. Однако, современные модели требуют специальных лабораторных исследований для определения расчетных параметров, входящих в эти модели. К сожалению, на данный момент нормативная литература не полностью отражает весь спектр специальных испытаний, поэтому лишь малый круг специальных лабораторий может выполнять такие испытания.

Из практики авторов только в Москве можно отметить ряд объектов повышенной ответственности, где было принято решение об отмене свайного основания. Наблюдения за осадками этих высотных зданий показывают, что фактические осадки фундаментов меньше прогнозируемых. В качестве примера можно привести высотное здание на Ленинградском просп. (38 этажей и 3 подземных); комплекс высотных зданий на ул. Маршала Рокоссовского (четыре высотных здания 34–38 эт. с тремя подземными этажами) и др. [1].

Отметим, что в процессе строительства здания на Ленинградском просп. под фундаментной плитой и в несущих конструкциях установлены высокочувствительные волоконно-оптические датчики для измерения контактных напряжений под плитным фундаментом и в несущих конструкциях [2]. Одновременно проводились геодезические наблюдения за осадками и креном плитного фундамента. Информация о НДС здания записывалась в специально оборудованном центре наблюдения, куда стекалась вся информация из установленных датчиков с помощью волоконно-оптических кабелей. В настоящее время центр функционирует более 10 лет: НДС здания в целом находится в удовлетворительном состоянии.

Следует отметить, что в некоторых случаях при количественной оценке НДС оснований высотных зданий авторами скорректированы расчетные модули деформации, полученные по результатам лабораторных испытаний. Такая коррекция обосновывается масштабным фактором, соглас-

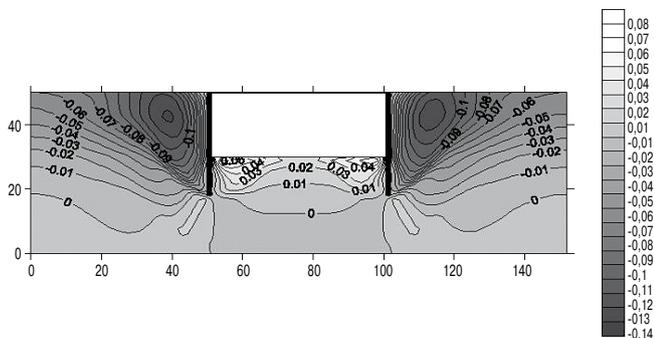


Рис. 2. Изолинии вертикальных перемещений массива грунта (м) при устройстве котлована и водопонижении

но которому с ростом площади фундамента осадка его растет не прямо пропорционально площади фундамента, а нелинейно (рис. 1).

Известно, что с ростом площадки фундамента растет глубина его влияния, следовательно, в расчет осадки вовлекаются глубокие слои, имеющие повышенный модуль деформации. Опыт научного сопровождения проектов строительства высотных зданий показывает, что расчетные модули деформаций под плитными фундаментами можно увеличить до двух и более раз [1]. Это подтверждается результатами измерения фактических осадок высотных зданий, построенных в Москве. Кроме того, осадка фундамента уменьшается с ростом глубины заложения. Например наблюдение за осадками фундаментов комплекса высотных зданий на ул. Маршала Рокоссовского в Москве (секция В) позволило установить, что прогнозируемая расчетная осадка четырех секций в среднем составляла 17 см, а фактическая – 9 см.

### Особенности НДС подземной части высотных зданий и сооружений повышенной ответственности

Формирование НДС грунтового массива и подземных конструкций, взаимодействующих с ним, проходит в несколько этапов, основными из которых являются:

- устройство ограждающей конструкции и водопонижения внутри и за пределами котлованов (в случае необходимости);
- выемка грунта из котлована с закреплением стенок распорными конструкциями или анкерами на нескольких уровнях котлована с устройством распределительных поясов;
- строительство подземной части здания, в том числе плитного фундамента, несущих конструкций (колонны, стены и плиты межэтажных перекрытий, распределительной плиты) и начало строительства надземных этажей;
- возведение надземных этажей, устройство ограждающих стен и коммуникаций.

На всех этих этапах формирования НДС грунтового массива и подземных конструкций существуют особенности, которые следует количественно оценить и управлять (в случае необходимости) путем регулирования темпа строительства, а в некоторых случаях локальным изменением гидрогеологических условий, или локальным изменением свойств подстилающих грунтов под плитным фундаментом или адресно в заданную точку грунтового массива путем нагнетания цементного раствора.

Разумеется, на всех этих этапах следует организовать и провести режимные инструментальные наблюдения (мо-

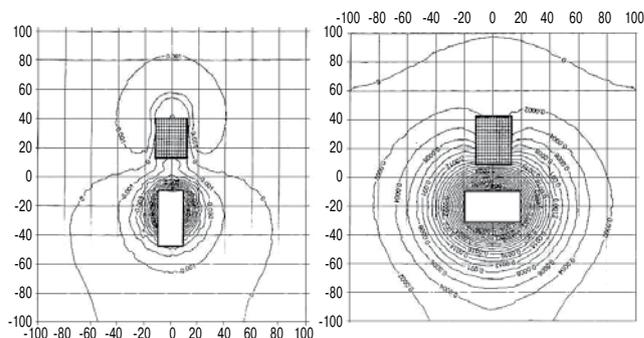


Рис. 3. Изолинии осадок поверхности земли вокруг котлована и расположенного вблизи него здания (м)

нитинг) за НДС подземной и надземной частей окружающих зданий, в том числе с использованием геодезических высокоточных приборов и специальных датчиков.

Количественная оценка НДС грунтового массива и подземных конструкций с учетом их взаимодействия поэтапно и непрерывно возможна только с использованием специальных программных комплексов Plaxis, Ansys Civil FM, FLAC и др. в линейной и нелинейной постановке и при любой неоднородности строения массива, включая образования карстовых полостей. Кроме того, эти программы позволяют определить компоненты напряжений, деформаций и перемещений в любой точке расчетной области и на каждом этапе формирования НДС массива в надземных конструкциях, в том числе в плитном фундаменте и ограждающей и несущей конструкциях. Многолетнее использование программного комплекса Plaxis 2d и 3d, в том числе последних версий в МГСУ, позволяло на высоком научном и практическом уровне осуществить научное сопровождение проектных решений и строительства на многих объектах высотного строительства в Москве. В том числе корректировать значения конечных осадок по данным мониторинга на различных этапах строительства путем пересчета реальных параметров грунтового основания.

С точки зрения устойчивости грунтов основания и влияния на окружающую застройку наиболее ответственными являются этапы строительного водопонижения и выемки грунта из котлована. В первом случае возможно образование депрессионной воронки, вследствие которого происходит оседание земной поверхности вокруг котлована и окружающих зданий и коммуникаций. Во втором случае оседание земной поверхности связано с нарушением равновесия внутри и за пределами котлована и может сопровождаться упругими деформациями подъема дна котлована, а в случае сравнительно слабых грунтов выпором этих грунтов и просадкой окружающих грунтов. В случае наличия на дне котлована водонепроницаемого слоя, подстилаемого водоносным напорным горизонтом, необходимо проверить условия выпора непроницаемого слоя.

На стадиях строительства подземной и высотной частей здания, начиная с момента устройства фундаментной плиты и до завершения строительства, происходят непрерывные изменения НДС в расчетной области, в том числе под плитным фундаментом. Контактные напряжения растут и трансформируются по мере роста подземных и надземных этажей, обусловленные ростом их пространственной жесткости. Поэтому при расчете фундаментных плит осадка контактные напряжения и коэффициенты постели следует определить с учетом жесткости подземной части зда-

ния, а нагрузку от подземной и надземной частей следует приложить на уровне 4–5-го этажа надземной части здания.

На рис. 2, 3 приведены примеры расчета НДС массива грунта за ограждением и внутри котлована на стадиях строительного водопонижения и в момент завершения выемки грунта из котлована.

В заключение отметим, что в рамках объема настоящей статьи трудно изложить степень влияния всех факторов, влияющих на НДС массива грунта и вмещенной подземной части высотного здания. К таким относятся влияние динамических воздействий различного происхождения в мегаполисах, вызывающих виброползучесть песчаных грунтов и разжижение мелкозернистых песчаных грунтов, наличие карсто-суффозионных процессов в грунтовой толще и др. Эти вопросы подробно изложены в [2–6].

### Выводы

Строительство высотных зданий с развитой подземной частью в сложных инженерно-геологических условиях мегаполисов связано с решением задачи по количественной оценке взаимодействия надземной и подземной частей здания с окружающим грунтовым массивом на всех этапах строительства с учетом многочисленных факторов в линейной и нелинейной постановке. Такая оценка связана с расчетом НДС массива численными методами с использованием только специальных программных комплексов Plaxis, Ansys, FLAC и др. Основными и определяющими факторами, влияющими на достоверность количественной оценки НДС, являются оценка инженерно-геологических и гидрогеологических условий площадки строительства и расчет-

ные параметры грунтов, слагающих рассматриваемый массив, входящих в принятые расчетные модели грунтов. Количественная оценка НДС надземной части высотного здания без учета взаимодействия с подземной частью и окружающей ее грунтовым массивом приводит к грубым ошибкам, а порой к аварийной ситуации.

### Список литературы

1. Тер-Мартirosян З.Г. Механика грунтов. М.: АСВ, 2009. 550 с.
2. Тер-Мартirosян З.Г., Егоров Ф.А., Поспелов В.И., Неугодников А.П. Мониторинг НДС многофункционального высотного комплекса волоконно-оптическими датчиками // Технологии строительства. 2007. № 2. С. 12–18.
3. Ильичев В.А., Коновалов П.А., Никифорова Н.С. Прогноз деформаций зданий вблизи котлованов в условиях плотной застройки Москвы // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2004. № 4. С. 17–21.
4. Тер-Мартirosян З.Г., Струнин П.В., Чинь Туан Вьет. Сжимаемость материала сваи при определении осадки в свайном фундаменте // Жилищное строительство. 2012. № 10. С. 13–15.
5. Тер-Мартirosян З.Г., Крыжановский А.Л. Решение задачи обеспечения геомеханической безопасности сооружений повышенной ответственности // Промышленное и гражданское строительство. 2007. № 2. С. 56–58.
6. Катценбах Р., Леипла Ш., Фоглер М., Дунаевский Р.А., Куттиг Х. Опыт оптимизации стоимости фундаментов высотных зданий // Жилищное строительство. 2010. № 5. С. 5–8.

**23 – 26 ОКТЯБРЯ 2013, г. СОЧИ**  
Павильоны у Морпорта

**SOCHI BUILD**  
XIII МЕЖДУНАРОДНЫЙ СТРОИТЕЛЬНЫЙ ФОРУМ

**СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ ВЫСТАВКИ**

- АРХИТЕКТУРА. СТРОИТЕЛЬСТВО. БЛАГОУСТРОЙСТВО
- СТРОИТЕЛЬНЫЕ И ОТДЕЛОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ОБОРУДОВАНИЕ
- КЛИМАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ. ТЕПЛО-, ГАЗО-, ВОДОСНАБЖЕНИЕ
- ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЕ И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА
- СТРОЙСПЕЦТЕХНИКА. ДОРОГА. ТОННЕЛЬ
- ДИЗАЙН ИНТЕРЬЕРА, ЭКСТЕРЬЕРА. ДЕКОР
- ЗАГОРОДНОЕ ДОМОСТРОЕНИЕ. ЛАНДШАФТНЫЙ ДИЗАЙН
- ЭКОЛОГИЯ. БЕЗОПАСНОСТЬ

Партнер:

Официальный партнер:

При поддержке:

Генеральный информационный спонсор:

Главный информационный партнер:

Специальный информационный партнер:

Региональный информационный партнер:

Выставочная компания «Сочи-Экспо ТПП г. Сочи», тел./факс: (862) 264-87-00, 264-23-33, 264-75-55, (495) 745-77-09, e-mail: m.lepikova@sochi-expo.ru; www.sochi-expo.ru