

## ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ФУНДАМЕНТОВ ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЙ С УЧЕТОМ РАБОТЫ НАДЗЕМНЫХ КОНСТРУКЦИЙ В ИНЖЕНЕРНО- ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

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

**К. Г. ШАШКИН** – канд. техн. наук, член РОМГГиФ, руководитель отдела сложных геотехнических расчетов НПО «Геореконструкция–Фундаментпроект», г. Санкт-Петербург.

**В. А. ВАСЕНИН** – канд. техн. наук, член РОМГГиФ, ведущий специалист отдела сложных геотехнических расчетов НПО «Геореконструкция–Фундаментпроект», г. Санкт-Петербург.

Рассмотрены возможные варианты устройства фундаментов высотных зданий в инженерно-геологических условиях Санкт-Петербурга. Приведен пример расчетного обоснования строительства высотного здания в крайне сложных инженерно-геологических условиях при залегании относительно прочных пород на глубинах более 100 м.

### ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ФУНДАМЕНТОВ ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЙ В ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

Проектирование и устройство фундаментов высотных зданий вне зависимости от вида оснований представляет собой достаточно сложную инженерную задачу. Традиционно предпочтение отдается участкам, где достаточно близко к поверхности залегают прочные малосжимаемые грунты и горные породы. В этом случае основные проблемы у геотехников возникают в случаях трещиноватости горных пород, возможности развития карстовых явлений и сейсмической опасности территории строительства.

В Санкт-Петербурге скальные породы залегают на глубинах более 200 м. Устройство свайных фундаментов, достигающих таких глубин, весьма сложно с технической точки зрения (не говоря уже об экономической составляющей). Кровля протерозойских твердых глин, подстилаемых скальными породами, располагается на глубинах более 25...30 м. Именно в этих глинах в основном располага-

ются тоннели петербургского метрополитена. Эти глины обладают достаточно хорошими физико-механическими свойствами и во многих случаях их наиболее рационально рассматривать в качестве опорного слоя фундаментов высотных зданий.

При этом следует учитывать, что верхний слой глин достаточно часто носит следы гляциодислокации, выражается в значительном ухудшении его строительных свойств. Как показывают наблюдения, опирание свай на дислоцированные протерозойские отложения может привести к существенным осадкам зданий даже небольшой этажности. Так, 7-этажное здание на пл. Конституции на сваях длиной 16 м, опирающихся на верхний, дислоцированный слой протерозойских глин, получило осадку 13 см, а расположенное рядом аналогичное здание на фундаментной плите – до 20 см. Такие данные свидетельствуют о необходимости детального исследования физико-механических свойств грунтов при проектировании фундаментов зданий, в противном случае свайный фундамент может оказаться неэффективным и опасным для строительства высотного здания.

Выше протерозойских глин располагаются моренные супеси и суглинки. В петербург-

ском регионе эти грунты могут значительно различаться по своим физико-механическим свойствам. При этом под более прочными грунтами могут залегать слои с худшими физико-механическими характеристиками. Использование моренных супесей и суглинков в качестве основания для высотных зданий менее предпочтительно, поскольку связано с возможностью развития существенных неравномерных осадок.

Выше моренных супесей и суглинков, как правило, располагаются озерно-ледниковые отложения, отличающиеся крайне негативными строительными свойствами. Опираие фундаментов высотных зданий на эти слои невозможно. Во многих случаях озерно-ледниковые отложения сверху перекрываются слоем песков.

Отличительной чертой глинистых грунтов Санкт-Петербурга является отсутствие увеличения сопротивления сдвигу с глубиной. Испытания крыльчаткой, выполненные на различных площадках, показывают, что сопротивление сдвигу в пределах одного инженерно-геологического элемента практически не возрастает с глубиной (рис. 1). Аналогичный вывод позволяют сделать многочисленные графики статического зондирования, в подавляющем большинстве которых сопротивление зондированию в пределах слоя не увеличивается с глубиной. Таким образом, можно отметить, что по традиционной терминологии слабые глинистые грунты являются недоуплотненными. Как правило, тенденция увеличения сопротивления сдвигу с глубиной отсутствует и в моренных отложениях. Интересно отметить, что на территории Васильевского острова на глубине более 90 м обнаружены межморенные отложения мягкопластичной и текучепластичной консистенции.

Наличие в основании мощной толщи слабых озерно-ледниковых отложений сводит на нет идею плитно-свайного фундамента. Согласно работам Р. Катценбаха [1], эффективность работы плитно-свайного фундамента резко падает при наличии слабого слоя в основании плиты. Расчеты, проведенные для различных площадок Санкт-Петербурга, показывают, что на плитный ростверк передается 5...10% общей нагрузки от здания. Передача

больших давлений на плиту ростверка означает с развитие недопустимых осадок здания.

Поэтому в большинстве случаев для условий Санкт-Петербурга наиболее надежным вариантом фундаментов высотного здания является свайный, с опиранием на слой протерозойских глин. Однако в зонах палеодолин (занимающих заметную часть территории города) кровля коренных протерозойских отложений понижается до глубин более 100...110 м.

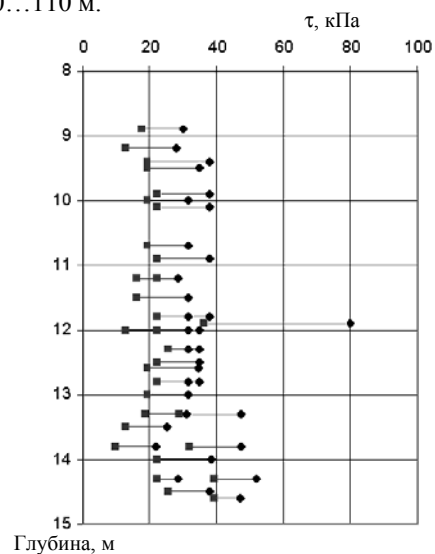


Рис. 1. Зависимость сопротивления сдвигу от глубины в пределах одного инженерно-геологического элемента (по данным испытаний крыльчаткой)

Как правило, палеодолина прорезает мощную толщу глин верхних коренных отложений, образуя крутые склоны (до 12...15°). Кровля моренных отложений в пределах палеодолин также существенно понижается. Для геологических условий площадок, расположенных в пределах древних палеодолин, характерны невыдержанность и выклинивание отдельных слоев, что увеличивает риск развития неравномерных осадок и кренов конструкций любого здания (не только высотного). В настоящее время устройство свайных фундаментов, достигающих глубин более 100 м и передающих давление на плотные коренные протерозойские отложения, является практически неосуществимой задачей для отечественных подрядчиков и крайне сложной – для ведущих

мировых. В таких условиях в качестве несущего слоя приходится использовать слои моренных супесей и суглинков. В этом случае следует минимизировать осадки конструктивными методами. Пример возможного варианта устройства фундаментов высотного здания в подобных условиях будет рассмотрен ниже.

В целом грунтовые условия в регионе для строительства высотных зданий характеризуются как неблагоприятные или крайне сложные. Строительство высотных зданий в таких условиях потребует дополнительных детальных изучений инженерно-геологической ситуации с полным анализом свойств геологических элементов, позволяющим использовать современные модели механики грунтов для расчета осадок здания с учетом совместной работы основания и надземной конструкции.

#### ПРИМЕР РАСЧЕТА ФУНДАМЕНТОВ ВЫСОТНОГО ЗДАНИЯ В СЛОЖНЫХ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

В качестве примера приведем расчетное обоснование строительства высотного здания в Санкт-Петербурге в сложных грунтовых условиях на территории Васильевского острова. Проектируемое здание имеет 40 этажей (150 м). Рассматриваемые в статье предпроектные исследования являются по существу новой попыткой строительства здесь высотного здания после отказа предыдущих инвесторов (проект «Петр Великий», 1994 г.).

Площадка строительства характеризуется наличием глубокой палеодолины, кровля относительно прочных протерозойских отложений находится на глубинах более 100 м. Таким образом, данный участок строительства относится к наиболее неблагоприятным на территории Санкт-Петербурга для строительства высотных зданий.

Здание предполагается расположить на подземном сооружении глубиной от поверхности 20 м. В пределах подземного пространства устраиваются 6 уровней: два уровня торговых помещений и четыре уровня подземной автостоянки. Над подземным пространством предполагается устройство стилобата, имеющего три уровня помещений с

торгово-развлекательными функциями. Выше располагаются жилые и технические этажи. На момент выполнения предпроектного обоснования окончательного архитектурного решения еще не существовало, поэтому использовались эскизные проработки. Использование более или менее конкретных расчетных схем позволило выявить особенности совместной работы высотного здания с основанием и выработать общие рекомендации по формированию его конструктивной схемы, которые должны быть учтены при дальнейшем архитектурном проектировании.

Как показывают расчеты, устройство развитого подземного объема позволяет решить одновременно следующие задачи:

снизить величины дополнительных нагрузок на основание за счет увеличения площади основания, а также разгрузки основания при устройстве подземного сооружения;

уменьшить величины горизонтальных смещений здания за счет развитой заглубленной части, которая на горизонтальные нагрузки работает как подпорная стенка;

повысить общую устойчивость здания (снизить риск развития значительных кренов);

уменьшить стесненность при расстановке свай с учетом включения их в работу конструкциями подземной части;

снизить амплитуды колебаний конструкций здания за счет увеличения площади подземной части, а также дополнительной «присоединенной массы».

В то же время следует учитывать, что устройство глубокого подземного объема в условиях слабых грунтов является сложной технической задачей. (Возможные способы будут рассмотрены ниже.)

Снижение осадок здания при устройстве подземного объема достигается в основном благодаря уменьшению давления на основание за счет снятия веса вынутаго грунта. Без учета этого фактора дополнительное давление на основание от высотной части здания может достигать 0,7...0,75 МПа. Для восприятия таких давлений основанием необходимы прочные малосжимаемые грунты, находящиеся на данной площадке на глубинах более 100 м. Варианты устройства фундаментов в таких условиях являются крайне дорогостоящими и технологически трудно осуществимыми.

При этом следует отметить, что учитывать снижение нагрузки при выемке грунта приходится с большой осторожностью. При выработке глубоких котлованов происходит поднятие дна, сопровождающееся расструктурированием верхних слоев грунта и ухудшением их строительных свойств. В таких условиях возможно развитие существенной осадки фундаментов, опирающихся на слои, расположенные близко к поверхности дна котлована. В связи с этим при ширине котлована более 10 м отечественные нормы не позволяют учитывать положительную роль снятия веса вынутаго грунта.

Для использования эффекта снятия веса грунта необходимо устройство свай ниже дна котлована, прорезающих зону возможного ухудшения свойств грунтов. В рассматриваемых инженерно-геологических условиях строительства грунты с относительно хорошими физико-механическими характеристиками, имеющие твердую консистенцию, начинаются с глубин 30...35 м и относятся к отложениям лужской морены.

Расчетный анализ вариантов устройства фундаментов показал, что наиболее надежным и экономически эффективным является вариант свайных фундаментов с глубиной острия свай около 40 м от поверхности. Большинство свай может быть выполнено со дна подземного сооружения, при этом их длина составит около 20 м. При устройстве подземного сооружения глубиной 20 м среднее дополнительное давление (с учетом веса вынутаго грунта) по подошве условного фундамента 75×75 м не превышает 100 кПа.

Таким образом, устройство развитой подземной части и эффект снятия веса вынутаго грунта в объеме подземного сооружения позволили существенно уменьшить нагрузки на основание, а следовательно, и величину осадки здания. В то же время величина абсолютной осадки является далеко не единственным критерием, по которому следует оценивать эффективность работы фундаментов здания. На работу надземных конструкций влияет, как известно, не столько абсолютная осадка, сколько неравномерность осадок.

Эффект снятия веса вынутаго грунта позволяет снизить абсолютные величины осадок, однако не способен уменьшить их неравно-

мерность. При проектировании традиционных фундаментов при незначительных величинах осадок, как правило, незначительными являются и их неравномерности. При расчете «плавающих» фундаментов с учетом снятия веса грунта низкая величина абсолютных осадок не должна вводить геотехника в заблуждение, поскольку может сопровождаться существенной неравномерностью.

Поэтому при расчетах зданий с развитой подземной частью особое внимание следует уделить жесткости сооружения и ее способности выравнивать неравномерности осадок. Для обеспечения достаточной жесткости и относительно равномерного распределения давления по пятну застройки конструктивная схема здания должна предполагать наличие жестких стенок, связывающих части подземного сооружения и имеющих незначительное количество проемов. Наиболее простым вариантом увеличения жесткости для рассматриваемого здания являлось устройство перекрестных несущих стен в пространстве стилобата и подземного сооружения. Однако такое решение ограничивало бы планировочные возможности использования подземного пространства (для устройства автостоянок, торговых залов и т. д.). Решением проблемы может стать *распределение жесткостей в различных уровнях высотного здания*. В расчетах рассматривалась конструктивная схема, предусматривающая расположение жестких стен выше стилобата в контуре высотной части здания (в пределах нижних 5–8 этажей) и жестких стен за контуром высотной части в пределах стилобата и подземного пространства.

Расчетная схема здания изображена на рис. 2, 3, конструктивные схемы внутренних монолитных несущих стен здания и перекрытий – на рис. 4.

При расчете осадок здания методом послойного суммирования глубина сжимаемой толщи оказывается равной нулю, поскольку 20% от природного давления на глубине 40 м превышают величину дополнительного давления (с учетом веса вынутаго грунта). Следовательно, расчетная осадка здания также равна нулю. Очевидно, что такой вывод является не более чем дефектом расчетного метода. При использовании метода Егорова величина сжимаемой толщи оказывается равной 16 м, при

этом применимость эмпирической формулы для определения глубины сжимаемой толщи для данного типа фундамента вызывает большие сомнения.

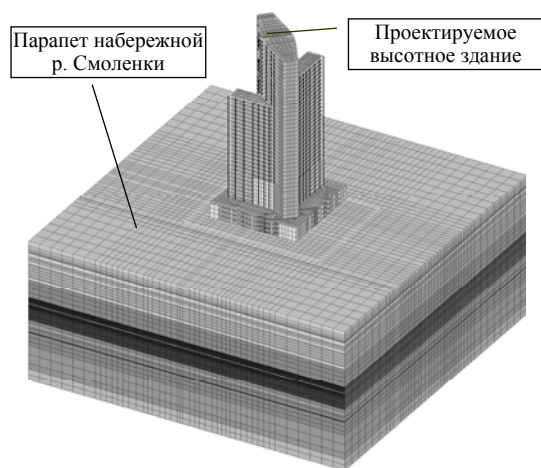


Рис. 2. Расчетная схема

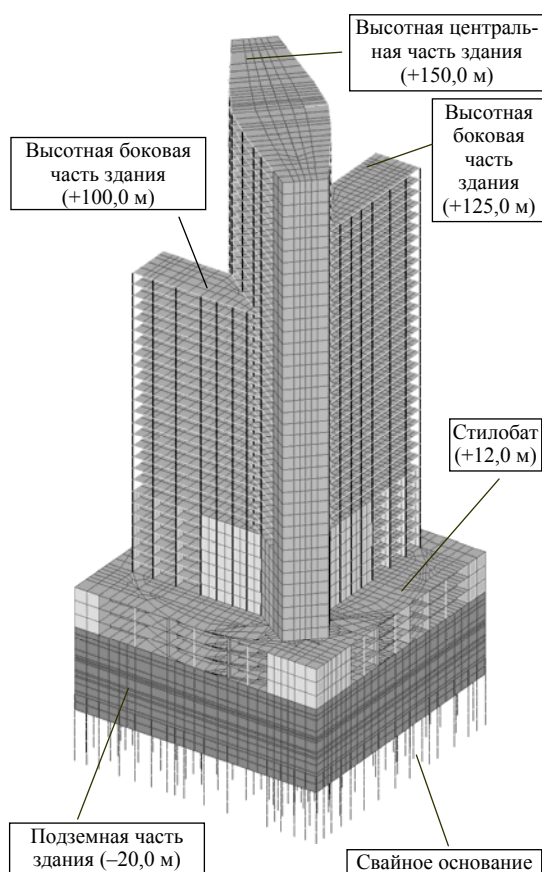


Рис. 3. Фрагмент расчетной схемы. Конструкции высотного здания с подземной частью

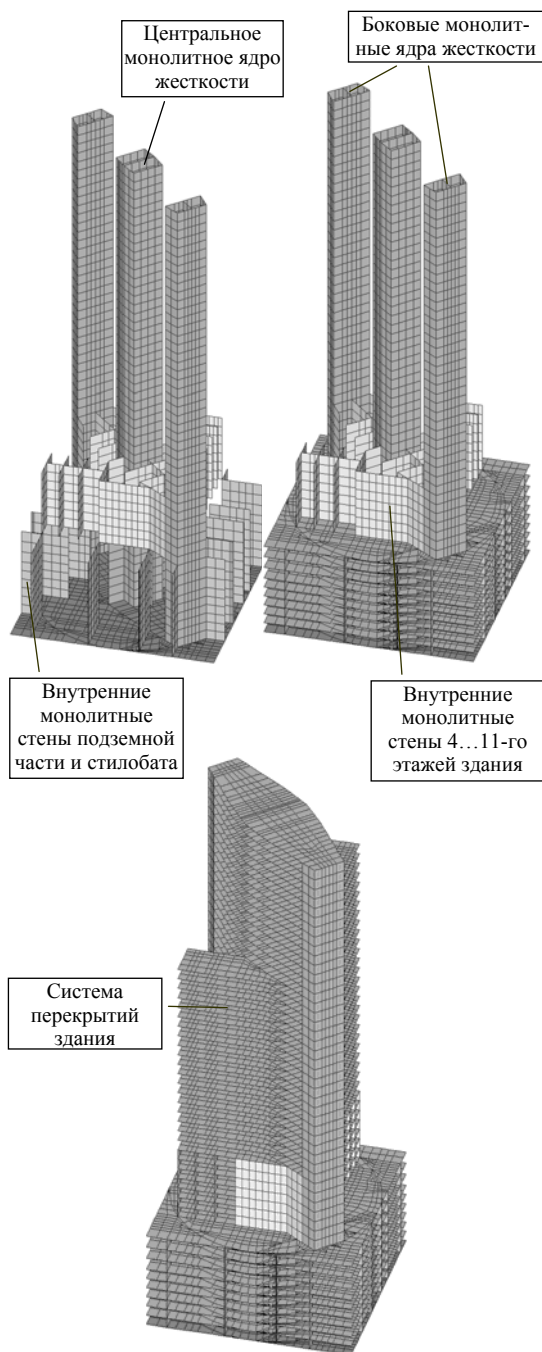


Рис. 4. Конструктивная схема внутренних монолитных стен здания и перекрытий

Более объективным представляется ограничение сжимаемой толщи уровнем залегания коренных пород (около 110 м от поверхности). При этом в расчете, согласно традиционному подходу, принимаются модули деформации,

определенные с учетом природного давления на соответствующих глубинах (более 40 м). В таких условиях значения модулей деформации, определенные в результате компрессионных испытаний, будут достаточно высокими, и расчетная осадка здания составит 8...10 см. В то же время такие модули соответствуют влажности грунтов значительно меньше природной, т. е. отвечают характеристикам не природного, а искусственно уплотненного грунта. Такой подход соответствует гипотезе нормального уплотнения грунтов, которая, как уже указывалось, для глинистых грунтов Санкт-Петербурга не соответствует данным полевых исследований.

В грунтовых условиях Санкт-Петербурга при расчете оснований крайне важен корректный учет сдвиговых деформаций грунтов. При низких коэффициентах фильтрации и заглублении острия свай в водонасыщенные глинистые грунты деформации формоизменения могут превалировать над объемными деформациями, связанными с уплотнением грунта. Характеристики поведения грунтов при деформациях формоизменения могут быть получены из трехосных испытаний по неконсолидированно-недренированной схеме, выполнявшихся для грунтов рассматриваемой площадки строительства в Петербургском горном институте под руководством профессора Р. Э. Дашко. В сочетании с компрессионными испытаниями такой подход позволяет более полно учесть особенности нелинейной работы грунтов основания. Для учета этих особенностей разработана специальная модификация упрочняющейся упруго-пластической модели, учитывающая нелинейную зависимость между девиатором напряжений и деформаций, полученную в результате трехосных испытаний, а также реологические свойства грунта [2].

При расчете по данной модели максимальная конечная осадка высотного здания составляет 15 см (рис. 5). При этом наблюдаются существенные неравномерности осадок. Это говорит о том, что жесткость здания и подземного сооружения является не вполне достаточной (рис. 6). Этот недостаток должен быть устранен при проектировании здания путем увеличения толщин стен, установки дополнительных диафрагм или с помощью других конструктивных решений.

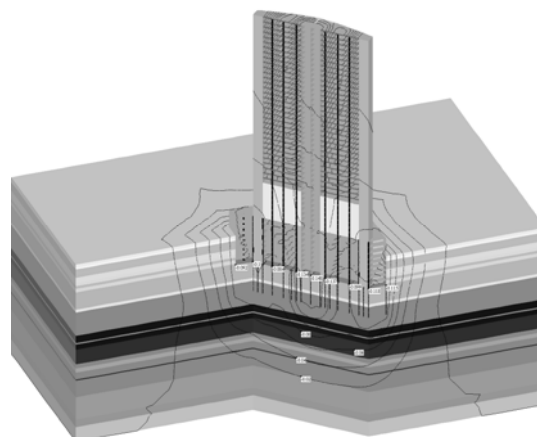


Рис. 5. Изолинии осадок (м) проектируемого высотного здания при расчете по упруго-вязко-пластической модели

#### СПОСОБ УСТРОЙСТВА ПОДЗЕМНОГО ОБЪЕМА В СЛАБЫХ ГРУНТАХ

Отдельного рассмотрения заслуживает способ устройства подземного пространства глубиной 20 м под рассматриваемым зданием. В данной ситуации оптимальным представляется строительство «сверху вниз». После устройства стены в грунте из секущихся или тангенциальных свай, которые являются одновременно несущими стенами сооружения и ограждением подземного пространства, выполняется разработка грунта во внутренней зоне ограждения. Во время этого предусматривается устройство специальных распорных и обвязочных конструкций, обеспечивающих общую устойчивость стен. Эти конструкции могут быть временными или постоянными. В качестве постоянных распорных конструкций могут использоваться подземные междуэтажные перекрытия, каркас и конструкции монолитных ядер жесткости, способных воспринять значительные горизонтальные усилия.

В расчетах по оценке устойчивости ограждающих стен котлована рассматривались варианты прямоугольного подземного сооружения и круглого в плане.

Для обеспечения устойчивости стен ограждения *прямоугольного подземного сооружения* рассматривался вариант, в котором дополнительная жесткость ограждения дости-

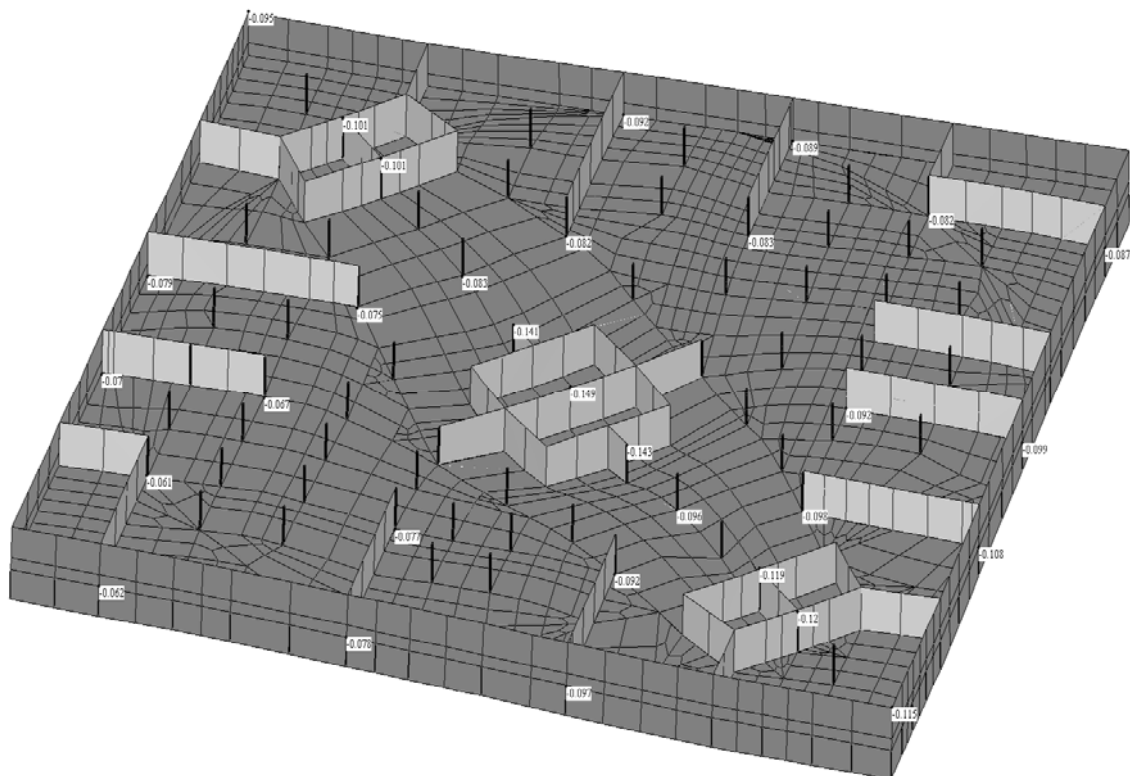


Рис. 6. Деформированная схема плиты ростверка. Подписаны величины вертикальных смещений (м)

гается за счет устройства консольных участков перекрытий и части внутренних несущих конструкций. Длина таких участков перекрытий может составить 6...8 м. Такие конструкции работают как защемленные балки-стенки, воспринимающие давление грунта на ограждающую стену.

Согласно расчетам, наибольшие горизонтальные перемещения стенки в этом случае наблюдались в уровне дна котлована и достигали 10 см. Такая ситуация требует введения дополнительных распорных конструкций. Возможным вариантом строительства подземной части здания в этом случае может оказаться последовательное устройство по мере откопки котлована центрального ядра жесткости высотной части здания. Для этого в центральной части потребуется предварительное устройство свай. Распорные конструкции могут передавать нагрузки на центральное ядро жесткости.

*Круглое в плане подземное сооружение* имеет целый ряд преимуществ:

отпадает необходимость в устройстве систем поперечного раскрепления ограждения котлована;

освобождается от распорных конструкций пространство для ведения работ;

снижение сложности проектирования и организации работ нулевого цикла (и как следствие – стоимости работ);

уменьшаются сроки выполнения работ.

Наибольшие горизонтальные деформации круглого в плане подземного сооружения, согласно расчету, наблюдались в уровне дна котлована и составляли ~1 см. Толщина стены подземного сооружения в этом случае составляла 2 м.

Возможная последовательность работ по устройству подземного сооружения для обоих рассмотренных вариантов приведена на рис. 7. В случае круглого в плане подземного сооружения устройство участков перекрытий не требуется, поскольку давление грунта воспринимается сечением подземного сооружения.

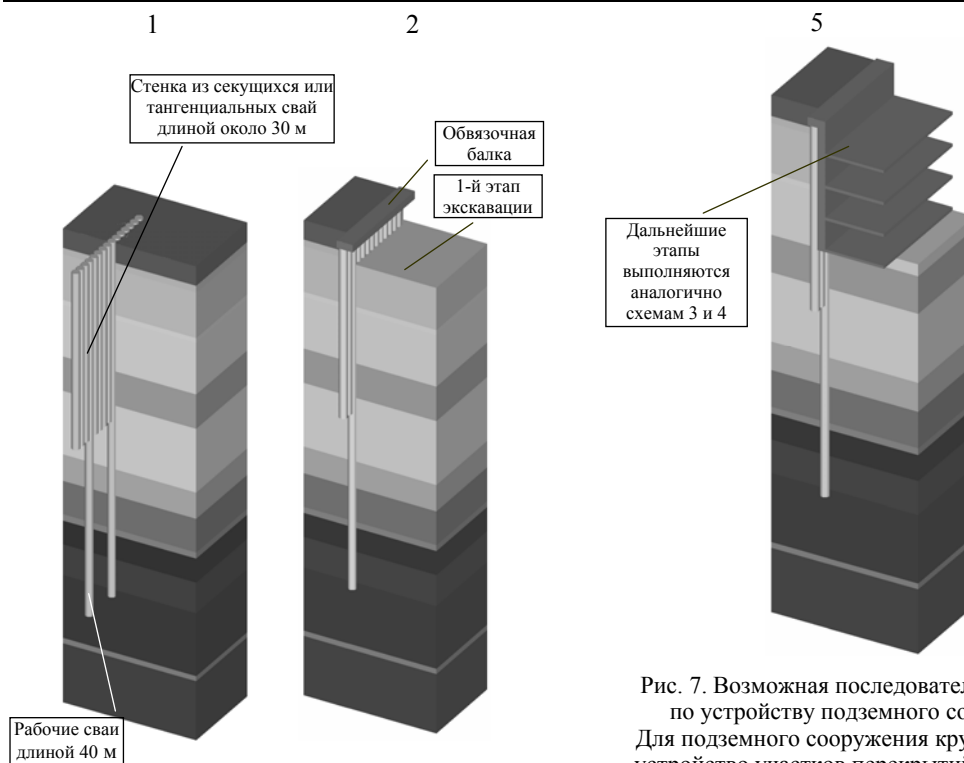
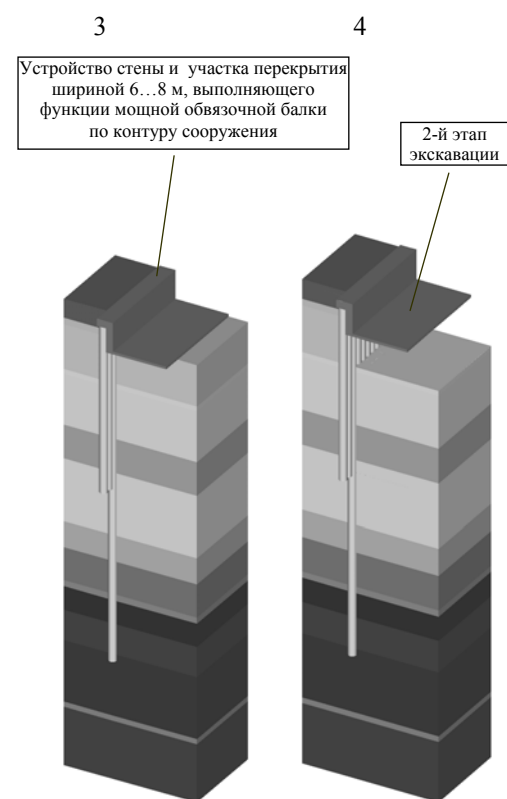


Рис. 7. Возможная последовательность работ по устройству подземного сооружения. Для подземного сооружения круглого в плане устройство участков перекрытий не требуется

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В инженерно-геологических условиях Санкт-Петербурга основным вариантом фундаментов для высотных зданий в большинстве случаев является свайный, с опиранием на протерозойские глины с относительно благоприятными физико-механическими характеристиками. Опирание острия свай на расположенные выше моренные отложения (при невозможности или сложности устройства свай большей длины) может потребовать специальных конструктивных мероприятий для снижения давления на основание (увеличения площади опирания здания, устройства развитой подземной части и т. п.).

2. Снижение осадок при учете веса вынуженного грунта в пределах подземного сооружения приводит к уменьшению абсолютных величин осадок здания, что, однако, не означает снижения неравномерностей осадок и кренов здания. Это должно быть учтено при расчете конструкций здания. Развитый подземный объем должен обладать существенной жесткостью для обеспечения возможности выравнивания осадок.





3. Расчет осадок высотных зданий должен выполняться на основе нелинейных моделей механики грунтов. Особое внимание следует уделять учету деформаций сдвига, которые для свайных фундаментов с заглублением острия свай в толщу водонасыщенных глинистых грунтов могут превалировать над деформациями уплотнения.

### **Список литературы**

1. Katzenbach R., Hanicsh J. Kombinierte Pfahl-Plattengründungen. 2002.
2. Шашкин А. Г., Шашкин К. Г. Упруго-вязко-пластическая модель структурно-неустойчивого глинистого грунта // Реконструкция городов и геотехническое строительство. 2005. №9.