

ване. Производство зачастую осложняется большим количеством логических зависимостей, таким образом, усложняется параллельное ведение различных видов работ. Особую сложность представляет собой организация снабжения и логистики при подобном виде работ. Необходимо отметить, что устройство котлована методом «сверху вниз» требует высокой квалификации подрядчика и детальной проектной проработки.

Так как производство котлована методом «сверху вниз» считается одним из самых сложных видов строительного производства с геотехнической точки зрения, необходимо предусматривать комплексную программу мониторинга во время строительства.

АНОТАЦІЯ

У статті надано визначення нового методу будівництва висотних споруд із заглибленою підземною частиною, описана технологія і організація робіт. Наведений приклад будівництва висотної будівлі MainTower у Франкфурті-на-Майні (Німеччина) із застосуванням методу «TOP-DOWN».

Ключові слова: висотне будівництво, геотехніка, підземна частина, глибокі котловани, метод будівництва «TOP-DOWN»

ANNOTATION

In this article the new construction method of the high-rise buildings with developed underground part is described; the description of technology and organisation of works is provided. The application of the "TOP-DOWN" method during the construction of the MainTower building in Frankfurt am Main is given. The quotation of the normative document DBN B.2.2-24:2009 is provided (informative attachment about the «TOP-DOWN» method).

KeyWords: high-rise building construction, geotechnics, underground construction, deep excavations, «Top-Down» construction method.

УДК 624

Р.Катценбах, д-р техн.наук, Технический Университет (Дармштадт, Германия); Р.А. Дунаевский, Д.Л. Муляр, К.О. Дьяченко, «Инженерное бюро профессора Катценбаха и партнеры – Украина», Киев; А.М. Галинский, к.т.н., НИИСП, Киев

БАРЕТТЫ – ЭФФЕКТИВНЫЕ ФУНДАМЕНТЫ ДЛЯ ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЙ

АННОТАЦИЯ

В статье дано определение нового для Украины типа фундаментов в виде баретт, изложена методика их проектирования и правила устройства. Приведен опыт проектирования и устройства комбинированного бареттно-плитного фундамента на примере проекта «Mігах Plaza» в Киеве.

Ключевые слова: высотное строительство, геотехника, подземная часть, фундаменты и основания, баретты, проектирование и устройство, опыт применения.

Баретты – вид буронабивных свай, устройство которых производится с помощью грейфера. Под защитой суспензии грейфером вырывается траншея, в которую впоследствии опускается арматурный каркас (в случае производства армированных баретт) и производится бетонирование. Технология производства баретт соответствует технологии производства одной захватки «стены в грунте».

Бареттные фундаменты применяются при высоких нагрузках, зачастую при высотном строительстве, и могут служить альтернативой буронабивным сваям, особенно когда требуется устройство значительного количества свай больших диаметров. Баретты за счет сравнительно больших размеров могут воспринимать высокие нагрузки по материалу и по грунту.

Баретты производятся в форме четырехугольника и различных комбинаций из них. При выборе геометрических параметров баретт исходят из принципа соосной передачи нагрузки от вертикальных элементов верхней конструкции (стены, колонны, пилоны и т.д.) на элементы фундамента, и соответственно подбирают размеры баретт. Кроме того, при определении размеров баретт необходимо учитывать возможные размеры грейфера и

производственные особенности при соединении нескольких баретт в единый элемент.

Часто производство баретт особенно целесообразно в комбинации с производством «стены в грунте», т.к. необходимая для производства техника и механизмы (грейфер, силосы для суспензии и т.д.) имеются в распоряжении на строительной площадке, и одна производственная технология используется как для фундаментов, так и для ограждающей конструкции.

Проектирование бареттного фундамента

При проектировании баретт исходят из аналогичных принципов, как и при проектировании буронабивных свай (СНиП 2.02.03-85). При устройстве крестообразных баретт или баретт с аналогичной конфигурацией целесообразно предусмотреть снижение трения по боковой поверхности в областях пересечения двух четырехугольников.

В зависимости от вида нагрузок можно предусматривать армированные и неармированные баретты. Неармированные баретты работают исключительно на сжатие. В случае, если предусматриваются армированные баретты, их арматура должна сопрягаться с фундаментной плитой.

В связи с большими размерами баретт и соответственно их большой несущей способностью испытание баретт в масштабе 1:1 возможно на сегодняшний день лишь при устройстве массивной анкерной конструкции или при использовании гидравлических домкратов с разделением баретт на сегменты.

Также возможно проведение классических статических испытаний свай меньших размеров и по их результатам с помощью аналитического решения обратной задачи определять трение по боковой поверхности и под нижним концом сваи. По-

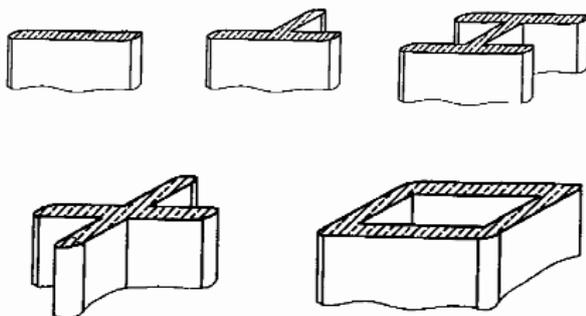


Рис. 1. Возможные конфигурации баретт и их размеры

лученные данные могут применяться при проектировании бареттного фундамента. Такой подход к расчету бареттного фундамента и проектирование испытания свай требует экспертного сопровождения на всех этапах.

При проектировании бареттных фундаментов особое внимание должно уделяться устойчивости траншеи, которая должна подтверждаться расчетом. В рабочих чертежах бареттного фундамента должна быть указана расчетная плотность применяемой суспензии, при которой устойчивость траншеи обеспечена.

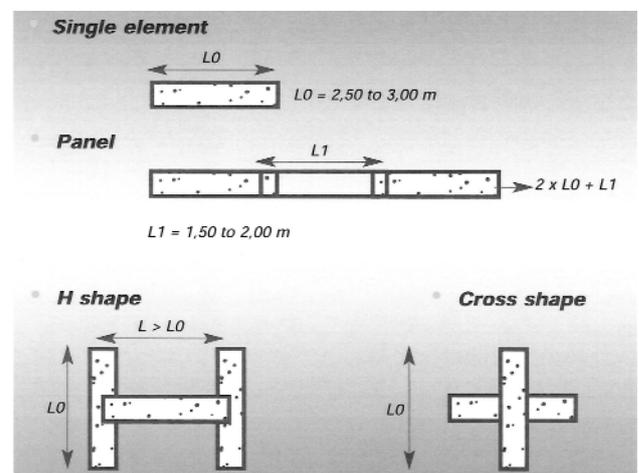
При анализе инженерно-геологических условий необходимо обратить внимание на возможные крупнозернистые, галечные или похожие отложения. При их наличии (т.к. суспензия не может удерживать давления от таких отложений) устойчивость траншеи не может быть обеспечена без принятия особых мер (предварительное инъецирование, специальные ограждающие конструкции и т.д.)

При анализе гидрогеологических условий на проектируемом объекте важно учитывать давление воды на подошву траншеи и предотвращать ее разуплотнение вследствие давления воды. В этой связи необходимо выявить возможные напряженные водоносные горизонты и давление в них.

Правила устройства баретт

Перед началом устройства самих баретт необходимо выполнить форшахты, которые обеспечивают вертикальное ведение грейфера при устройстве траншеи. Форшахты не являются элементами несущей конструкции и устраиваются исключительно в соответствии с производственными требованиями.

Уровень, с которого устраиваются баретты, должен находиться выше уровня грунтовых вод, т.к. устройство баретт при проведении водопони-



жения недопустимо. В противном случае, при работе насосов в скважинах водопонижения возможно попадание суспензии и/или бетона в скважины, что может привести к выходу из строя последних и экологическому нарушению гидрогеологического режима. Кроме того, возможно снижение несущей способности конструкции баретты.

Процесс устройства бареттного фундамента представлен на рис. 2.

Траншея заполняется суспензией по мере откопки (на сегодняшний день, как правило, используется бентонитовая или полимерная суспензии). Перед применением суспензии ее плотность должна быть проверена опытным путем на соответствие с проектной плотностью.

При устройстве баретт необходимо контролировать уровень суспензии для обеспечения устойчивости траншеи, возможные потери должны фиксироваться и анализироваться. С точки зрения экономической целесообразности и экологичности производства суспензия должна использоваться многократно, для чего, как правило, на объекте устанавливаются силосы. Для дальнейшего применения суспензия должна постоянно очищаться от более крупных частиц грунта.

При завершении работ по устройству траншеи и перед бетонированием необходимо произвести очистку подошвы траншеи от крупных фракций грунта. После очистки подошвы траншеи от крупных частиц производится вертикальное бетонирование, при этом должны быть приняты меры по предотвращению расслоения бетона.

При заливке бетона следует предусмотреть, что при бетонировании под бентонитовым раствором верхний слой бетона вследствие смешения раствора с грунтом и суспензией не соответствует качеству и прочности бетона, предусматриваемым в проекте. В этой связи необходимо учитывать, что

верхний слой бетона, так называемый «грязный бетон», должен быть впоследствии удален. Как правило, высота слоя грязного бетона составляет около 1 м. Этот факт должен быть учтен в проектных и производственных отметках.

Применение бареттного фундамента Краткое описание объекта

На сегодняшний день устройство баретт получает все большее распространение в мире. При строительстве высотных зданий в Азии и Европе, особенно во Франции, этот вид фундамента применяется довольно часто. В последнее время эта технология возведения фундамента нашла широкое применение на строительных площадках Украины и России. Часто проектируются комбинированные «бареттно-плитные» фундаменты, когда в работу вовлекается фундаментная плита.

В начале 2007 г. компания «Mirax Group» вышла на украинский рынок с проектом высотного многофункционального комплекса «Mirax Plaza», расположенного в центре Киева. В связи с высокой потребностью города в офисных зданиях класса «А» и в высококачественном жилье было принято решение о строительстве двух башен с торговоразвлекательным центром и паркингом в стилобатной части общей площадью 294 тыс. м². Высота башен составила 192 м (46 этажей), что на данный момент является проектом одного из самых высоких зданий в Украине (рис. 4). Высотные здания расположены у подножия 30-метрового склона. Торгово-развлекательный центр с паркингом врезается на 20 м в склон, на вершине которого расположены жилые здания с 6 — 9 наземными этажами. Для строительства паркинга и удержания склона предусматривается устройство подпорной стены из буронабивных свай в разрядку, закрепленных несколькими рядами анкеров в грунте.

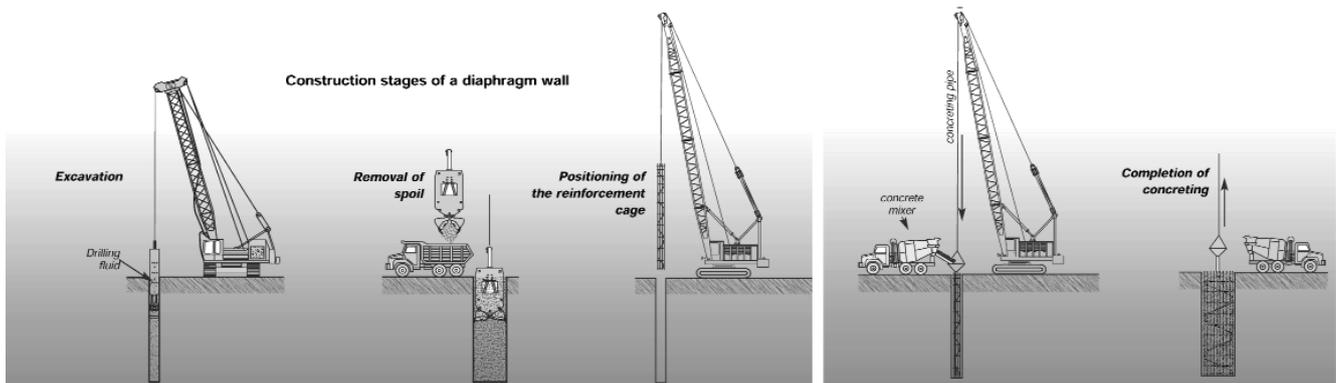


Рис. 2. Процесс устройства бареттного фундамента

Проектирование проводилось компаниями OWC (Германия) и БИП-ПМ (Украина). Проект подземной части и фундаментов разрабатывался Инженерной ассоциацией профессора Катценбаха (Германия) и ее отделением в Украине. Проект реализуется в рамках экспериментального высотного строительства и связан с внедрением многих новых строительных и инженерных технологий в Украине при научном сопровождении ведущих киевских институтов НИИСП и НИИСК.

Рельеф и инженерно-геологические условия на площадке строительства

Участок строительства расположен на правом берегу р. Днепр, в пределах склона Приднепровской возвышенности и приурочен к нижней части левого склона относительно молодой Глубочицкой балки. По долине Глубочицкой балки, по свидетельствам летописцев, протекала судоходная речка Глубочица – правый приток р. Днепр.

На сегодняшний день речка Глубочица направлена по канализационному коллектору, а водотоки, стекающие вниз по склонам, зарегулированы в ливневую канализацию. Перепад абсолютных отметок дневной поверхности в пределах участка проектируемой застройки составляет более 30 м.

На разведанной глубине до 70,0 м у подножия склона встречены отложения четвертичной, неогеновой и палеогеновой систем. Характерный геологический разрез представлен на рис. 5. Гидрогеологические условия на площадке изысканий характеризуются наличием двух водоносных горизонтов. Первый от поверхности безнапорный водоносный горизонт находится на 2 м ниже поверхности земли у подножия склона. Общее направление движения подземных вод – в сторону древнего тальвега Глубочицкой балки.

Второй водоносный горизонт зафиксирован на глубине 36 м ниже поверхности земли у подножия склона.

Инженерно-геологические условия строительной площадки относятся к третьей категории сложности, класс ответственности зданий – I.

Устройство подземной части для высотного здания башни А

Строительство башни А велось ускоренными темпами, что обуславливало начало устройства котлована башни А до закрепления склона основной

подпорной стеной. Таким образом, при расчете крепления котлована башни А глубиной 10 м у подножия склона учитывалось давление склона высотой 30 м. В рамках проекта котлована было предусмотрено устройство подпорной стены, выполненной из буронабивных свай и герметизированной сваями-дгетами с верхним рядом анкеров и берм внутри котлована. Данное решение позволяло устройство первой захватки фундаментной плиты под ядро жесткости здания в кратчайшие сроки. Для уменьшения гидростатического давления на стенки котлована было применено внешнее водопонижение. Влияние депрессивной воронки водопонижения на окружающую застройку, а также выбор режима водопонижения были оценены с помощью опытных откачек на площадке и последующего моделирования гидрогеологических условий.

После устройства первой захватки фундаментной плиты была установлена распорная система из металлоконструкций. После их монтажа и закрепления естественные откосы внутри котлована по секционному вынимались, и проводилось бетонирование последующих захваток фундаментной плиты.

Испытания свай и решение обратной задачи

В рамках первоначального проекта на территории многофункционального комплекса «Mirax Plaza» было проведено четыре испытания свай, при этом проводилось два испытания статической вдавливающей нагрузкой и два испытания статической выдергивающей нагрузкой.

На основе полученных результатов испытаний для расчета и оптимизации фундамента высотного здания методом конечных элементов была решена обратная задача.

Исходя из данных инженерно-геологического отчета было рассчитано поведение свай при равных статических нагрузках.

На основании результатов решения обратной задачи становится очевидно, что значения модуля деформации грунта, определенные на основе лабораторных и полевых испытаний, значительно меньше фактических (рис. 7, розовая кривая E*1) и, соответственно, наблюдается значительно большая осадка чем при проведенных испытаниях свай. При подстановке двойного значения модуля деформации для всех слоев грунта (рис. 7, лиловая кривая E*2) наблюдается соответственно более жесткое поведение грунта. При подстановке 3-кратного значения модуля деформации E для всех

слоев грунта в результате расчетов получается значительно меньшая величина осадки при максимальной нагрузке (8.800 кН) чем при проведенном испытании.

В процессе решения обратной задачи наилучшее соответствие было достигнуто при подстановке 1-кратного значения модуля деформации E для верхних слоев грунта, до слоев киевской свиты, и 3-кратного значения модуля деформации E для нижних слоев киевской, бучаковской и каневской свит. Расчетное максимальное значение осадки совпадает с результатом испытания свай.

Вышеописанные расчеты и анализ были учтены в расчетах фундаментов башен А и В.

Расчет комбинированного свайно-плитного фундамента высотного здания башни А

Суммарные нагрузки на фундамент Башни А составили около 2.200 МН при площади фундаментной плиты около 2.000 м².

Для башни А предусмотрен фундамент глубокого заложения с использованием 64 баретт. Баретты имеют классические размеры сечения захватки «стены в грунте» 2,8 м х 0,8 м и производятся по аналогичной технологии. Проектная длина баретт составила 33 м с заглублением в мелкие пески бучаковской и каневской свит. Ограждение котлована из буронабивных свай в работу фундамента не вовлекалось.

Расчет проводился с помощью трехмерной модели методом конечных элементов (рис. 8) в программном комплексе «Tochnog», при этом моделировалась половина фундамента и грунтового массива под ним. Моделирование проводилось на основе величин, полученных при решении обратной задачи, исходя из того, что величины, полученные при испытании свай диаметром 0,82 м, применимы к бареттам размерами 2,8 м х 0,8 м.

Ожидаемые осадки фундамента рассчитывались исходя из европейского опыта высотного строительства для нагрузки 85 % от суммы постоянных и распределенных нагрузок. Расчетные осадки находятся в диапазоне значений около 13,5 см на краю плиты и около 16 см в области ядра здания.

В результате расчетов $\alpha_{\text{ксп}}$ составил 0,88; т.е. 88 % нагрузок передается на баретты и 12 % передается на грунтовый массив фундаментной плитой.

Расчетные нагрузки на отдельные баретты находятся в диапазоне значений от 22,1 МН до 44,5

МН. Нагрузка на крайевые баретты согласно расчетам находится в диапазоне значений от 41,2 МН до 44,5 МН, что значительно выше нагрузок на внутренние баретты с максимальным значением 30,7 МН. Это соответствует типичному поведению крайних свай комбинированного свайно-плитного фундамента. При расчете моделируется совместная работа свайно-плитного фундамента и напряженно-деформируемого состояния грунтового массива, отдельный расчет каждой сваи не проводится.

Расчетные значения давления под фундаментной плитой находятся в большинстве областей ниже 200 кН/м² и достигают около 400 кН/м² по краю высотного здания. Соппротивление под нижним концом наружных баретт находится в среднем около 5,100 кН/м², а для внутренних баретт — в среднем около 4,130 кН/м².

На рис. 10 изображено среднее распределение нагрузки по глубине для наружных и внутренних баретт.

Как показывает график, мобилизуемое трение по боковой поверхности по стволу баретты возрастает с глубиной и достигает 180 кН/м² для наружных баретт и 150 кН/м² для внутренних баретт. Средние значения мобилизуемого трения по боковой поверхности по стволу баретты находятся в диапазоне около 135 кН/м² для наружных баретт и около 75 кН/м² для внутренних баретт. При максимальном значении на абс. отм. около 90 м трение по боковой поверхности снова уменьшается из-за мобилизуемого сопротивления под нижним концом баретты.

Проект и расчет фундамента был подтвержден дублирующим расчетом НИИ строительных конструкций.

В соответствии с практикой высотного строительства было рекомендовано установить высотные отметки здания перед началом монтажа несущих конструкций на уровне + 10 см. Высотное здание осядет во время строительства и в течение первых двух лет эксплуатации примерно на это значение и, таким образом, достигнет проектного уровня высот.

Метод наблюдения и мониторинг

При строительстве комплекса «Mirax Plaza» использовался метод наблюдения, предписываемый европейским нормативным документом EUROCODE 7 (EC7) для самой сложной геотех-

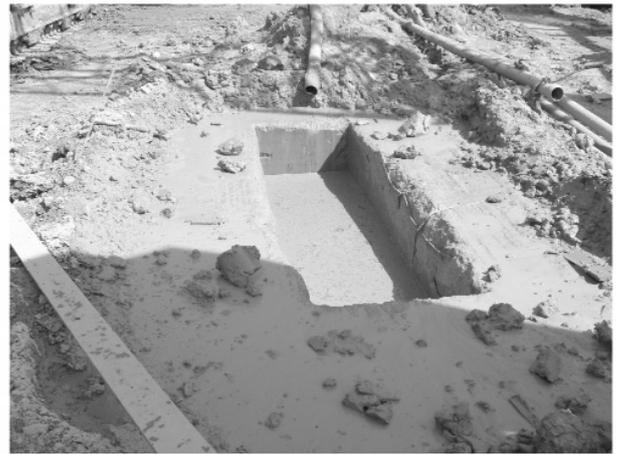
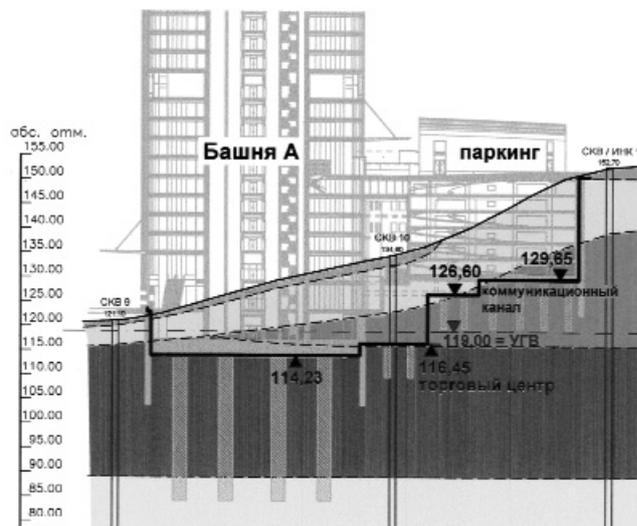


Рис. 3. Устройство комбинированного «бареттно-плитного» фундамента при строительстве высотного комплекса MIRAX PLAZA в Киеве



Рис. 4. Mirax Plaza, Киев. Визуализация проекта с башнями А и В (слева), возведение каркаса башни А (справа)



- насыпной грунт, ИГЭ 1
- супеси лесовидные и делювиально-оползшие грунты четвертичного периода, ИГЭ 2 до 8
- супеси и пески (переменного залегания), Полтавского и Харьковского формирования, третичного периода, ИГЭ 9 до 13
- Киевская мергельная глина и суглинки (наглинок), третичного периода, ИГЭ 14 до 15
- мелкий песок и суглинки, Каневского и Бучаковского формирования, третичного периода, ИГЭ 16 до 19

Рис. 5. Посадка фундаментов комплекса и схематический инженерно-геологический разрез



Рис. 6. Котлован башни А в момент выемки откосов после устройства анкеров и монтажа распорной системы

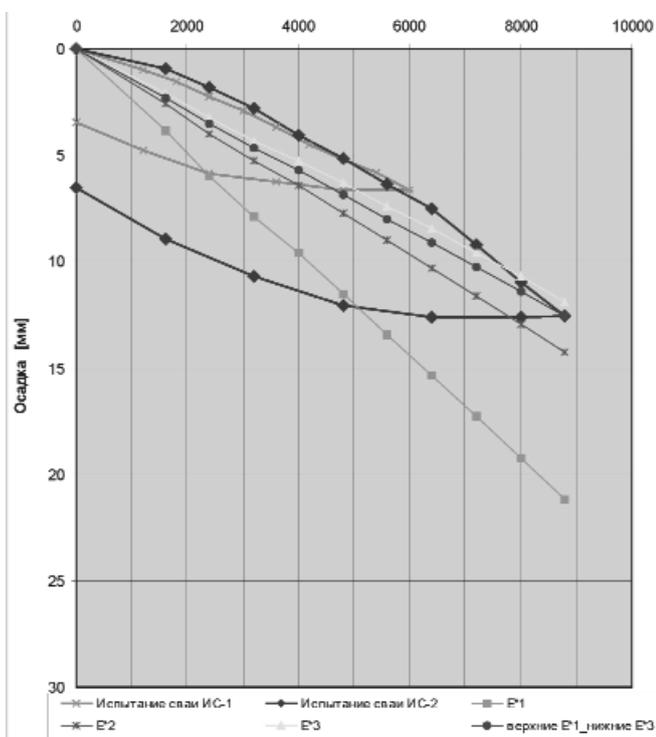


Рис. 7. Решение обратной задачи. Графики осадки сваи в зависимости от нагрузки при различных принимаемых параметрах грунта, наложенные на графики, полученные в результате испытаний

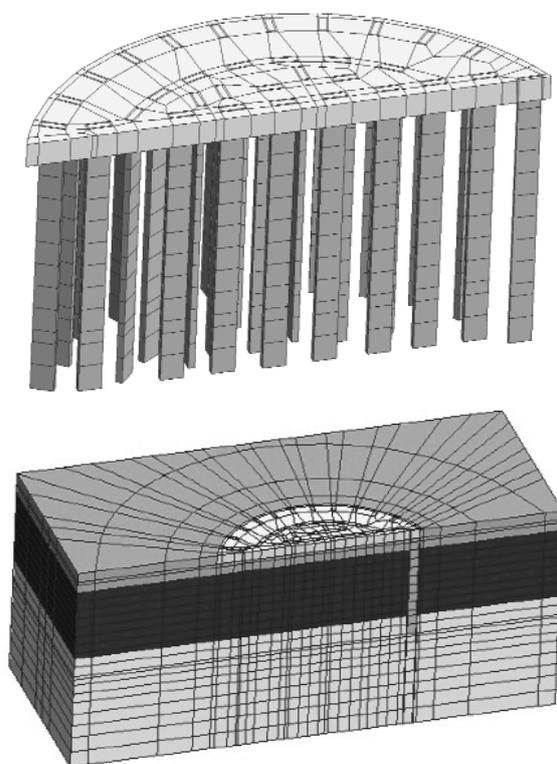


Рис. 8. Расчетная модель для расчета фундамента методом конечных элементов

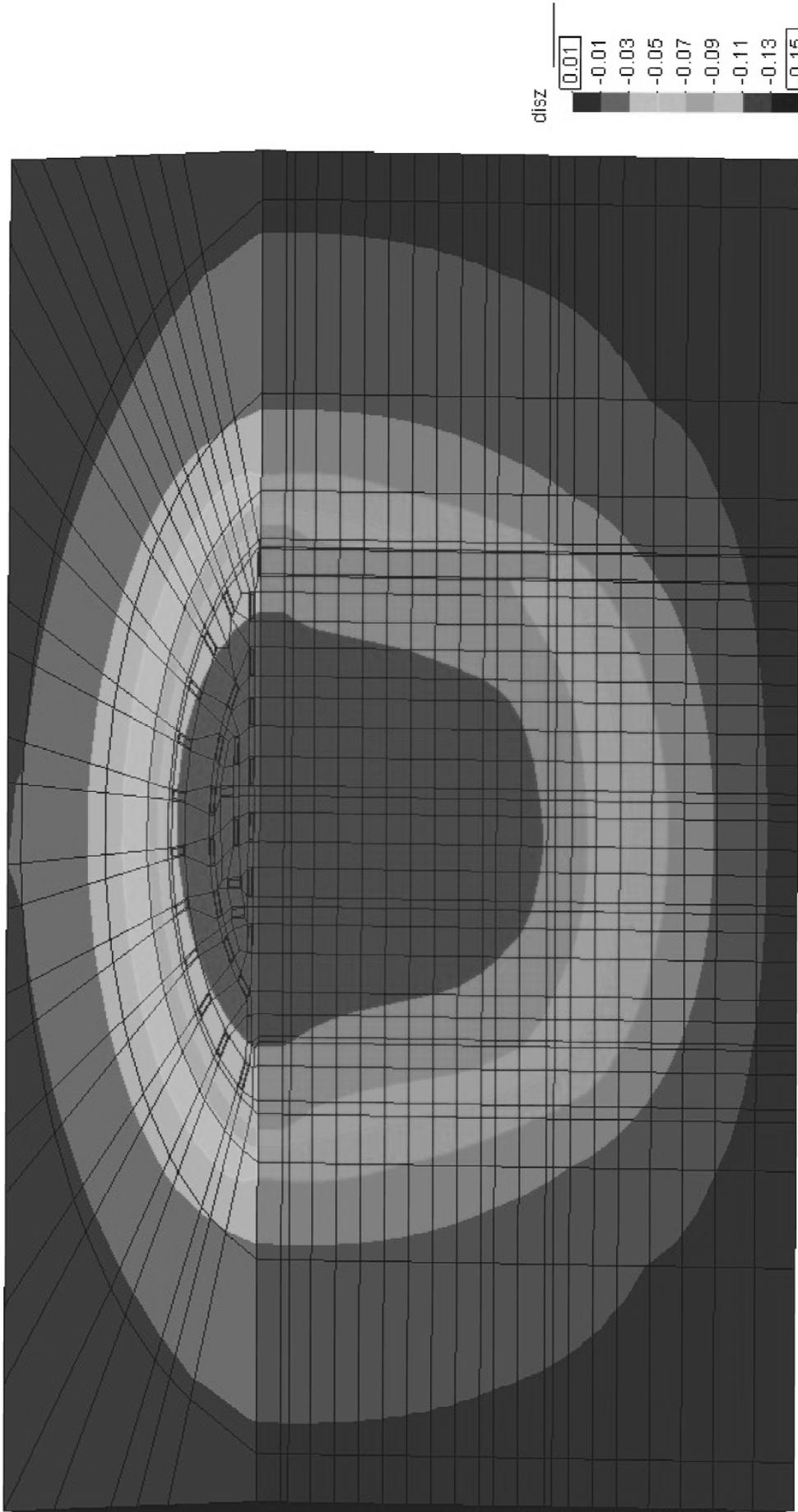


Рис. 9. Результати расчета осадок фундамента

нической категории 3. В рамках проектирования и проведения строительства была предусмотрена обширная программа мониторинга, включающая в себя постоянный геодезический контроль, контроль за уровнем грунтовых вод, а также инклинометрические измерения в склоне. Кроме того, в грунтовых анкерах были установлены измерительные приборы для контроля возникающих усилий. Все полученные в рамках измерений данные сверялись с проектными значениями и анализировались. Приобретенный опыт учитывался при строительстве других зданий комплекса.

Для контроля устойчивости, эксплуатационной пригодности и проверки расчетов высотных зданий башен А и В в рамках проекта комбинированного

свайно-плитного фундамента была разработана отдельная программа мониторинга. Целью программы является замер натурального распределения нагрузок между бареттами и фундаментной плитой.

В общей сложности в фундаменте башни А было установлено 8 датчиков для измерения давления на различных уровнях. Три датчика давления были установлены под фундаментной плитой, чтобы измерять передаваемое на грунт напряжение под подошвой плиты.

Кроме того, измерения проводятся для самых нагруженной внешней баретты и слабо нагруженной баретты внутри ядра с помощью датчиков давления на уровне между фундаментной плитой и оголовком баретты. Эти баретты также оснащены

Среднее значение трения по боковой поверхности по глубине

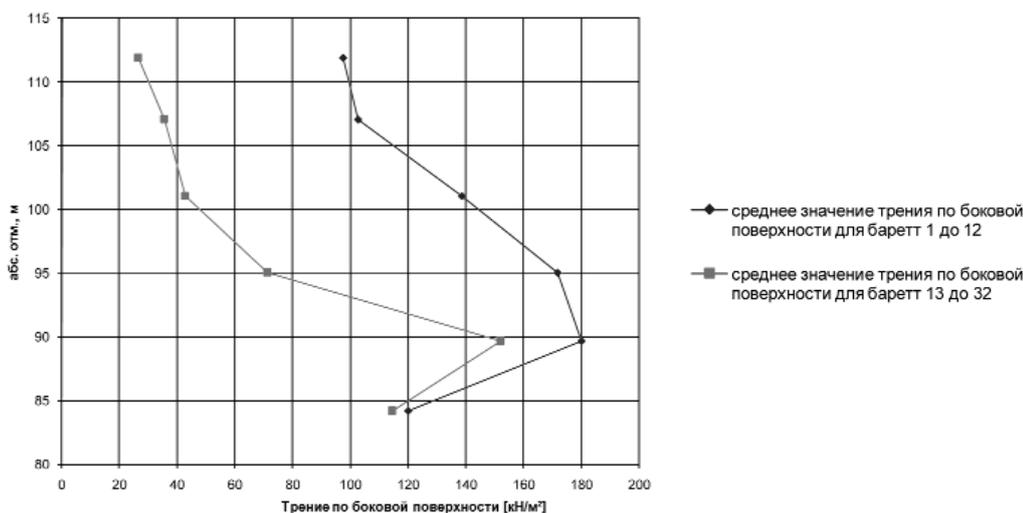


Рис. 10. Распределение нагрузок по глубине для наружных и внутренних баретт

Распределение нагрузок по глубине

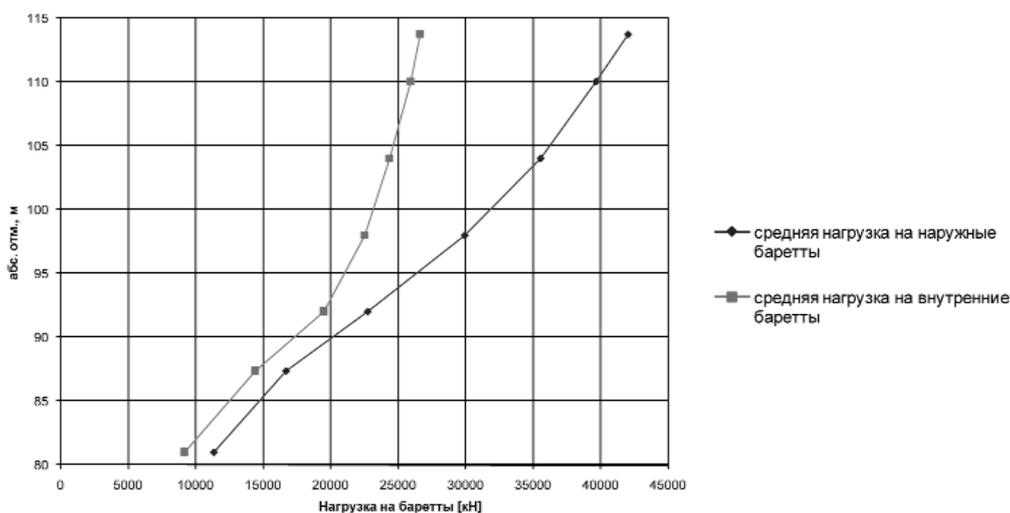


Рис. 11. Распределение мобилизуемого трения по боковой поверхности для наружных и внутренних баретт

тензометрами по длине на трех измерительных уровнях.

В области между ядром и наружными колоннами были установлены тензометры на арматуре, которые должны контролировать напряжение внутри фундаментной плиты. Проект мониторинга и метода наблюдений разрабатывался совместно с НИИ строительного производства.

Выводы

В рамках строительства комплекса «Mirax Plaza» в Киеве был получен уникальный опыт закрепления склона с помощью подпорных стен и анкеров в грунте, применения внешнего водопонижения для уменьшения гидростатических нагрузок на ограждение котлована, строительства комбинированного свайно-плитного фундамента и применения комплексной программы мониторинга.

При расчете несущей способности баретт были применены результаты испытания свай диаметром 0,82 м. В результате моделирования натуральных испытаний свай полученные данные о несущей способности киевских грунтов, в особенности Киевской мергельной глины, а также песков Каневской и Бучаковской свит, подтверждают возможность восприятия более высоких нагрузок, чем это было принято по СНИП 2.02.03-85, и тем самым открывают новые возможности для расчета и оптимизации фундаментов глубокого заложения.

Сегодня расчет бареттных фундаментов проводится по аналогии с фундаментом на буронабивных сваях. При этом влияние масштабного эффекта остается, как правило, неучтенным. Вследствие технической сложности проведения статического испытания баретт оценка их поведения в натуральных условиях также, как правило, базируется на статическом испытании буронабивных свай небольшого диаметра.

В этой связи кажется целесообразным провести ряд натуральных испытаний баретт статической нагрузкой с целью определить коэффициенты пересчета от несущей способности буронабивной сваи к несущей способности баретт.

В настоящий момент ведутся измерения и после их анализа будут получены более точные данные в области поведения комбинированных свайно-плитных фундаментов в киевских грунтах и распределение нагрузок и бареттами между фундаментной плитой.

Анализ результатов измерений и применение комплексной программы мониторинга при высотном и других видах экспериментального строи-

тельства являются основополагающим фактором для усовершенствования знаний и технологий при строительстве нового поколения высотных зданий Киева в будущем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю.Ханиш, Р.Катценбах, Г.Кёниг. *Рекомендации по проектированию, расчету и устройству комбинированных свайно-плитных фундаментов (КСИ), Эрст&Зон, Берлин, 2001.*

2. Plyichev, V. A., Petrukhin, V. P., Kisin, B. F., Kolybin, I. V., Meschansky, A. B. *Geotechnical aspects of «Moscow-City» International Business Center design. Proceedings of the 15th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Volume 2, Istanbul 2001*

3. Katzenbach, R., Hoffmann, H., Vogler, M., Moormann, Ch. *Costoptimized foundation systems of high-rise structures, based on the results of actual geotechnical research. Proc. International Conference Trends in Tall Building – Tendenzen im Hochhausbau?, Frankfurt am Main, 5.-7.9.2001, с. 421-443*

4. EN 1997 EUROCODE 7 *Геотехника. Проектирование, расчеты, параметры; Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik, Geotechnical design*

АНОТАЦІЯ

У статті надано визначення нового для України типу фундаментів — барет, викладена методика їх проектування та правила влаштування. Наведений досвід проектування та влаштування комбінованого бареттно-плитного фундаменту на прикладі проекту Mirax Plaza в Києві.

Ключові слова: висотне будівництво, геотехніка, основи і фундаменти, барети, проектування і влаштування, досвід застосування.

ANNOTATION

In this article the description of the new type of foundation for Ukraine the so called barrettes is provided. Furthermore, the methodology of the design and the construction principles are given. The design experience on the basis of the project Murax Plaza in Kiev for the compiled pile-raft foundations, using barrettes is described.

KeyWords: high-rise building construction, geotechnics, underground construction, foundation engineering, barrettes, designing and attachment, experience of application.