

ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

BASES, FOUNDATIONS AND SUBSTRUCTURES

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2024. Т. 26. № 1. С. 179–193.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2024; 26 (1): 179–193.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 624.15

DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-1-179-193

EDN: WAIQVQ

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ ФУНДАМЕНТА ВЫСОТНОГО ЗДАНИЯ «ЛАХТА ЦЕНТРА»

Сергей Владимирович Никифоров

АО «Синергия», г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. *Актуальность.* Фундамент – наиболее значимый элемент высотного здания. Конструкции фундаментов тесно связаны с общим конструктивным решением каркаса здания и во многом определяются грунтовыми условиями в основании здания.

Обычно высотные здания представляют собой сложные инженерные сооружения, к которым предъявляются повышенные требования прочности, устойчивости и долговечности. Поэтому от прочности, деформативности и устойчивости фундамента и его основания зависит безопасность и долговечность всего здания. Эти принципы позволяют создать фундаменты более высокого качества и несущей способности и с более высоким уровнем надежности и долговечности.

В статье описывается конструкция башни высотой 462 м комплекса «Лахта Центр» в Санкт-Петербурге, являющейся самым высоким зданием в Европе. Особое внимание уделено конструкции и особенностям строительства подземной части башни и ее фундамента.

Цель исследования – оптимизация производственных процессов при строительстве фундаментных конструкций сверхвысотных зданий и сооружений.

Научная новизна – определение наиболее значимых факторов, оказывающих влияние на выбор производственных процессов при возведении сверхвысотных зданий и сооружений.

Основные результаты исследования могут быть применены при эксплуатации и проектировании уникальных зданий и сооружений при их размещении в области распространения слабых, структурно неустойчивых грунтов.

Ключевые слова: высотные здания, коробчатый фундамент, свайное основание, слабые грунты, испытания свай, геотехнический мониторинг, мониторинг напряженно-деформированного состояния

Для цитирования: Никифоров С.В. Особенности конструкции фундамента высотного здания «Лакhta Центра» // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 1. С. 179–193. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-1-179-193. EDN: WAIQVQ

ORIGINAL ARTICLE

HIGH-RISE BUILDING FOUNDATION DESIGN
OF THE LAKHTA CENTER

Sergey V. Nikiforov

AO “Synergy”, Saint-Petersburg, Russia

Abstract. The foundation is the most significant element of buildings. The foundation structure closely relates to the general construction of the building frame and is largely determined by soil conditions. High-rise buildings are complex engineering structures with increased requirements for strength, stability and durability. Therefore, their safety and durability depend on strength, deformity and stability of foundation. These principles allow creating foundations of the higher quality, bearing capacity, reliability, and durability.

Purpose: Optimization of production processes in the construction of foundation structures of super tall buildings and structures.

Research findings: The structural design of the Lakhta Center 462 m high in Saint-Petersburg, which is the tallest building in Europe. A particular attention is paid to the design and construction of the foundation. Key results can prove operation and design of high-rise buildings designed for weak and unstable soils.

Value: Determination of the most significant factors influencing the choice of production processes during the construction of super-tall buildings.

Keywords: high-rise building, box foundation, pile foundation, weak soil, pile testing, geotechnical monitoring, stress-strain state

For citation: Nikiforov S.V. High-rise building foundation design of the Lakhta Center. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2024; 26 (1): 179–193. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-1-179-193. EDN: WAIQVQ

Описание объекта

Основная доминанта многофункционального комплекса «Лакhta Центр» состоит из 87 надземных и трех подземных уровней (рис. 1).

Высотное здание в плане имеет закрученную конусообразную форму. Надземная часть в уровне первого этажа вписана в пятиугольник с длиной стороны 35,2 м. До шестнадцатого этажа размеры каждого последующего этажа увеличиваются. Максимальная длина стороны пятиугольника в уровне шестнадцатого этажа составляет 36,6 м. Выше каждый последующий этаж уменьшается в размерах.

Конструктивная схема высотного здания каркасно-ствольная. Его жесткость и устойчивость обеспечиваются совместной работой центрального ядра и десяти сталежелезобетонных колонн по периметру, соединенных между собой аутригерами, расположенными в уровнях этажей 17–18, 33–34, 49–50, 65–66 и 81. Центральное железобетонное ядро служит основным элементом,

обеспечивающим восприятие горизонтальных нагрузок. Для уменьшения пролетов в здании было введено еще пять сталежелезобетонных колонн до уровня 47-го этажа.

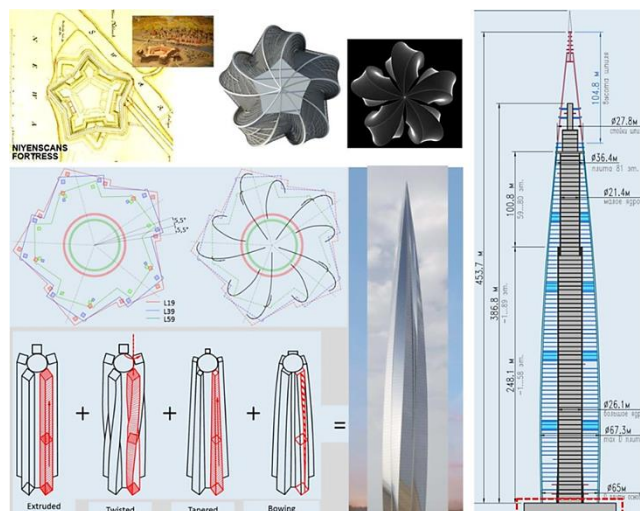


Рис. 1. Схема геометрии башни
Fig. 1. Geometry of high-rise building

Подземные этажи в плане имеют форму равностороннего пятиугольника с длиной стороны 57,5 м (рис. 2). Они образуют коробчатый фундамент, состоящий из нижней плиты толщиной 3,6 м, расположенной на глубине 17,65 м от дневной поверхности, верхней плиты толщиной 2,0 м, центрального ядра жесткости диаметром 28,5 м и десяти вертикальных диафрагм жесткости.

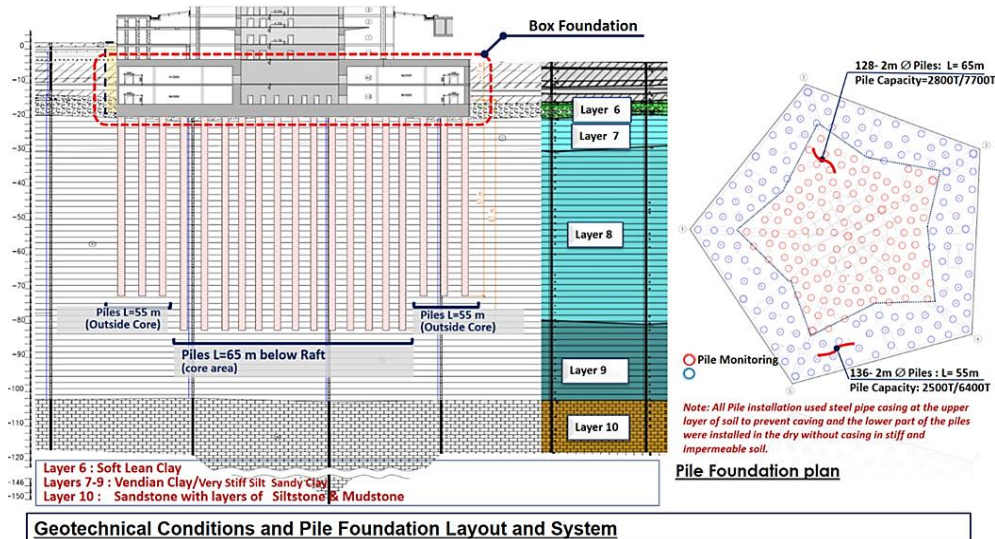


Рис. 2. Конструкция фундамента башни
Fig. 2. Pile foundation design

Коробчатый фундамент опирается через бетонную подготовку на свайное основание из 264 свай диаметром 2,0 м, длиной 55 и 65 м и выполняет функцию равномерного распределения нагрузки с ядра башни на свайное основание. Устройство свай рабочей длиной до 65 м (глубина 84 м с поверхности) выполнено в пределах высотной части здания, в том числе под ядром, а длиной 55 м (74 м с поверхности) – в пределах стилобата. Такое решение обусловлено стремлением снизить относительную неравномерность осадок конструкций коробчатого фундамента и, соответственно, уменьшить напряжения в распределительных радиальных железобетонных конструкциях стен-траверс.

Особенности технологии возведения высотного объекта в инженерно-геологических условиях Санкт-Петербурга. Границы исторического центра Санкт-Петербурга совпадают с областью распространения наиболее слабых, структурно неустойчивых грунтов, включая район Лахты [1].

В пределах территории города кристаллические породы залегают на весьма значительной глубине 180–220 м, что и сегодня делает их недостижимыми для современных технологий свайного фундаментостроения. В пределах Санкт-Петербургского региона залегают песчаники нижнекотлинского горизонта (V2kt1), перекрытые переслаивающимися песчаниками и плотными аргиллитоподобными глинами, на которых залегает мощная толща глин верхнекотлинского горизонта (V2kt2) (рис. 3).

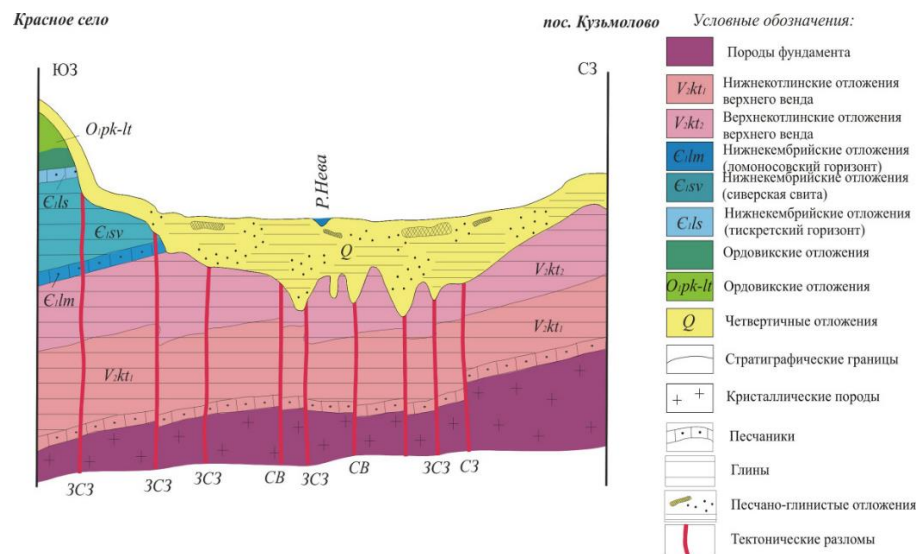


Рис. 3. Схематический геолого-литологический разрез Санкт-Петербурга [1]

Fig. 3. Schematic of geologic-lithologic log of Saint-Petersburg [1]

Эти отложения являются самыми древними осадочными породами, возраст которых составляет 650 млн лет. Наличие многометровой толщи слабых глинистых грунтов на территории Санкт-Петербурга рассматривается как фактор риска для строительной деятельности, отражающий потенциальную опасность развития неблагоприятных событий. Отложения венда, изрытые долина-

ми древних рек, только в XXI в. стали использоваться в качестве основания свайных фундаментов зданий и сооружений. До появления современных свайных технологий этот слой не имел практического значения в строительстве.

При каких же условиях возможно строительство небоскребов в Санкт-Петербурге? В случае, когда нельзя опереться на скальное основание, следует руководствоваться как минимум четырьмя простыми правилами, изложенными ниже [2].

Правило 1. Небоскреб в Петербурге возможен только вне зон палеодолин, т. е. там, где можно опереться на твердые глины венда.

Правило 2. Подземная часть небоскреба должна обеспечивать его надежную заделку в основании.

Правило 3. Подземную часть небоскреба следует устраивать таким образом, чтобы она обеспечивала распределение нагрузок от ядра на большую площадь основания, а также способствовала снижению давления на основание за счет извлечения грунта из объема подземной части.

Правило 4. При проектировании небоскреба следует избегать асимметрии жесткости здания.

Комплекс дочетвертичных вендских глин (vkt2) представлен твердыми и полутвердыми глинами и является наиболее прочным и надежным слоем. Однако кровля этого слоя крайне неравномерно залегает по глубине и, как правило, на значительных глубинах (преимущественно от 20 м и значительно больше). С учетом опыта строительства и по результатам многочисленных исследований установлено, что вендские отложения отличаются твердой консистенцией и слабой водопроницаемостью, обладают высокой несущей способностью и хорошей прочностью.

Модуль деформации в большей степени зависит от напряжённого состояния грунта, чем от плотности и влажности, и при дополнительном нагружении массива грунта вертикальным давлением, равным 1 МПа (что соответствует высоте здания 200 м) и более, модуль деформации твёрдых глинистых грунтов изменяется в 2,5 раза и более.

При устройстве глубоких фундаментов высотных зданий следует принимать во внимание локальный рост трещиноватости толщи коренных глин в процессе производства работ по созданию буронабивных свай. Опыт строительства и начального этапа эксплуатации высотного здания «Лахта Центра» свидетельствует о признаках восходящего перетекания подземных вод вендского водоносного комплекса через трещиноватую глинистую толщу верхнего венда и по боковой поверхности свай [3, 4].

Гидрогеологическое строение участка строительства «Лахта Центра» определяется развитием четвертичного безнапорного водоносного комплекса (рис. 4). Водоносный горизонт приурочен к морским и озерным отложениям, представленным супесчаными грунтами, крупными, мелкими песками, перекрытым, как правило, влажными намывными песками. В связи с неоднородностью этого горизонта существует большой разброс значений коэффициентов фильтрации от десятых долей до десяти м/сут. Грунтовые воды со свободной поверхностью зафиксированы на глубине 1,5 м, на абсолютной отметке 0,1 м. Общая разгрузка водоносного горизонта осуществляется в сторону

Финского залива. Относительным водоупором, подстилающим приповерхностный водоносный горизонт, является пласт ленточных глин и суглинков озерно-ледникового генезиса суммарной мощностью 6,2 м.

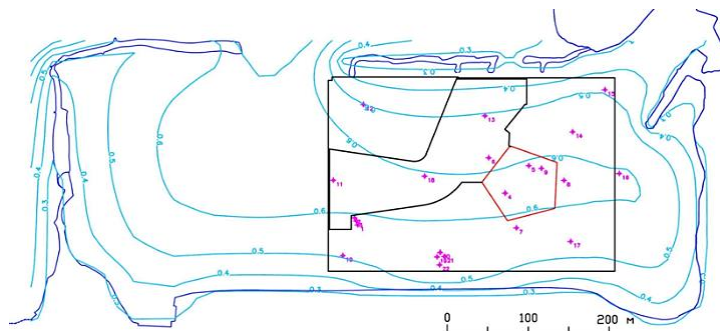


Рис. 4. Карта гидроизогипс приповерхностного водоносного горизонта
Fig. 4. Water table contour of the near-surface

Уровенный режим приповерхностного водоносного комплекса целиком определяется уровнем воды в Финском заливе, амплитуда изменений которого на коротких временных интервалах (в течение 1–3 сут) может составлять 0,3–0,5 м, повышаясь до 1,0–1,5 м в отдельные дни в пределах всего годового цикла (включая зимний период). Участок фактически полностью ограничен по периметру водоемами, гидравлически связанными с Финским заливом, причем уровни воды в этих водоемах практически соответствуют уровням в заливе.

Отложения, залегающие под пластом ленточных глин и суглинков, целесообразно рассматривать в качестве напорного водоносного горизонта. В нижней части разреза выделяется Котлинский водоносный горизонт, вмещающими породами для которого служат песчаники и алевролиты.

Испытания грунтов сваями. Проектирование конструкций фундамента высотного здания в условиях присутствия у поверхности глинистых грунтов невысокой несущей способности является сложной инженерной задачей. Поэтому нагрузка от сооружения передается с помощью свай на твердые вендские глины (ИГЭ 7–9 на рис. 5) с модулем деформации, увеличивающимся с глубиной от 28 до 340 МПа, особенностью которых является наличие реологических свойств, способных увеличить конечную осадку сооружения до 30 %.

Были проведены масштабные исследования грунтов на площадке строительства, которые позволили определить модули деформаций слоев грунта до глубины 120 м. На основании этих данных были определены отметки залегания свай на 82 м ниже поверхности земли, их диаметры, а натурные испытания свай позволили определить их предельную несущую способность.

Статические испытания свай самозаанкеривающейся сваей-штампом (метод погруженного домкрата – ячейка Остерберга) являются наиболее эффективными при испытании буронабивных свай большого диаметра с высокой несущей способностью, т. к. позволяют выполнить более полную оценку работы свай без применения грузовых платформ и анкерных свай (рис. 6).

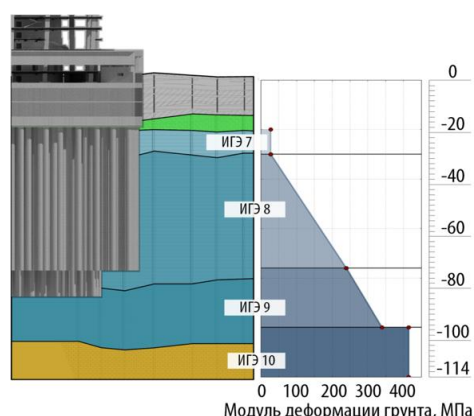


Рис. 5. Грунтовые условия площадки строительства
Fig. 5. Soil conditions on construction site

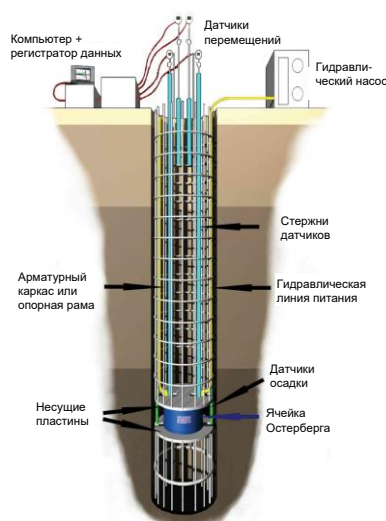


Рис. 6. Схема испытаний свай ячейками Остерберга
Fig. 6. Testing of piles with Osterberg cells

Основным преимуществом испытания свай двунаправленной нагрузкой (метод Остерберга) является возможность достижения высоких испытательных нагрузок (стандартные методы создают испытательные нагрузки до 30 МН). С помощью ячеек с погруженным гидравлическим домкратом можно передавать нагрузки до 300 МН (30 000 тс).

В рамках предпроектных инженерных изысканий для строительства «Лахта Центра» были проведены испытания опытных буронабивных свай (с гидравлическими домкратами и разделением свай на сегменты) следующих параметров:

- диаметром 2000/1900 мм с отметкой подошвы свай на абс. отм. –81,90 м;
- диаметром 2000/1900 мм с отметкой подошвы свай на абс. отм. –71,90 м.

Сваи изготовлены установкой ВГ 40 под защитой обсадной трубы до отметки дислоцированных вендовских глин. Испытания проводились в соответствии с Программой испытаний свай под руководством НИИОСП им. Н.М. Герсевича, осуществляющим научно-техническое сопровождение испытаний.

Целями испытаний являлись:

- определение несущей способности одиночной буронабивной сваи;
- определение зависимости нагрузка-осадка для одиночной сваи при приложении к ней статической нагрузки;
- определение предельных величин сопротивления буронабивной сваи по боковой поверхности и по пяте (острию);
- подтверждение расчетной проектной нагрузки на буронабивную сваю при принятой технологии устройства в рассматриваемых грунтовых условиях.

Результаты испытаний свай представлены на рис. 7.

На основании проведенных испытаний свай установлено, что сваи с глубиной погружения до абс. отм. –81,90 м при приложении нагрузки на голову сваи 36,0 МН получают осадку 22,0 мм; при приложении нагрузки на голову 67,0 МН

сваи получают осадку 40,0 мм; сваи с глубиной погружения до абс. отм. –71,90 м при приложении нагрузки на голову сваи 36,0 МН получают осадку 24,0 мм; при приложении нагрузки на голову 61,0 МН сваи получают осадку 40,3 мм.

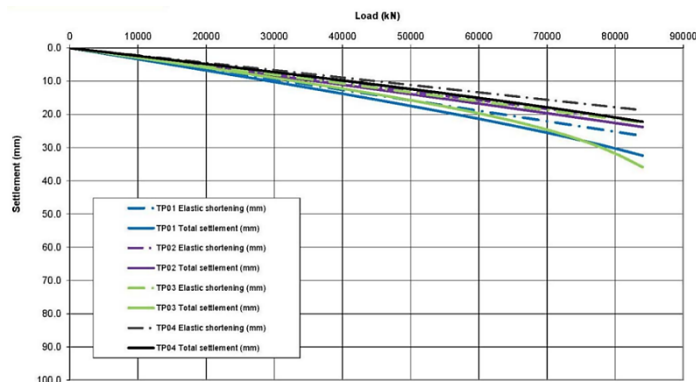


Рис. 7. Прогноз зависимости осадки от нагрузки

Fig. 7. Predicted load/settlement dependence

Свайное основание высотного здания состоит из 264 буронабивных свай диаметром 2000 мм и длиной 55 и 65 м от низа фундамента, расположенных с шагом от 4 до 6 м (рис. 8). Поскольку буронабивные сваи выполнялись с поверхности земли, а не со дна котлована, фактическая глубина бурения под сваи составила 72 и 82 м соответственно. Расчетная несущая способность свай длиной 55 м составила 3100 т согласно нормам и 6100 т – по результатам испытаний. Средняя расчетная нагрузка на сваю – 2545 тс. Сваи выполнялись из бетона класса В40 и армировались стержнями диаметром 32 мм.

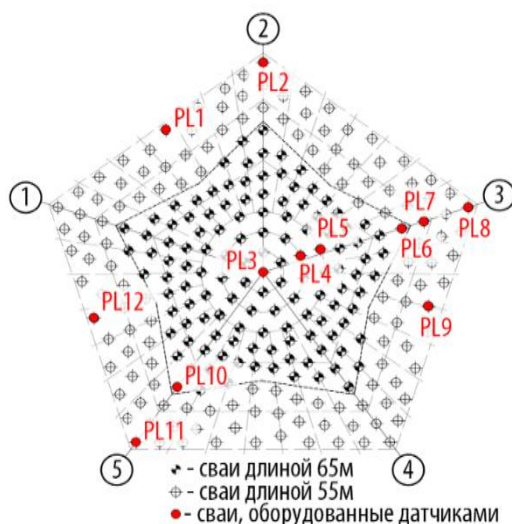


Рис. 8. План свайного основания башни

Fig. 8. Pile foundation plan of the tower

Для того, чтобы свая не повредила гидроизоляцию, был разработан специальный узел, при котором свая заделывалась в железобетонную подготовку, устраиваемую под нижней плитой коробчатого фундамента (рис. 9) и сопрягаемую через шов скольжения. Свободное опирание ростверка на сваи при размещении ствола в слабых грунтах формально противоречило требованиям действовавшей во время строительства здания редакции СНиП «Свайные фундаменты», однако расчёты показали, что прочность грунтов на глубине заложения ростверка достаточна для исключения потери устойчивости свайного основания. Актуальные редакции норм (п. 8.8 СП 24.13330.2021 и п. 13.18 СП 248.1325800.2016) допускают свободное опирание при проектировании свайных фундаментов в глубоких котлованах и обеспечении надежных решений гидроизоляции. По головам свай выполняется бетонная подготовка толщиной не менее 200 мм, по которой устраивается гидроизоляционный слой и его защитная подготовка с последующим устройством фундаментной плиты.

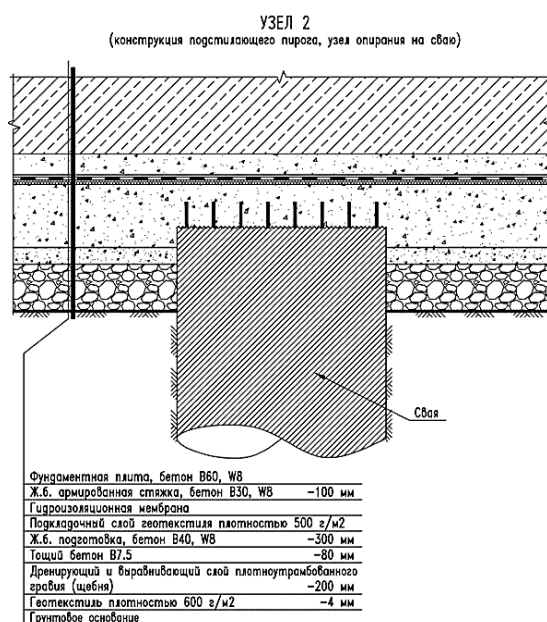


Рис. 9. Заделка свай в железобетонную подготовку под фундаментной плитой
Fig. 9. Pile embedding in reinforced concrete under foundation slab

Для бурения скважин в грунте на глубину 85 м применялся шнек диаметром 1,8 м и специально разработанный расширитель до 2,0 м (рис. 10). В верхней части скважина обсаживалась обсадными трубами наружным диаметром 2,0 м, которые погружались с помощью специального стола. Глубина их принималась, исходя из возможности захода в слой вендских глин на 5 м с целью надежной изоляции скважины от подземных вод.

При выполнении свай для контроля качества устройства скважины использовалась специально разработанная тренога с утяжелителем, которая опускалась в забой скважины.



Рис. 10. Шнек для проходки скважин и монитор с подсветкой для исследования забоя скважины
Fig. 10. Wellbore auger and backlit monitor for bottom-hole investigation

Конструкция коробчатого фундамента. Вес здания от нормативных нагрузок, включая вес коробчатого фундамента, составляет 493 000 т. Значительная (около 70 %) часть этих нагрузок приходится на небольшой участок диаметром 26 м, ограниченный круглым центральным ядром башни. Давление под подошвой фундамента на этом участке составляло 6500 кПа. Поскольку напрямую передать на грунт основания такую колоссальную нагрузку было невозможно, перед авторами проекта стояла задача максимально распределить это давление на периферию [5]. Первым шагом в решении возникшей проблемы было распределение нагрузок с зоны ядра на периферию за счет диафрагм жесткости. Вторым логичным шагом стало появление верхней плиты, объединяющей всю систему в единый коробчатый фундамент, обеспечивший более экономичное решение. Расчеты показали, что такой фундамент обладает высокой жесткостью (разность осадок между зоной ядра и периферией не превышает 25–30 мм) и успешно справляется с задачей снятия и равномерного распределения нагрузки с ядра диаметром 26 м на равносторонний пятиугольник (пентагон) подземной части здания с длиной стороны 57,5 м. После всех проведенных мероприятий среднее давление под подошвой фундамента башни от нормативных нагрузок составило 870 кПа.

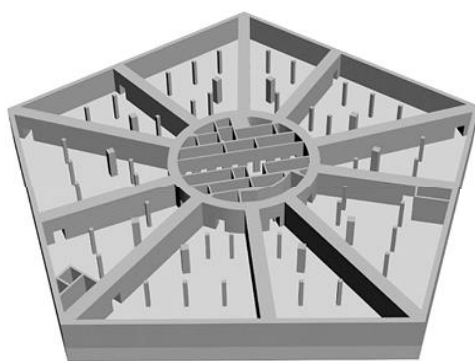
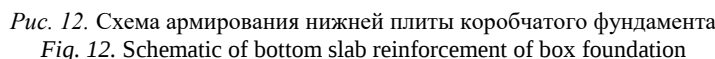


Рис. 11. Коробчатый фундамент башни
Fig. 11. Box foundation of the tower

В итоге в проекте высотного здания «Лахта Центра» был принят коробчатый фундамент (рис. 11). Нижняя плита, расположенная на относительной отметке –17,650, имеет толщину 3600 мм, верхняя плита, расположенная на относительной отметке –4,650, выполнена толщиной 2000 мм. Совместную работу нижней и верхней плит коробчатого фундамента обеспечивают 10 диафрагм жесткости толщиной 2500 мм, расходящихся от ядра здания в радиальном направлении. В коробчатом фундаменте был приме-

Для восприятия больших растягивающих усилий, которые составляют 2300 т/пм, нижняя фундаментная плита армирована 15 арматурными сетками по высоте со стержнями диаметром 32 мм из стали А500С, расположенными с шагом 150 мм (рис. 12). В защитных слоях бетона плиты на расстоянии 25 мм от верхней и нижней поверхности установлена противоусадочная сетка с ячейками 100×100 мм. Верхняя плита фундамента также армирована стержнями диаметром 32 мм из стали А500С, расположенными с шагом 150 мм. Между верхней и нижней плитами коробчатого фундамента расположена средняя плита толщиной 0,4 м [6].



На первом этапе по всему периметру котлована выполнялась насыпь до абсолютной отметки +4,50 м с устройством форшахты. Разработка траншеи для устройства монолитной железобетонной стены в грунте толщиной 1200 мм с отметкой верха +1,0 м выполнялась плоским грейфером под защитой бентонитового раствора (рис. 13).

Далее производилась срезка насыпи и затем последовательная экскавация грунта из котлована с устройством временных монолитных железобетонных дисков перекрытий в четырех уровнях на абсолютных отметках $-0,70$, $-3,70$, $-6,70$ и $-10,70$ м (рис. 13). После экскавации грунта до проектной отметки $-16,95$ м по всей площади котлована выполнялась щебеночная и силовая железобетонная подготовка.

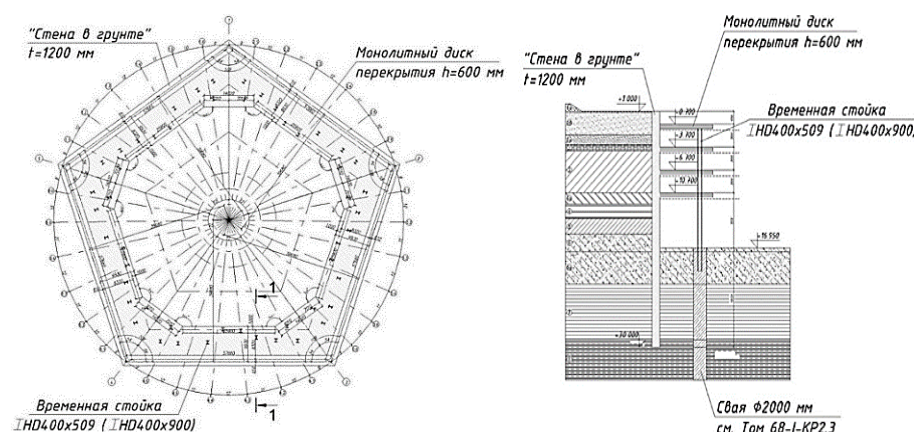


Рис. 13. Конструкция ограждения котлована
Fig. 13. Excavation fence design

После набора прочности железобетонной подготовки производился демонтаж диска перекрытий на отм. $-10,70$ м, устройство гидроизоляции и фундаментной плиты с абсолютной отметкой верха $-12,65$ м. Затем осуществлялся демонтаж временного перекрытия на отм. $-6,70$ м, возведение конструкций подземной части на абсолютной отметке $-10,70$ м, диска перекрытия на отм. $-6,80$ м и далее по аналогичной схеме.

Возведение непосредственно коробчатого фундамента происходило поэтапно, начиная с нижней плиты и заканчивая верхней. При этом наиболее сложным с технологической точки зрения является устройство нижней плиты и радиальных стен [7]. Армирование плиты, состоящее из 15 горизонтальных сеток (см. рис. 12), необходимо было выполнить таким образом, чтобы все стержни в сетках располагались строго друг над другом и при этом сохраняли свое положение в процессе заливки бетона.

Бетонированию нижней плиты предшествовала огромная подготовительная работа, которая заключалась в подборе оптимального состава бетонной смеси, выборе технологических приемов, отвечающих установленным требованиям по качеству конструкции. Такие факторы, как массивность, плотность армирования (более 450 кг/м^3), а также величина воспринимаемых конструкцией нагрузок, предполагают особые требования к параметрам бетонной смеси: низкая расслаиваемость, пониженное тепловыделение, высокая подвижность.

Для осуществления непрерывного бетонирования конструкции такого размера было предусмотрено одновременное использование 18 бетононасосов, расположенных по периметру котлована, бетонную смесь к которым подвозили 40 автобетоносмесителей. При этом расчетная скорость укладки смеси должна была быть не менее $450 \text{ м}^3/\text{ч}$ [8, 9]. Заливка нижней плиты продолжалась в течение 49,2 ч, при этом было уложено $19\,624 \text{ м}^3$ бетонной смеси. Таким образом, был установлен новый мировой рекорд по объему непрерывного бетонирования, который был зафиксирован специальной комиссией, присутствовавшей на протяжении всего процесса заливки.

Вторая очередь конструкций коробчатого фундамента состоит:

- из стен нижнего и верхнего ярусов коробчатого фундамента толщиной от 1 м (периметральные) до 2,5 м (радиальные и ядра жесткости), внутренних стен ядра жесткости толщиной от 300 до 400 мм, колонн сечением 1350×1350 и 700×700 мм;

- средней плиты толщиной 400 мм.

В силу своих габаритов наиболее сложными с точки зрения технологии возведения являются радиальные стены и кольцевая стена ядра. Ввиду большой высоты стен армирование производилось с нескольких ярусов, для чего предварительно были собраны строительные леса (рис. 14).



Рис. 14. Армирование стен коробчатого фундамента
Fig. 14. Reinforcement of box foundation walls

Выводы

Выявлена необходимость учёта специфических характеристик твёрдых глинистых грунтов, таких как параметры переуплотнения, анизотропия деформационных характеристик, изменение модуля деформации по глубине, ползучесть, трещиновато-блочная структура толщи коренных глин.

Проанализирован опыт устройства свайных фундаментов с опорой на твёрдые вендские глины с переменным модулем деформации; приведены рекомендации по проведению испытаний свай при высоких нагрузках и технологии устройства скважин в глинистых грунтах.

Представлено описание конструкции коробчатого фундамента башни, позволяющей эффективно распределить нагрузку от высотного здания от ядра к периферии. Приведено описание технологии устройства подземной части высотного здания, включая возведение ограждающей конструкции котлована типа «стена в грунте» с временными дисками перекрытий, бетонирование нижней плиты коробчатого фундамента, устройства наружных и радиальных стен, перекрытий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Дашко Р.Э., Александрова О.Ю., Котюков П.В., Шидловская А.В. Особенности инженерно-геологических условий Санкт-Петербурга // Развитие городов и геотехническое строительство. 2011. № 1. С. 1–47.
2. Шашкин А.Г. Проектирование зданий и подземных сооружений в сложных инженерно-геологических условиях Санкт-Петербурга. Москва : Геомаркетинг, 2014. 352 с.
3. Дашко Р.Э., Лохматиков Г.А. Верхнекотлинские глины Санкт-Петербургского региона как основание и среда уникальных сооружений: инженерно-геологический и геотехнический анализ // Записки Горного института. 2022. Т. 254. С. 180–190.
4. Дашко Р.Э., Лохматиков Г.А. Трещиноватость глинистых пород как ключевой фактор при их геотехнической оценке в качестве оснований сооружений // Геотехника. 2021. Т. XIII. № 3. С. 20–31.
5. Abdelrazaq A., Travush V., Shakhvorostov A., Timofeevich A., Desyatkin M., Jung Hyungil. The Structural Engineering Design and Construction of The Tallest Building in Europe Lakhta Center, St. Petersburg, Russia // International Journal of High-Rise Buildings. 2020. V. 9. № 3. P. 283–300.
6. Илюхина Е.А., Лахман С.И., Миллер А.Б., Травуш В.И. Конструктивные решения высотного здания «Лакhta Центр» в Санкт-Петербурге // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering, 2019. Т. 15. № 3. С. 14–39.
7. Травуш В.И., Шахворостов А.И. Бетонирование нижней плиты коробчатого фундамента башни комплекса «Лакhta Центр» // Высотные здания. 2015. № 1. С. 92–101.
8. Колчеданцев Л.М., Волков С.В. Организационно-технологические решения по транспортированию бетонной смеси к месту бетонирования конструкций высотных зданий // Жилищное строительство. 2015. № 11. С. 21–26.
9. Колчеданцев Л.М., Волков С.В., Волкова Л.В. Организационно-технологические решения по устройству фундаментов высотных зданий // Жилищное строительство. 2016. № 9. С. 50–54.

REFERENCES

1. Dashko R.E., Aleksandrova O.Yu., Kotyukov P.V., Shidlovskaya A.V. Geotechnical Conditions in Saint-Petersburg. *Razvitie gorodov i geotekhnicheskoe stroitel'stvo*. 2011 (1): 1–47. (In Russian)
2. Shashkin A.G. Design of buildings and underground structures in challenging engineering geology conditions in Saint-Petersburg. Moscow: Geomarketing, 2014. 352 p. (In Russian)
3. Dashko R.E., Lokhmatikov G.A. Verkhnekotlinsky Clays of Saint-Petersburg region as soil foundation for unique buildings and structures: Engineering geology and geotechnical analysis. *Zapiski Gornogo instituta*. 2022; 254: 180–190. (In Russian)
4. Dashko R.E., Lokhmatikov G.A. Fracture density of clay rocks as a key factor in geotechnical assessment of soil foundations. *Geotekhnika*. 2021; 13 (3): 20–31. (In Russian)
5. Abdelrazaq A., Travush V., Shakhvorostov A., Timofeevich A., Desyatkin M., Jung H. The structural engineering design and construction of the tallest building in Europe Lakhta Center, Saint-Petersburg. *International Journal of High-Rise Buildings*. 2020; 9 (3): 283–300.
6. Ilyukhina E.A., Lakhman S.I., Miller A.B., Travush V.I. Structural engineering solutions for high-rise building of Lakhta Center in Saint-Petersburg. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2019; 15 (3): 14–39.
7. Travush V.I., Shakhvorostov A.I. Concreting of box foundation bottom slab of the Lakhta Center. *Vysotnye zdaniya*. 2015; (1): 92–101. (In Russian)
8. Kolchedantsev L.M., Volkov S.V. Engineering solutions of concrete mixture transportation to construction sites of high-rise buildings. *Zhilishchnoe stroitel'stvo*. 2015; (11): 21–26. (In Russian)
9. Kolchedantsev L.M., Volkov S.V., Volkova L.V. Engineering solutions of high-rise building foundations. *Zhilishchnoe stroitel'stvo*. 2016; (9): 50–54. (In Russian)

Сведения об авторе

Никифоров Сергей Владимирович, директор по проектированию, АО «Синергия»,
190000, г. Санкт-Петербург, ул. Большая морская, 24, sergeivnikiforov@gmail.com

Authors Details

Sergey V. Nikiforov, Director for Engineering, AO “Synergy”, 24, Bolshaya Morskaya Str.,
190000, Saint-Petersburg, Russia, sergeivnikiforov@gmail.com

Статья поступила в редакцию 15.01.2024
Одобрена после рецензирования 19.01.2024
Принята к публикации 22.01.2024

Submitted for publication 15.01.2024
Approved after review 19.01.2024
Accepted for publication 22.01.2024