

## ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ НАГРУЖЕНИЕ СВАЙ ДЛЯ УМЕНЬШЕНИЯ НЕРАВНОМЕРНЫХ ОСАДОК ЗДАНИЙ

*Х. БРАНДЛЬ – профессор, директор Института механики грунтов и геотехники, Технический университет, г. Вена, Австрия.*

Предварительное и циклическое нагружение свай – новый метод, используемый для уменьшения общей и дифференциальной осадок высотных зданий и/или конструкций, воспринимающих статическую нагрузку. В ходе применения данного метода в качестве противовеса используются плита фундамента или свайный ростверк. В данной статье описывается технология применения этого метода при расширении и усилении моста и строительстве 202-метрового высотного здания.

### ВВЕДЕНИЕ

Результаты многочисленных широко-масштабных испытаний позволяют утверждать, что несущая способность свай внутри одной конструкции неодинакова. Это может привести к возникновению зон обжимающих напряжений внутри конструкций, перераспределению напряжений с последующим локальным перенагружением и развитию неравномерных осадок. Для предупреждения подобных последствий, а также для уменьшения абсолютных осадок была разработана технология предварительного и циклического нагружения, которая задействует все несущие сваи здания и не препятствует выполнению строительных работ. Отдельные сваи и группы свай нагружались следующим образом: прикладывалась статическая нагрузка, превышающая величину проектной минимум на 20%. На головы свай устанавливались домкраты, а в тех случаях, когда плоские домкраты оставались в конструкции, также устанавливалось оборудование для последующего инъецирования. Это позволяло обеспечить окончательную связь между сваями и плитой фундамента после завершения строительства здания.

Важно было не только минимизировать общую осадку свайного или плитно-свайного

фундамента, но и избежать неравномерности осадок отдельных свай. Опыт показывает, что в большинстве случаев для этого необходимо создать несколько петель гистерезиса с двумя-тремя циклами нагружения – разгрузки свай. В результате можно получить сходные градиенты для окончательного статического нагружения в условиях эксплуатации вдоль всего участка свай.

### 1. УСИЛЕНИЕ ФУНДАМЕНТОВ МОСТА

После открытия железного занавеса значительно возросла интенсивность транспортного потока, поэтому появилась необходимость расширения и укрепления одного из главных мостов Вены, построенного 30 лет назад. Кроме того, для строительства гидроэлектростанции потребовалось поднять настил моста на 1,8 м. Мост представляет собой 1022-метровую конструкцию с длиной полотна от 40 до 210 м. Конструкция, воспринимающая статические нагрузки, построена из пустотных коробчатых балок (одна на каждую полосу), которые соединяют 413-метровую центральную стальную секцию моста с остальными конструкциями, выполненными из предварительно-напряженного железобетона. Предполагалось расширить полотно моста на одну полосу с каждой стороны (до 8 полос), что

позволило бы увеличить пропускную способность до 225000 автомобилей в день.

Старый фундамент имел в своем составе буронабивные сваи большого диаметра ( $d = 1,8$  м), опирающиеся в слой третичных отложений (от супеси до глин), над которым располагается тонкий слой четвертичного гравия с песком. Этот фундамент не выдерживал увеличившейся нагрузки и не отвечал современным нормам строительства. Кроме того, статически неопределимая конструкция была чувствительна к неравномерным осадкам, возникающим на разных стадиях подъема и расширения моста из-за постоянного изменения величин статических нагрузок.

Для усиления старого фундамента под каждой опорой моста устраивалось по 6 дополнительных свай, которые объединялись с помощью свайного ростверка. До создания

сложной статической системы все сваи нагружались таким образом, чтобы величина нагрузки составляла 120% от рабочей нагрузки при эксплуатации моста с учетом его расширения и максимальной интенсивности транспортногo потока. На рис. 1 и 2 представлены сечение и план одной из опор моста.

На рис. 3 и 4 показаны поперечные сечения конструкций, на которых также показано оборудование для предварительного нагружения, использовавшееся для циклического нагружения свай до их объединения единую статическую в систему.

Две одинаковые сваи, расположенные симметрично по отношению к оси моста, предварительно нагружались путем ступенчатого приложения нагрузки. Это включало циклическое нагружение–разгрузку, необходимое для получения сходных кривых «на-

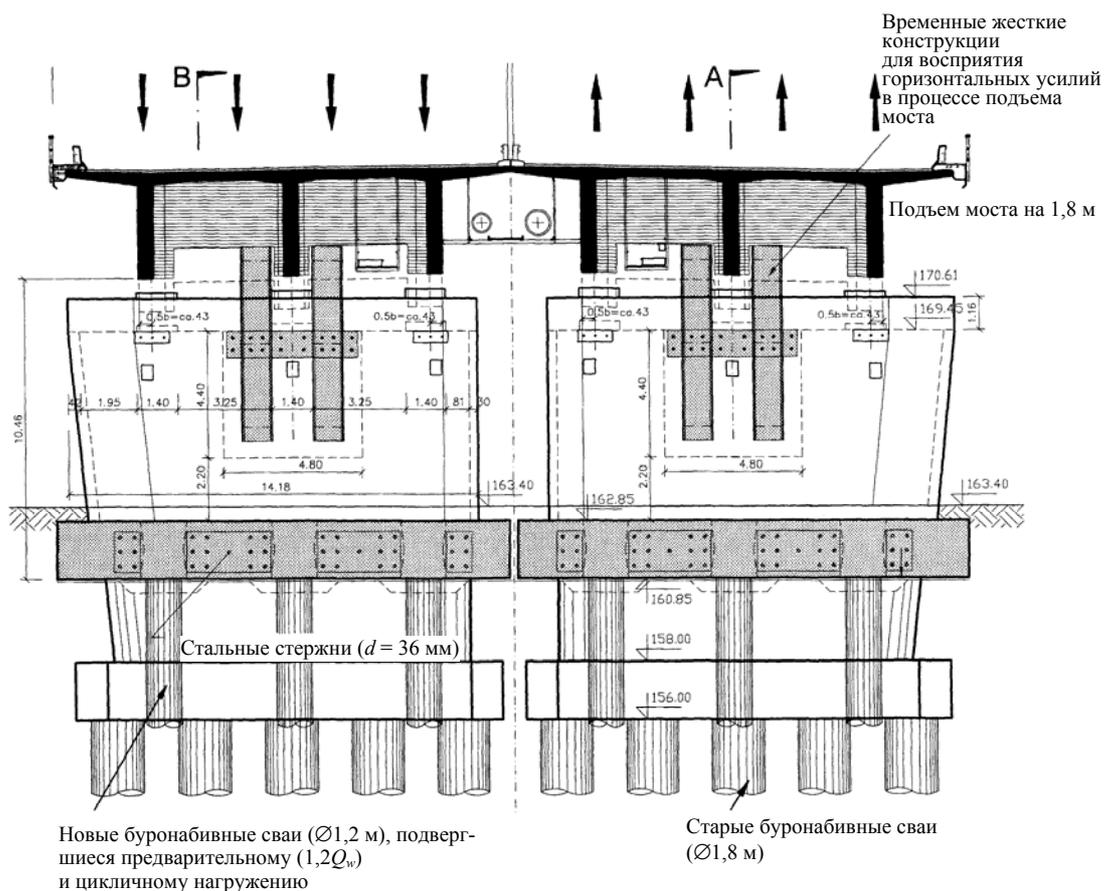


Рис. 1. Сечение конструкции моста

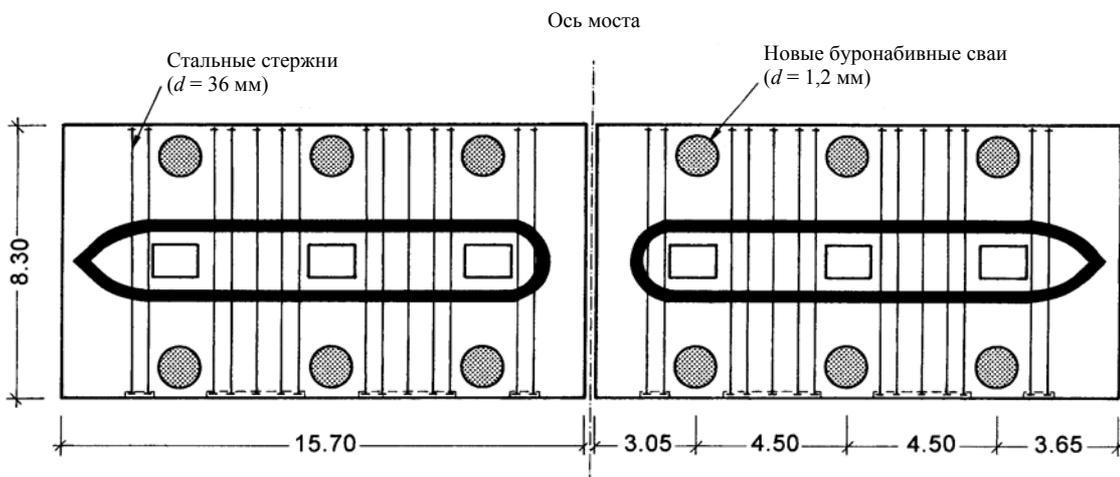


Рис. 2. План моста (показано расположение новых свай, подвергнутому предварительному и циклическому нагружению до подъема моста)

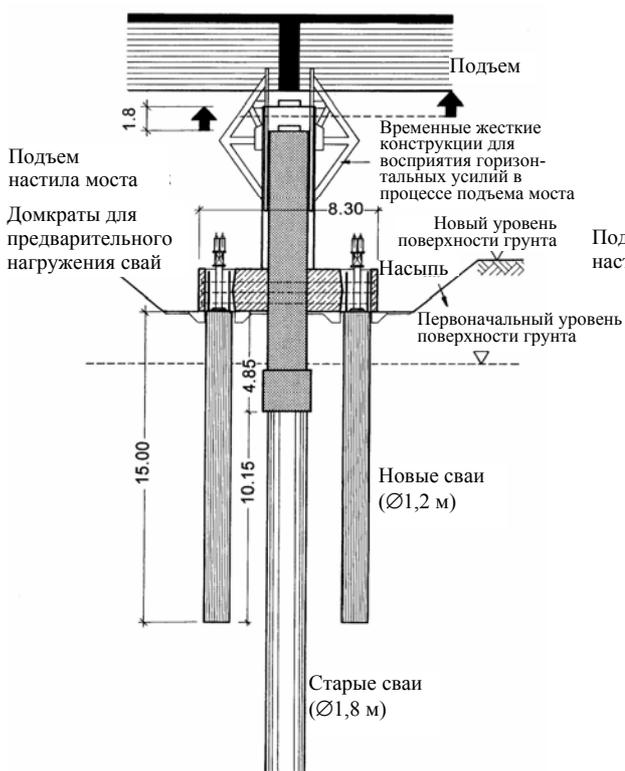


Рис. 3. Поперечное сечение А-А к рис. 1 (применение гидравлических домкратов для предварительного и циклического нагружения свай)

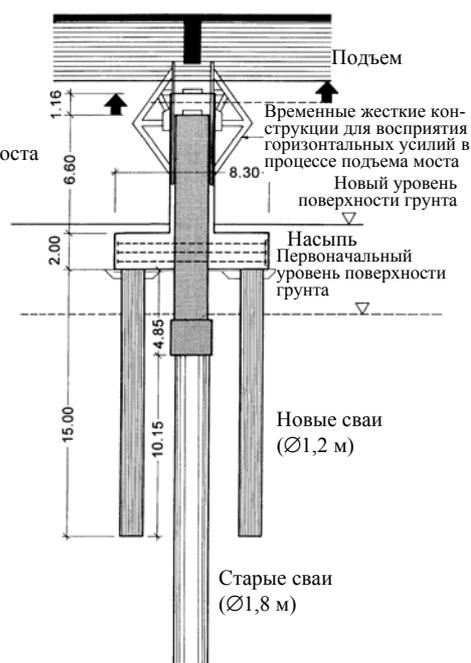


Рис. 4. Поперечное сечение В-В к рис. 1

грузка–осадка» в пределах величин рабочих нагрузок для всех свай опоры. На рис. 5 и 6 показаны некоторые детали рис. 3, относящиеся к плите и арматуре.

На рис. 7 показаны кривые «нагрузка–осадка» для группы из 12 свай, устроенных под одной из опор моста. Здесь четко видно отличие первого нагружения, а также одно-

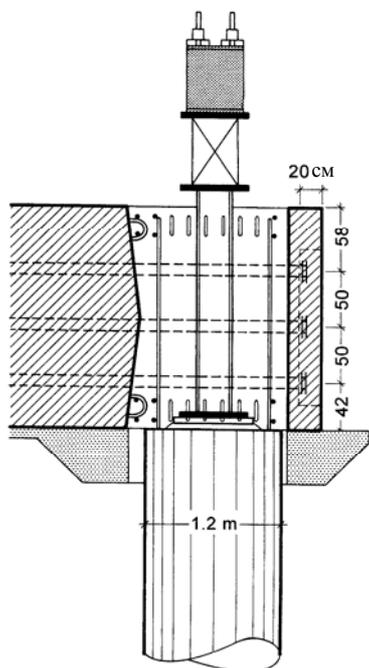


Рис. 5. Фрагмент рис. 3

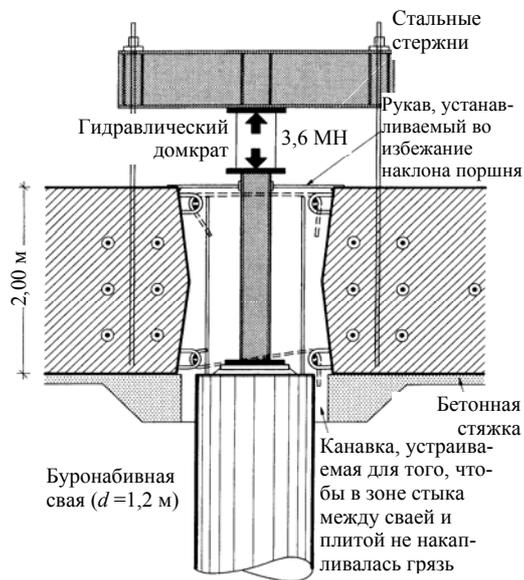


Рис. 6. Фрагмент рис. 3, 5 (поперечное сечение)

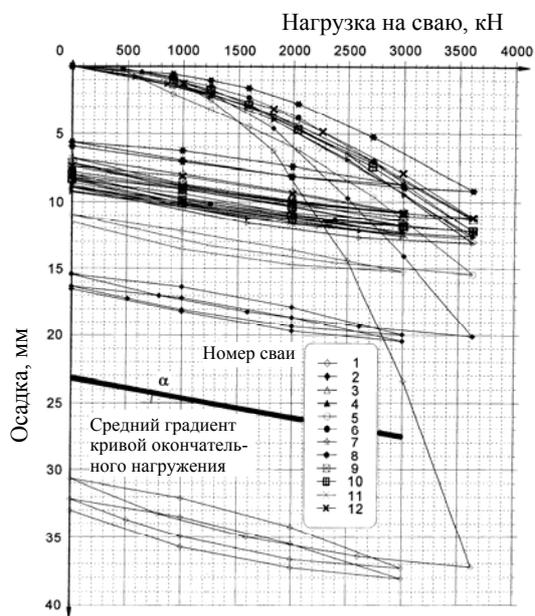


Рис. 7. Петли гистерезиса для процедуры предварительного и циклического нагружения 12 буронабивных свай, расположенных под одной из опор моста (к рис. 1, 2)

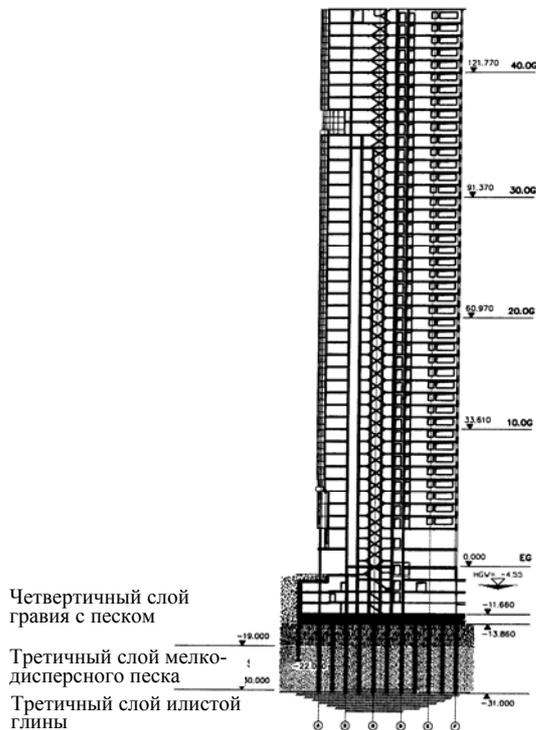


Рис. 8. Поперечный разрез части основной конструкции 202-метровой башни Миллениум (Вена)

родные градиенты кривых после 2-3 петель гистерезиса. После завершения предварительного и циклического нагружения и снятия домкратов новые сваи, их ростверки (плита размером 31,4×8,3 м) и старые конструкции объединялись в единую статическую систему. Таким образом, изменяющиеся нагрузки, возникающие в процессе подъема и расширения моста, могли передаваться на грунт, не приводя к возникновению абсолютных и неравномерных осадок.

## 2. ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ НАГРУЖЕНИЕ ПЛИТНО-СВАЙНОГО ФУНДАМЕНТА

### 2.1. Проект

Здание Миллениум в Вене включает 202-метровую основную башню, вокруг которой расположено 8-этажное сооружение. Три этажа этого сооружения находятся ниже уровня грунтовых вод. Ядро этого архитектурного ансамбля лежит на плитно-свайном фундаменте (площадь плиты 1600 м<sup>2</sup>), а прилегающие части – на обычном плитном фундаменте. Для откопки 15-метрового котлована для фундамента глубокого заложения в условиях плотной городской застройки необходимо было соорудить 25–30-метровую стену в грунте, укрепленную преднапряженными анкерами. Подошва стены не доходила до слоя глинистого водоупора, стена была спроектирована как неполная отсечная стена в слое пылеватого песка, чередующегося с илистыми отложениями. Чтобы понизить уровень грунтовых вод в слоях четвертичных и третичных отложений, на территории, ограниченной стеной в грунте, потребовалось соорудить 12 двух-уровневых колодцев.

Согласно первоначальному проекту, во время строительства высотного здания и прилегающих сооружений, для компенсации неравномерной осадки между отдельными конструкционными блоками, предполагалось использование сложного оборудования для проведения повторного выравнивания. Осуществление подобных операций требовало бы проведения мониторинга и регулирования уровня конструкций в течение длительного периода. Поэтому был разработан альтернативный проект: локальное улучшение свойств грунта по-

средством виброуплотнения, а также предварительного нагружения (перенагружение и циклическое нагружение) всех свай. Гидровиброуплотнение применялось главным образом для того, чтобы уплотнить и сделать более однородными поверхностные несвязанные грунты основания, а также увеличить долю нагрузки, передаваемой с плиты на грунт. Кроме того, гидровиброуплотнение способствует увеличению коэффициента постели под плитой фундамента и уменьшению воздействия на грунт сейсмических динамических сил.

### 2.2. Свойства грунтов

Для изучения свойств грунтов проводились полевые и лабораторные испытания (зондирование, бурение). Выяснилось, что общие характеристики грунтов сходны, однако обнаруживается относительно широкий разброс значений. Основание состоит из слоев поздней насыпи (техногенные отложения) и мелкозернистых речных отложений, под которыми на глубине 3...9 м ниже плиты фундамента (на глубине 6...8 м под фундаментом центральной конструкции) находится четвертичный слой гравия и песка. Результаты тяжелого динамического зондирования показали разнородность четвертичного слоя песка и гравия (рис 9, 10).

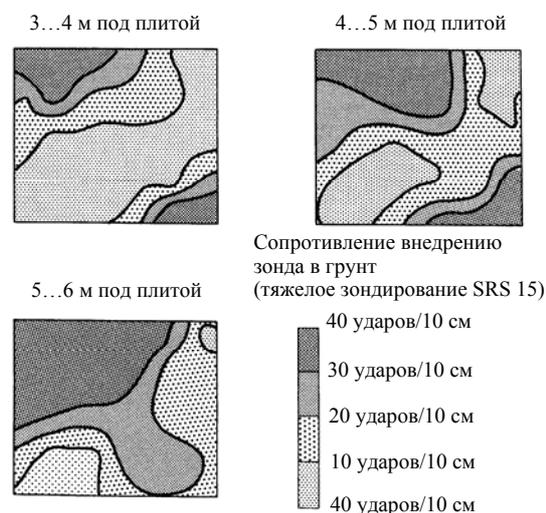


Рис. 9. Изолинии сопротивления внедрению зонда в грунт в ходе тяжелого динамического зондирования в центральной части площадки строительства башни Миллениум (35×40,5 м)

В составе третичных грунтах преобладают отложения пылеватого песка и ила, характеризующиеся очень низкой пластичностью (см. рис. 27), ниже находятся слои ила и глины. Величина модуля компрессионного сжатия для этих грунтов варьируется от  $E_{s1} = 8 \dots 43 \text{ МН/м}^2$  для первичного нагружения до  $E_{s2} = 40 \dots 90 \text{ МН/м}^2$  для повторного нагружения. Поскольку третичные отложения переуплотнены, значения  $E_{s2}$  дают адекватную информацию относительно предварительного и повторного нагружения свай фундамента. Угол внутреннего трения составляет  $\varphi = 20 \dots 28^\circ$ , в исключительных случаях  $\varphi = 32^\circ$ .

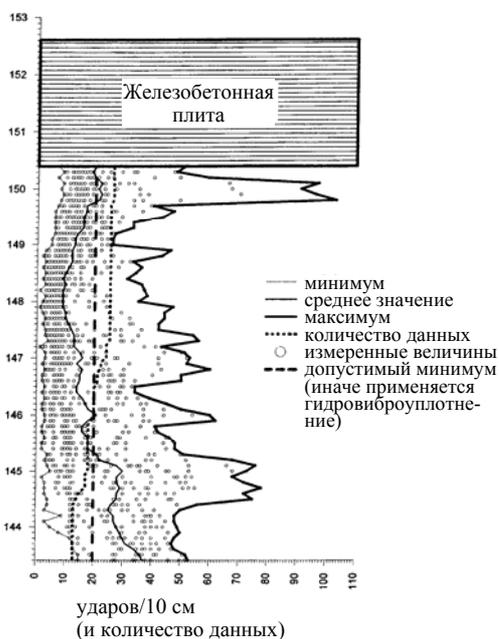


Рис. 10. Сопротивление внедрению зонда в слой четвертичных отложений песка и гравия по глубине под плитой башни Миллениум

### 2.3. Локальное улучшение грунта, установка свай, предварительное и циклическое нагружение

В основании центральной конструкции 202-метровой башни Миллениум находится 151 буронабивная свая (диаметр – 0,88 м, длина – от 13 до 16 м), устроенная по технологии сплошного шнека. Перед устройством свай разнородный слой гравия и песка был улучшен посредством гидровиброуплотнения

в тех местах, где по результатам тяжелого динамического зондирования величина сопротивления внедрению зонда в грунт была меньше значения  $n_{10} = 20$  (см. рис. 10). Гидровиброуплотнение проводилось на рабочей поверхности – 1,2 м выше голов свай (см. рис. 11). Среднее расстояние между местами гидровиброуплотнения 2,5×2,5. После гомогенизации поверхностного слоя грунта проводилась установка свай с 0,2-метровой рабочей площадки из бетонной стяжки, армированной проволоочной сеткой. В ходе проведения работ на других площадках выяснилось, что наличие такой бетонной защиты улучшает несущую способность групп свай (на некоторых площадках наблюдалось ее увеличение на 10...20% при прочих равных условиях).

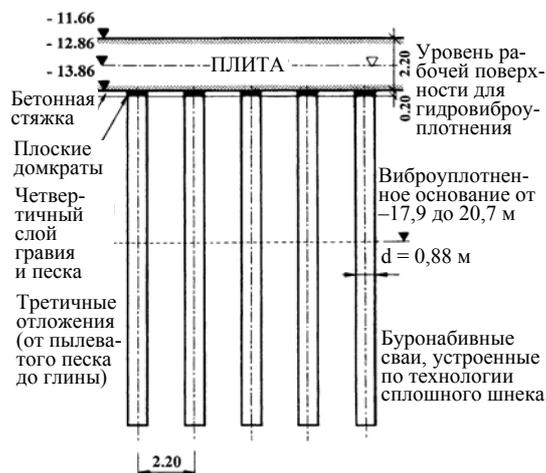


Рис. 11. Схема плитно-свайного фундамента башни Миллениум со схемой установки плоских домкратов и указанием зон местного виброуплотнения

Изначально уровень грунтовых вод почти совпадал с уровнем дневной поверхности и соответствовал уровню воды в Дунае. После сооружения стены в грунте он опустился и сейчас находится на 6 м ниже уровня дневной поверхности.

Центральная конструкция высотного здания опирается на монолитную плиту толщиной 2,2 м. Удельный вес арматуры составил  $185 \text{ кг/м}^3$ , классность бетона – С 30/40. Для создания бесшовной плиты необходимо было осуществить заливку  $3520 \text{ м}^2$  бетона в течение 15 часов.

Предварительное нагружение свай началось примерно через 3 месяца после их установки, во время строительства второго подземного этажа здания. До этого момента на сваи не оказывалось никакой нагрузки, поскольку нагрузка с плиты передавалась прямо на грунт. Для предварительного нагружения в пространство между головой каждой сваи и плитой устанавливался плоский домкрат (см. рис. 12).

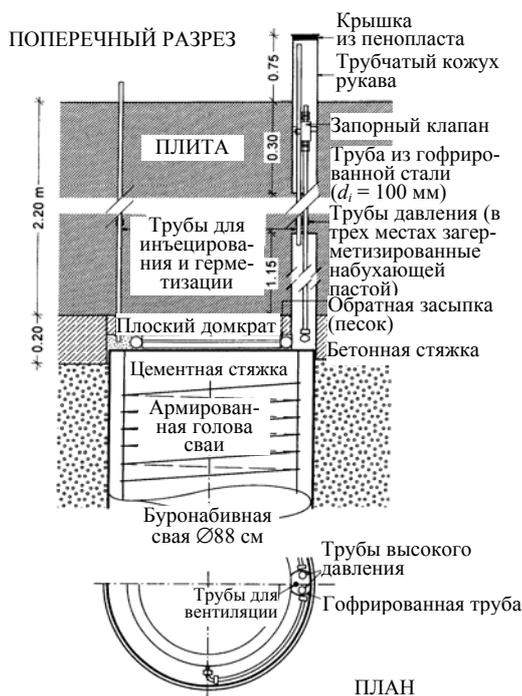


Рис. 12. Фрагмент рис. 11. Система для предварительного и циклического нагружения свай

Использовались домкраты мощностью 600 т с рабочим диапазоном подъема 50 мм. Диаметр домкратов соответствовал диаметру свай без учета толщины слоя защитного бетона и арматуры и составлял 700 мм (см. рис. 13, 14). Проводилось предварительное нагружение 151 сваи, при этом каждая из них нагружалась или отдельно, или в группе, состоящей не более чем из 10 свай. Чтобы избежать взаимного влияния свай, расстояние между одновременно нагружаемыми сваями увеличивалось до 7,5...10 м. Процедура предварительного нагружения не мешала проведению строительных работ, кроме того,

не нужно было сооружать дополнительные противной плиты действовала постоянная нагрузка. В целом предварительное нагружение свай проводилось в течение 15 рабочих дней. Примерно через три недели после завершения процедуры в большинстве плоских гидравлических домкратов гидравлическое масло было заменено цементным раствором, инъецируемым под высоким давлением, благодаря чему между плитой и сваями образовался жесткий бетонный стык. На головках 11 свай устанавливались измерительные приборы для получения максимально точных данных об их несущей способности под полной нагрузкой здания.



Рис. 13. Плоские домкраты для предварительного нагружения свай (к рис. 11, 12)



Рис. 14. Вид участка бетонной подготовки для плитно-свайного фундамента башни Миллениум (к рис. 11, 12)

Первый цикл предварительного нагружения проводился до  $1,2 Q_{w, calc}$ , где  $Q_{w, calc}$  – расчетная величина рабочей нагрузки в условиях эксплуатации здания (проектная нагрузка). После этого временного дополнительного нагружения последовали разгрузка и новый цикл нагружения до тех пор, пока градиенты

кривых повторного нагружения не приобрели сходную форму. На рис. 15, 16 показано, как по-разному ведут себя две сваи при первом нагружении. Если бы при устройстве фундамента использовались традиционные технологии, без предварительного нагружения, это привело бы к возникновению дополнительных напряжений в плитно-свайном фундаменте после ввода здания в эксплуатацию, поскольку характеристики свай значительно различались. Однако благодаря методике предварительного и циклического нагружения этих негативных последствий удалось избежать.

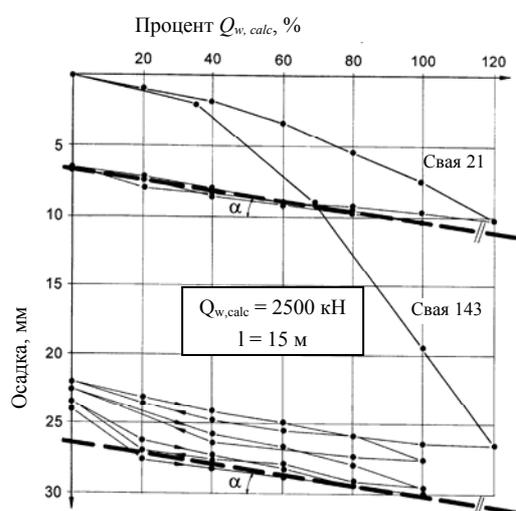


Рис. 15. Кривые «нагрузка–осадка», иллюстрирующие различия в локальном поведении двух свай, установленных под башней Миллениум

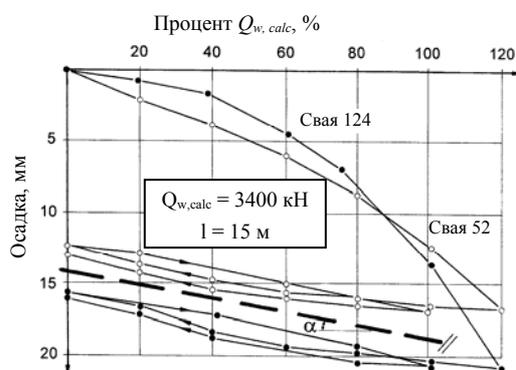


Рис. 16. То же для свай другой длины, с другой величиной  $Q_{w, calc}$

В процессе предварительного нагружения выяснилось, что отдельные сваи, расположенные на одной и той же площадке строительства, характеризуются совершенно разными графиками «нагрузки–осадка», несмотря на то что они устраивались практически в одинаковых грунтовых условиях, и имели идентичные геометрические характеристики (рис. 17).

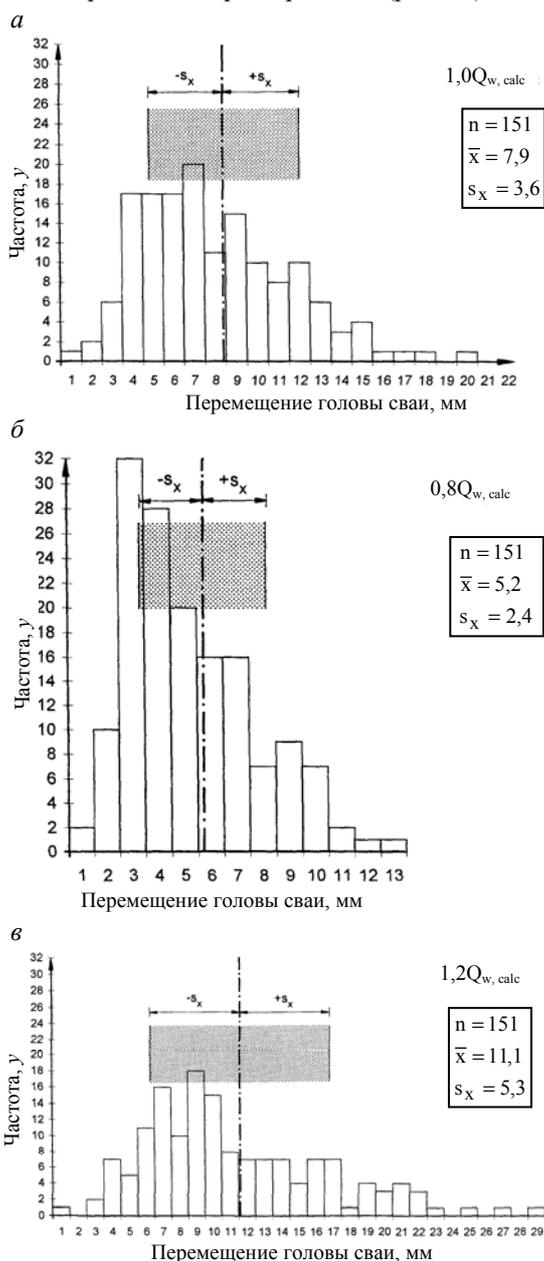


Рис. 17. Гистограммы осадок головы сваи при первом нагружении (испытывалась 151 свая, устроенная под башней Миллениум): нагрузка на сваю  $0,8Q_{w, calc}$  (а),  $1,0Q_{w, calc}$  (б) и  $1,2Q_{w, calc}$  (в)

На рис. 18, 19 показаны кривые «нагрузка–осадка» в начале и в конце предварительного нагружения 8 близко расположенных свай. Кривые «нагрузка–осадка» в конце предварительного нагружения отражают поведение свай при рабочей нагрузке и обнаруживают относительно сходные тенденции при реальных статических нагрузках.

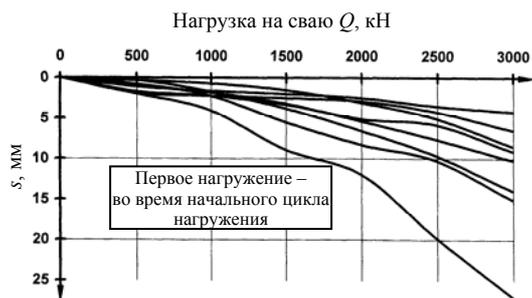


Рис. 18. Кривые «нагрузка–осадка» в начале предварительного нагружения восьми близко расположенных свай

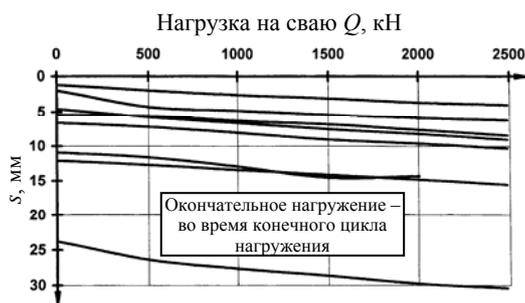


Рис. 19. Кривые «нагрузка–осадка» в конце процедуры предварительного нагружения тех же свай

#### 2.4. Сравнительная характеристика работы отдельной сваи и группы свай, взаимодействие сваи с плитой фундамента

В качестве тестовой была выбрана одна из центральных свай конструкции, на которую установили датчики деформации, мессдозы и многоточечный экстензометр. Данные, полученные на струнном экстензометре во время предварительного и циклического нагружения, регистрировались с интервалом в 1 мин, а в ходе остальных строительных работ – с интервалом в 1 ч.

Было установлено, что сжатие грунта под плитой фундамента в результате циклического предварительного нагружения способствует

увеличению его несущей способности. На рис. 20 показано различие в поведении центральной тестовой сваи как отдельного элемента (во время предварительного нагружения), и как элемента группы свай (в условиях эксплуатации).

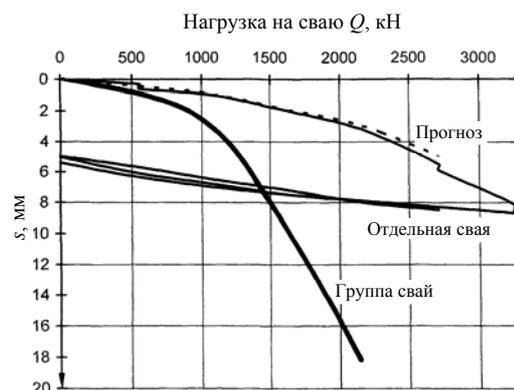


Рис. 20. Кривые «нагрузка–осадка» для тестовой центральной сваи

На рис. 21, 22 показано распределение трения по боковой поверхности сваи (сопротивление на сдвиг). В процессе измерений, проводимых на трех различных секциях сваи, получены разные результаты, характеризующие работу сваи как отдельного элемента (во время предварительного нагружения) и той же сваи в условиях эксплуатации (групповой эффект). Кроме того, результаты отражают сильное влияние поверхностных слоев грунта гидробиоуплотнения. Для поведения этой 5-метровой квазимонолитной зоны в условиях эксплуатации (т. е. поведения группы свай) не характерно перемещение сваи относительно грунта, соответственно, трение по боковой поверхности сваи практически отсутствует. В то же время нагрузка от плиты передается непосредственно на грунт, а нижние части сваи более активно мобилизуются для передачи нагрузки, на грунт чем в случае работы отдельной сваи.

Кривые на рис. 21 показывают уменьшение нормальных усилий на сваю  $Q$  с глубиной, при этом нагрузка на сваю составляет  $0,5 Q_{w, calc}$  и  $0,8 Q_{w, calc}$ . На основании этих кривых можно заключить, что в условиях работы группы свай передача нагрузки со сваи на грунт (посредством трения по боковой

поверхности) происходит на большей глубине. Передача нагрузки с плиты на грунт происходит в верхнем слое основания (5...6 м), где отрицательное трение по боковой поверхности (от плиты) компенсируется положительными величинами сопротивления на сдвиг (рис. 22). Взаимодействие между сваями и плитой становится более интенсивным при увеличении нагрузки, в то же время улучшение грунта при помощи виброуплотнения способствует прямой передаче нагрузки через плиту фундамента на грунт. Соответственно, верхний слой грунта функционирует как квазимонолитная конструкция. Составная фундаментная система (плита + сваи + улучшенный грунт) ведет себя так, как если бы она располагалась на 5,5 м ниже плиты.

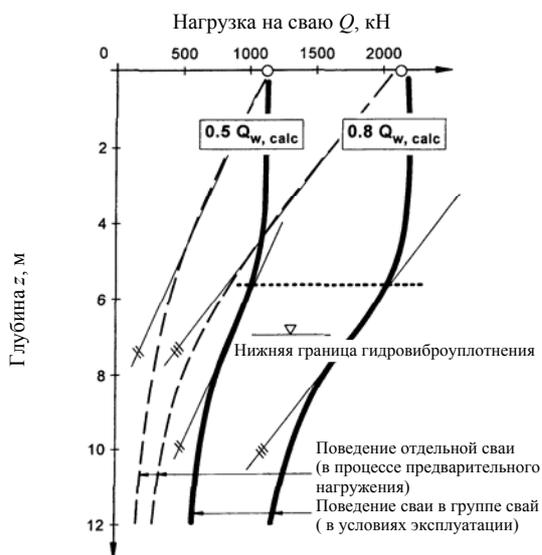


Рис. 21. Изменение нормального усилия на сваю  $Q$  по глубине для центральной тестовой сваи на разных стадиях строительства (0,5 и 0,8  $Q_{w, calc}$ )

Основываясь на градиентах касательных к кривым на рис. 21, можно утверждать, что они практически тождественны для отдельной сваи под плитой фундамента и для сваи в группе свай, расположенной на 5,5 м ниже уровня подошвы фундамента. В данном случае нагрузка на сваю практически не имеет значения. Кроме того, толщина квазимонолитной конструкции не изменяется. А с увеличением нагрузки уменьшается только градиент кривых. Это означает, что трение по

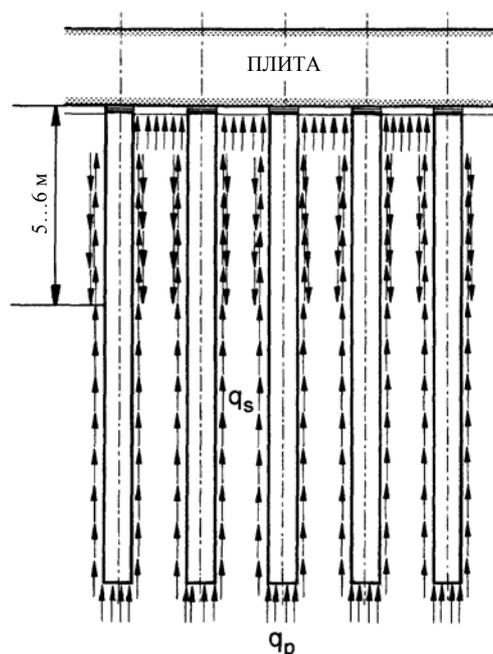


Рис. 22. Схема передачи нагрузки с плитно-свайного фундамента на грунт

боковой поверхности сваи, находящейся под квазимонолитной конструкцией, увеличивается вместе с нагрузкой.

На первой стадии строительства все внешние нагрузки почти полностью передавались с плиты фундамента на грунт основания. Но после инъецирования пространства между плоскими домкратами и плитой цементным раствором механизм передачи нагрузки существенно изменился. Значительно активизировались сваи, которые к моменту завершения строительства высотного здания воспринимали максимальную величину общей нагрузки (75% – угловые сваи и 95% – центральные) в зависимости от их расположения и характера нагрузки. Из-за осадки конструкции доля нагрузки, непосредственно передаваемой со сваи на грунт, возросла и, соответственно, уменьшилась нагрузка на сваи. Нагрузка на плиту увеличилась с 10...20% до 25...35% от удельной общей нагрузки.

На рис. 23 показано, как повлияло понижение уровня грунтовых вод на нагрузку, действующую на сваю № 87. В период с 1998 по 2002 г. уровень грунтовых вод понижался

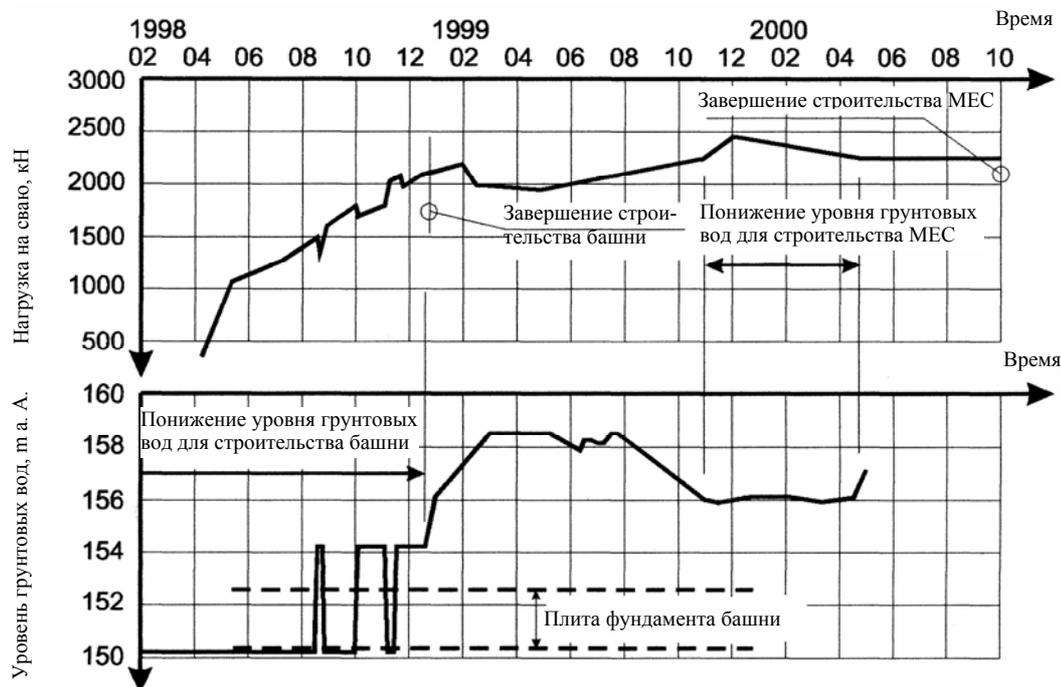


Рис. 23. Нагрузка на сваю № 87 башни Миллениум во времени (влияние строительных работ, первого и второго понижения уровня грунтовых вод)

дважды: для откопки строительного котлована под башню Миллениум и под примыкающий развлекательный комплекс Миллениум, возведенный после завершения строительства башни. Для сооружения соседнего котлована потребовалось на 15 м понизить уровень грунтовых вод в пределах подпорной конструкции (стены-диафрагмы), что вызвало понижение уровня грунтовых вод за пределами нового котлована и повлияло на напряженное состояние под башней Миллениум. На диаграмме четко видно, что понижение уровня грунтовых вод способствовало увеличению нагрузки на сваи, в соответствии с теоретическим прогнозом.

### 2.5. Осадки

Откопка котлованов под высотное центральное здание и прилегающие более низкие конструкции велась одновременно, общая глубина составила 15 м ниже уровня поверхности. Выемка 180000 м<sup>3</sup> грунта привела к поднятию дна котлована на 40 мм. Во время работ по откопке котлована на глубине 6...15 м наблюдения за поднятием дна (до

30 мм) велись при помощи геодезического нивелирования, а также снимались данные с многоточечного экстензометра, установленного на глубине 60 м (рис. 24). На кривой, отражающей зависимость выпора грунта от времени, видно, что на первой стадии строительства, еще до начала измерений, поднятие дна котлована составило 10 мм, поэтому общая величина выпора дна – 40 мм. После заливки плиты фундамента нагрузки от высотного здания стали передаваться на грунт основания. Поскольку темпы строительства были очень высокими (за 2 недели возводилось по 2 этажа здания), через 7 месяцев после начала работ высота сооружения составляла уже 170 м, а только что залитая 2,2-метровая плита плитно-свайного фундамента работала по гибкой схеме, что вызывало корытообразные осадки.

Как и предполагалось при прогнозе, величина осадок составила 45 мм. Их можно рассматривать как повторную упругую деформацию грунта после поднятия дна в ходе откопки котлована. Максимальная величина разности осадок между центром высотной конструкции и угловыми частями здания сос-

тавила  $\Delta s \leq 23$  мм. Неравномерная осадка возникла на начальном этапе строительства. Поэтому в процессе строительства выравнивание здания не проводилось, а деформационные швы между центральной башней и прилегающими 8-этажными сооружениями оставались водонепроницаемыми. Кроме того, выпуклая кривая осадок компенсировала вогнутую кривую деформации конструкций высотного здания. Характер второй кривой определяется тем, что деформации сжатия во внешней части центральной башни были больше деформаций в ее внутренней части. Соответственно, в данный момент горизонтальные перекрытия этажей практически не деформировались.

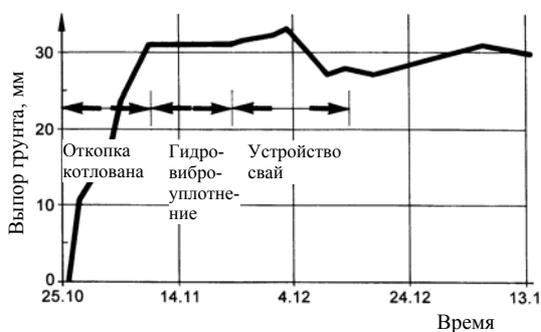


Рис. 24. Выпор грунта в результате его выемки для откопки 15-метрового строительного котлована

На рис. 25 показаны кривые осадок по поперечному сечению здания, которые были построены на основании показаний 20 датчиков, установленных между центром здания и его периферией. Важно отметить, что до активации свай посредством инъецирования открытого пространства в их верхней части цементным раствором наблюдался непосредственный контакт плиты с грунтом. На рис. 25 также показано, что сопротивление сваи было мобилизовано не сразу. Сначала нагрузка от здания передавалась непосредственно с плиты фундамента на грунт, и доля нагрузки на сваи была незначительной. По мере того как пространство между головами свай, плоскими домкратами и плитой фундамента инъецировалось цементным раствором, сваи активизировались. Корытообразная осадка была вызвана общей глубинной деформацией грунта под острием свай, а не из-за различий в их работе.

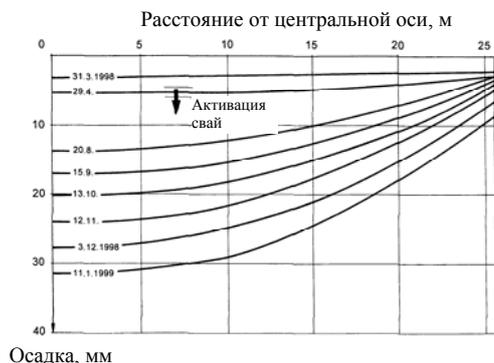


Рис. 25. Кривые развития осадок во время строительства 202-метровой башни Миллениум

На рис. 26 приводятся график развития осадок во времени, а также средняя величина осадки, полученная в ходе геодезического нивелирования и измерения экстензометром в котловане под центральной частью здания (на расстоянии 17 м от центральной оси). Отмечено также влияние понижения и подъема уровня грунтовых вод в пределах стен в грунте во время откопки котлована. Можно заметить выравнивание кривой, отражающей развитие осадок во времени, когда здание начинает передавать полную рабочую нагрузку. Такая ситуация характерна для фундаментов, устроенных в переуплотненных пылеватых грунтах (рис. 27), где осадки возникают быстрее, чем в условиях нормального уплотнения.

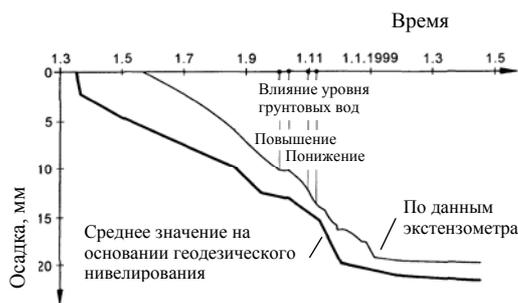


Рис. 26. Фрагменты кривых развития осадок во времени для некоторых характерных точек измерения (башня Миллениум)

Здание (рис. 28) было открыто в конце апреля 1999 г., и никаких процедур для выравнивания неравномерных осадок не потребовалось. Через несколько месяцев после открытия башни Миллениум было построено более низ-

кое прилегающее сооружение (развлекательный комплекс Миллениум), для чего потребовалось временное понижение уровня грунтовых вод. На рис. 29 видно, что эта операция вызвала не только частично обратимое увеличение нагрузки на сваи (см. рис. 24), но и дополнительную осадку (примерно 4 мм). Устранить деформацию не удалось, однако, она осталась на прежнем уровне даже после прекращения понижения уровня грунтовых вод. С тех пор величина вторичной осадки незначительна.

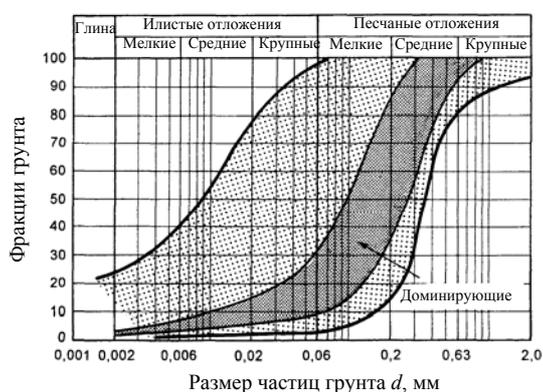


Рис. 27. Распределение размера частиц грунта третичных отложений в зоне устройства свай



Рис. 28. Аэрофотоснимок центральной конструкции башни Миллениум во время строительства

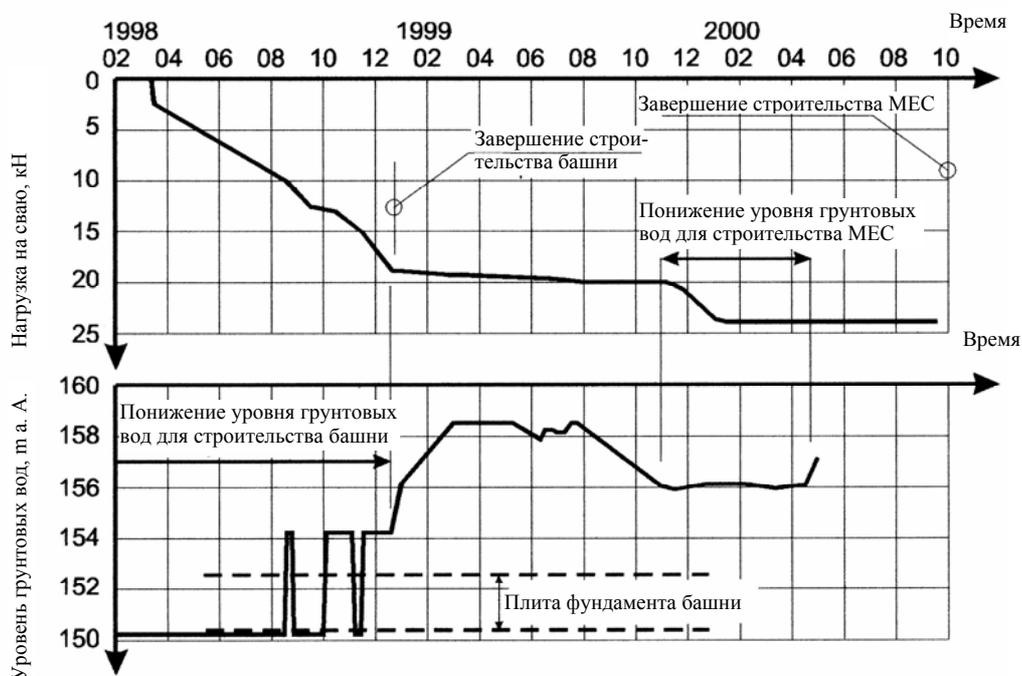


Рис. 29. Кривая развития осадок во времени западной стороны башни Миллениум, где было пристроено здание развлекательного комплекса (показано влияние первого и второго понижения уровня грунтовых вод)

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Всесторонние полевые испытания свай подтвердили, что во время первого нагружения зависимость осадки от нагрузки для отдельных свай одной и той же конструкции значительно различаются. Следовательно, предварительное и циклическое нагружение свай – это эффективный метод, способствующий уменьшению общих и неравномерных осадок высотных зданий, а также сооружений, чувствительных к таким нагрузкам, например протяженных многопролетных мостов. Этот метод можно применять на первой стадии строительства. При этом в качестве противовеса используется плитно-свайная конструкция или свайный ростверк. Циклы нагружения, разгрузки и повторной нагрузки следует повторять до тех пор, пока кривые «нагрузка–осадка» для всех свай не будут параллельными в рабочем диапазоне нагрузок. Величина нагрузки, прикладываемой в процессе предварительного нагружения, должна не менее чем на 20% превышать величину вычисленной рабочей нагрузки (проектная эксплуатационная нагрузка). Обычно достаточно двух-трех петель гистерезиса для циклов нагружения.

Эта новая технология аналогична испытаниям по контролю и приемке предварительно напряженных грунтовых анкеров, однако благодаря циклическому нагружению каждого элемента можно одновременно осуществлять улучшение грунта и контроль качества работ. В будущем этот метод может использоваться для полевых испытаний свай и уменьшения неравномерных осадок сооружений, воспринимающих статические нагрузки, и конструкций с чувствительной архитектурой (например, фасадов из стекла). Улучшение качества происходит значительно быстрее, чем повышение стоимости. Предварительное нагружение не мешает проведению других строительных работ и может проходить совершенно независимо от них.

И, наконец, отметим, что за счет улучшения верхнего слоя грунта (например, с помощью гидровиброуплотнения) можно значительно увеличить общую несущую способность плитно-свайных фундаментов. Таким образом создается квазимонолитная структура и большая доля нагрузки от сооружения передается непосредственно с плиты фундамента на грунт.