

ФУНДАМЕНТЫ ГЛУБОКОГО ЗАЛОЖЕНИЯ: ТЕНДЕНЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Лекция, прочитанная на Международном семинаре в Санкт-Петербурге
17–19 июня 2004 г.

В. Ф. ВАН ИМПЕ – Президент Международного общества по механике грунтов и геотехнике ISSMGE, профессор, директор лаборатории механики грунтов (Университет, г. Гент, Бельгия), профессор кафедры механики грунтов (Католический университет, г. Левен, Бельгия).

Рассматриваются тенденции и перспективы в области строительства фундаментов глубокого заложения. Обсуждаются вопросы проектирования и анализа свайных фундаментов, концепции их строительства и испытаний. Приводятся примеры исследований фундаментов глубокого заложения, целью которых было улучшение проектных и эксплуатационных характеристик свайных фундаментов с учетом современных экономических ограничений.

ВВЕДЕНИЕ

Мировой рынок завоевывают современные технологии устройства фундаментов глубокого заложения, однако на внутренних рынках до сих пор господствуют традиционные концепции фундаментостроения. Это замедляет развитие инженерной науки, препятствует распространению и практическому использованию новых концепций. Поэтому очень важной задачей в ближайшие годы является разработка Еврокода 7 – нового руководства по строительству, стимулирующего внедрение творческих инженерных решений.

1. ФУНДАМЕНТЫ ГЛУБОКОГО ЗАЛОЖЕНИЯ: ТЕНДЕНЦИИ В ГЕОТЕХНИКЕ

1.1. Уровень знаний

Проектирование фундаментов глубокого заложения зависит от уровня развития геотехники (рис. 1). Это означает, что уровень знаний как функция времени зависит прежде всего от новейших практических достижений (кривая 1 на рис. 1) (Van Impe, 2002).

Теоретическое обоснование передовых геотехнических исследований появляется значительно позже (кривая 3 на рис. 1). Единственным связующим звеном между теорией и практикой является наличие документов, описывающих случаи из практики, полученных главным образом в процессе мониторинга (кривая 2 на рис. 1). Рассматривая вопросы строительства фундаментов глубокого заложения, можно отметить один пробел в теоретических и практических знаниях – недостаточную исследованность и, следовательно, нечеткость понимания вопросов взаимодействия отдельной сваи и грунта. Кроме того, в теоретической геотехнике остаются открытыми вопросы анализа групп свай и плит ростверка. В ближайшее десятилетие мы собираемся решить данные проблемы (Van Impe, 1998–2001).

Экономические условия могут повлиять на развитие технологий в области строительства фундаментов глубокого заложения (рис. 2). Обзор экономической ситуации с 1979 г. подтверждает, что методы применения забивных свай постепенно вытеснялись технологиями установки винтовых свай с вытеснением грунта (Van Impe, 1997).

Опишем некоторые другие тенденции в области исследований фундаментов глубокого заложения.



Рис. 1. Фундаменты глубокого заложения: уровень знаний

1.2. Современные методы исследования грунта

Постепенно начинают использоваться геофизические методы, однако область их применения ограничена. Были усовершенствованы и качественные традиционные мето-

ды изучения инженерно-геологических условий, что привело к улучшению корреляции между параметрами грунта. Использование более эффективных методов анализа большего объема данных тоже способствует более рациональному проектированию.

Использование различных видов свай по всему миру 1997–2001



Рис. 2. Использование различных видов свай в мире

1.3. Тенденции в области проектирования и анализа

Важными тенденциями в данной области являются разработка более рациональных методов проектирования с учетом реальных условий установки свай, а также повышенное внимание к деформациям фундаментов глубокого заложения. Процесс оценки реальных условий установки свай с учетом зависимости между напряжением и деформацией грунта во время забивки обсадной трубы или ввинчивания сваи, заливки цементного раствора и дальнейшего нагружения свай очень сложен (рис. 3). Однако для такой оценки до сих пор используются упрощенные модели.

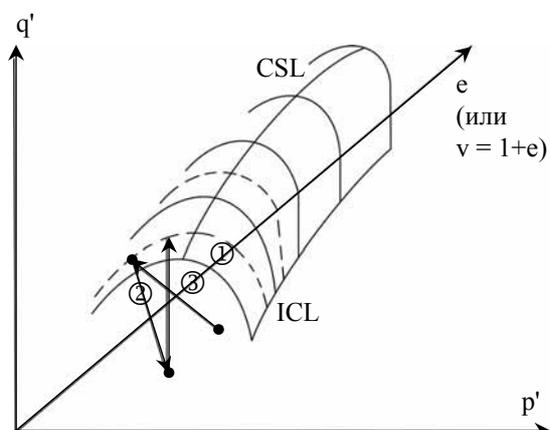


Рис. 3. Реальные условия установки: 1 – процесс установки свай до заливки бетона; 2 – процедура заливки бетона; 3 – условия нагружения свай

Уравнение огибающей поверхности разрушения

$$\frac{q'}{Mp'} + \left(\frac{\lambda}{\lambda - k} \right) \ln p' - \left(\frac{\tilde{A} - v}{\lambda - k} \right) = 1$$

Примером одной из так называемых рациональных полуэмпирических проекторочных технологий является введение установочных коэффициентов, отражающих взаимодействие между сваями и грунтом после установки сваи (рис. 4). Согласно методам Де Бира (De Beer, 1972) и Ван Импе (Van Impe, 1991), данные технологии основываются на результатах полуэмпирических СРТ-измерений.

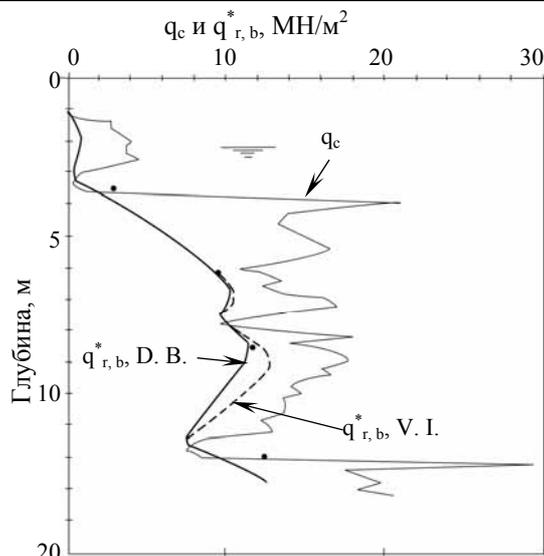


Рис. 4. Рациональное проектирование, основанное на полуэмпирическом подходе СРТ

Предельная несущая способность свай будет

$$q_{u,b} = a_b \cdot \varepsilon_b \cdot q_{r,b}^*$$

где a_b – коэффициент устройства пяты; ε_b – масштабный эффект грунта (трещинообразование);

$$q_{u,s} = \xi_s \cdot \eta_p \cdot q_c;$$

ξ_s – коэффициент устройства ствола сваи; η_p – коэффициент удельного сопротивления по боковой поверхности сваи из СРТ-опытов.

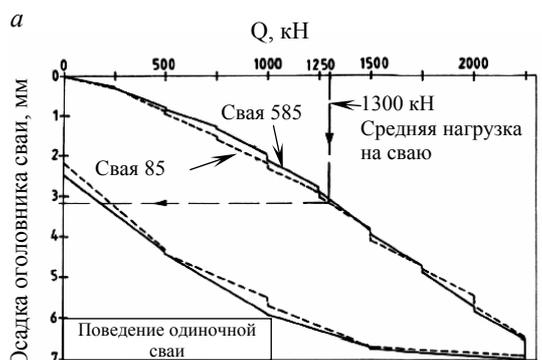
Постоянно возрастает интерес к деформациям фундаментов глубокого заложения, самый важный вопрос в этой области – деформация группы свай. На рис. 5 четко показано, что измеренные параметры, характеризующие зависимость между нагрузками и деформациями для отдельной сваи и для группы свай фундамента силосной башни, значительно различаются. Очевидно, что, говоря о допустимой осадке, логично рассматривать только поведение группы свай (см. рис. 5, б, Van Impe, 1991).

1.4. Современные тенденции в области строительства фундаментов глубокого заложения

Помимо общей тенденции вытеснения забивных свай винтовыми, необходимо отме-

тить более активное использование буронабивных свай. Что касается технологии применения забивных свай (составляющих примерно 42% мирового товарооборота), то здесь в качестве забивного оборудования все чаще используют гидравлические молоты.

ся более эффективные методы, такие как испытание статико-динамической нагрузкой и мессдозой Остерберга. Повсеместно контроль качества свай проводится с помощью испытаний на сплошность. Поскольку стоимость обычного статического нагружения достаточно высока (иногда достигает 20 дол. за тонну нагружения), все чаще применяют динамические испытания. Последние, однако, не дают точных данных о взаимодействии «свая – грунт – жесткость», которое является основополагающим параметром для оценки эксплуатационной пригодности фундамента.



1.6. Современные тенденции в области работы устройства и корректирования свайных фундаментов



Сегодня применяют более сложные методы установки свай и ежедневный мониторинг площадок строительства (наблюдение за деформацией группы свай, поведением свайного ростверка, измерение установочных параметров). Это способствует созданию более точных технологий корректировки, таких как инъектирование массива грунта, прилегающего к пяте и стволу сваи. Однако главный вопрос – это анализ и представление адекватной информации о прочности всех взаимодействующих элементов, в том числе надземных конструкций. Статистические данные подтверждают, что большинство технических аварий на фундаментах происходит из-за ошибок, допущенных в процессе проектирования (37%) и строительства (35%). Это необходимо учитывать при внедрении новых, более совершенных методов в области фундаментостроения.

Измеренные осадки ростверка для возводимого силосного сооружения
Взаимодействие между экспертом по фундаментам, свайным подрядчиком, инженером по конструкциям и собственником – ключ к успешному строительству!!!

2. ФУНДАМЕНТЫ ГЛУБОКОГО ЗАЛОЖЕНИЯ: ПРИМЕРЫ СОВРЕМЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Рис. 5. Деформации одиночной сваи (а) и группы свай (б) (Van Impe –Goossens, 1991)

2.1. Влияние параметров установки свай на качество проекта

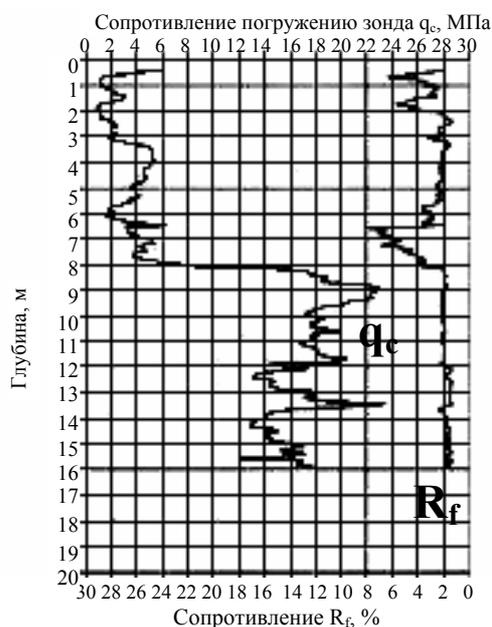
1.5. Современные тенденции в области испытания свай

Сегодня самым надежным видом свай с вытеснением грунта считаются винтовые. Различные методы установки винтовых свай второго и третьего поколения (рис. б) показывают, насколько важна оценка надежности параметров установки, так как они отражают

Из-за увеличения несущей способности современных свай для их испытания требуются

влияние свай на начальное состояние грунта. В Бельгии с 1989 по 1993 г. проводились два полномасштабных исследования с использованием винтовых свай, оборудованных измерительными приборами (ERTC 3, Int. Seminar, Brussels, 1997).

К сожалению, второй проект – на площадке Limelette на винтовых сваях, установленных в чистом третичном песке (рис. 7), не был завершен. Первый исследовательский проект, целью которого было определение несущей способности стволов винтовых свай, проходил в условиях однородной третичной бумовой глины (чрезвычайно переуплотненная тугая трещиноватая глина) (рис. 8–14). Проводились 12 статических, 12 динамических, 6 статико-динамических испытаний на нагрузку на 5 различных винтовых сваях с вытеснением грунта и на железобетонных забивных сваях, взятых для сравнения (рис. 15). На рис. 16–20 схематически показаны винтовые сваи нового поколения с вытеснением грунта (Van Impre, Mexico, 2000).



- СВАИ-СТОЙКИ**
- 0,5...8,2 м: слой четвертичных пылеватых грунтов
 - 8,2 м – ...: третичный ледийский/брюссельский песок
 - Большая глубина УГВ
 - Глубина установки свай – 9,5 м

Рис. 7. Грунтовые условия на площадке Limelette

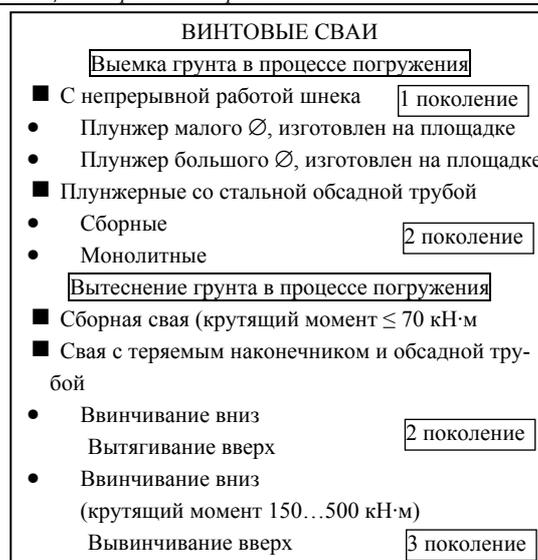
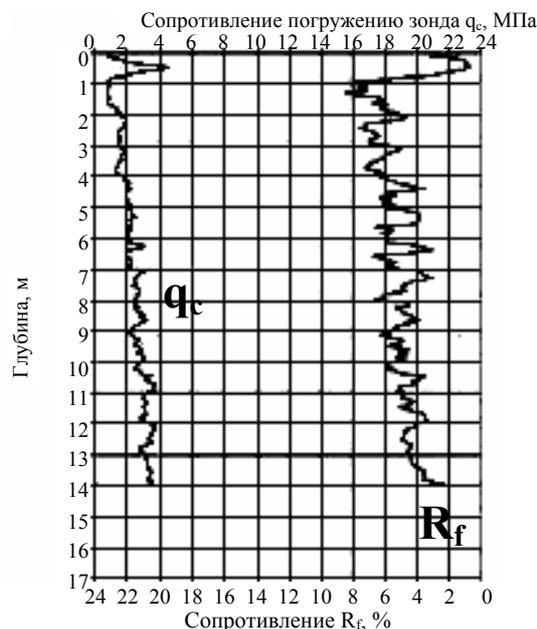


Рис. 6. Три поколения винтовых свай

Сваи «атлас» устраиваются по схеме за- ввинчивание – вывинчивание, винтовые сваи «оливье» – более поздняя, упрощенная версия



- ОПЫТНАЯ ПЛОЩАДКА 1**
- Ниже глубины 1м: слой третичной переуплотненной глины Boom
 - УГВ – 1м
 - Septaria – 14 – 18 м
 - Сваи установлены на глубину 7,5 и 11,7 м

Рис. 8. CPT-испытания в St. Katelijne Waver (SKW)

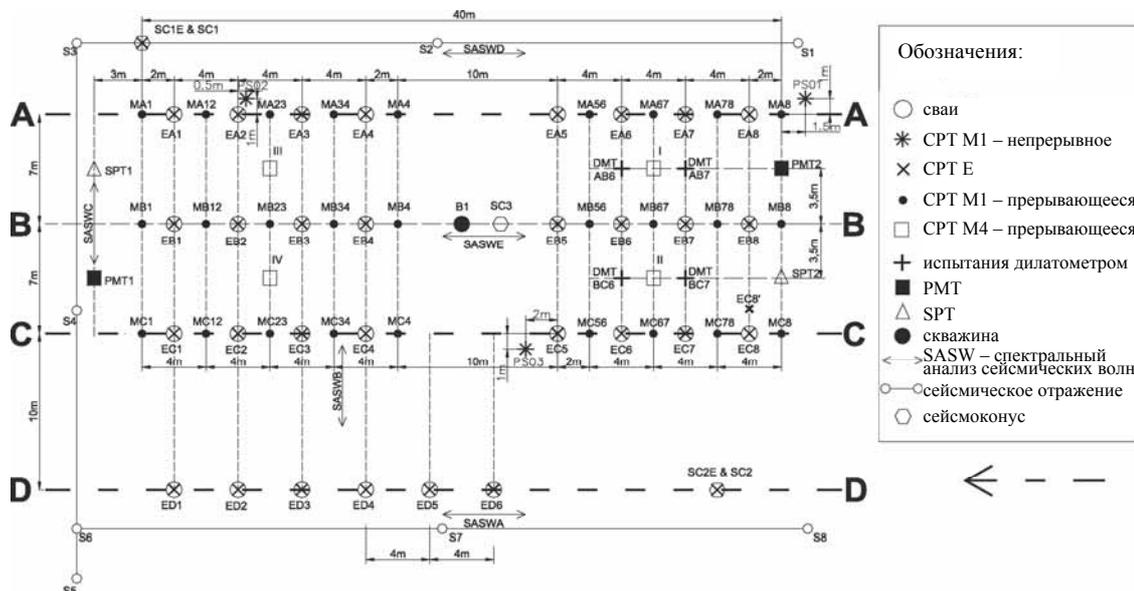


Рис. 9. Площадка SKW: полевые исследования грунтов

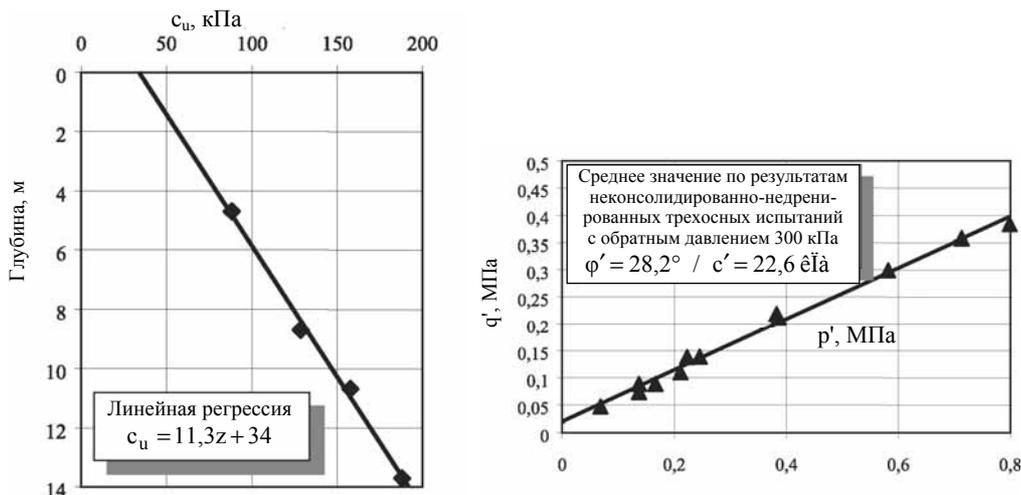


Рис. 10. Результаты испытаний образцов третичной глины Boom

свай «атлас», а сваи «омега» являются наиболее сложным видом винтовых свай с изменяемым шагом лопастей шнека и прерывистым интервалом шнека различных диаметров, что применяется для бокового вытеснения грунта у острия свай.

Обычно сваи «атлас» имеют сплошной рельефный винтовой ствол с лопастями (см. рис. 16–20). Лопастей и ствол свай «оливье» менее рельефны (см. рис. 7), поскольку область контакта между лопастью и стволом свай уменьшается. Возможный разрыв в относительном вытеснении свая–грунт во

время нагружения свай вызывает типичные остаточные деформации под нагрузкой (рис. 28).

Сваи «фундекс» и «де вааль» устраивают по схеме закручивание – вытягивание. Эти сваи отличаются наличием теряемого башмака, они способствуют интенсивному взаимодействию грунта и пяты свай. Винтовые сваи «де вааль» – это сваи с частичным шнеком и блокировочным механизмом, расположенным на верху установки, который препятствует выдавливанию грунта на поверхность во время погружения шнека.

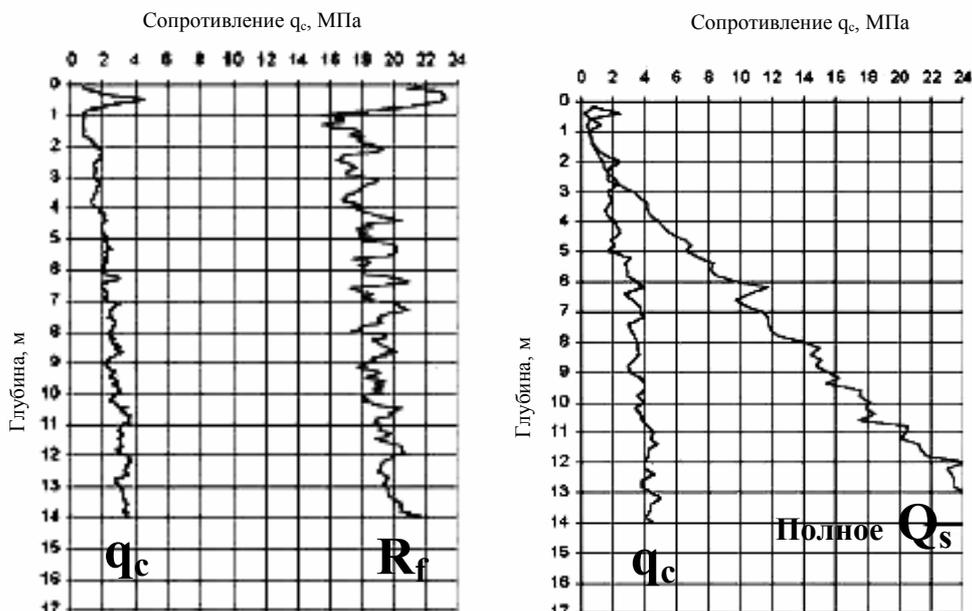


Рис. 11. Площадка SKW: испытания CPT: E1 – непрерывное; M1 – прерывающееся

На рис. 21–26 приводятся результаты статических, динамических и статико-динамических испытаний на нагрузку, на основании которых с помощью экстензометра можно четко выявить распределение несущей способ-

ности между стволом и пятой сваи (рис. 27–32). Это позволяет анализировать жесткость взаимодействия сваи и грунта на большей глубине для определения уровня эксплуатационной пригодности, а также оценивать под-

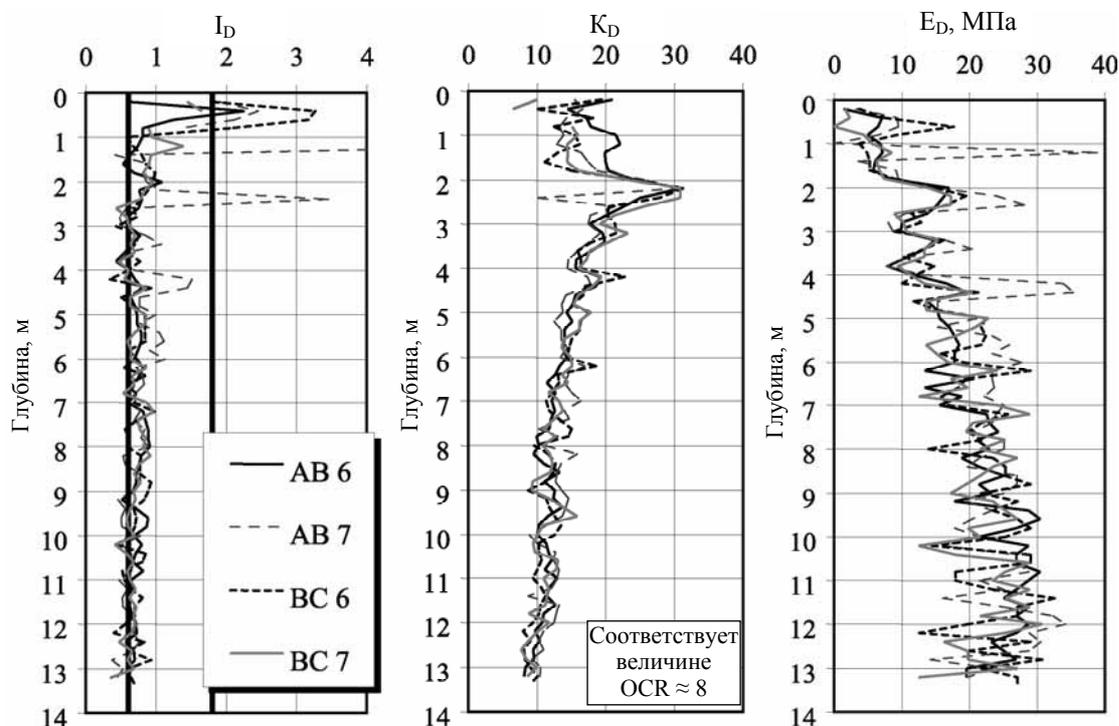


Рис. 12. Площадка SKW: результаты испытаний дилатометром

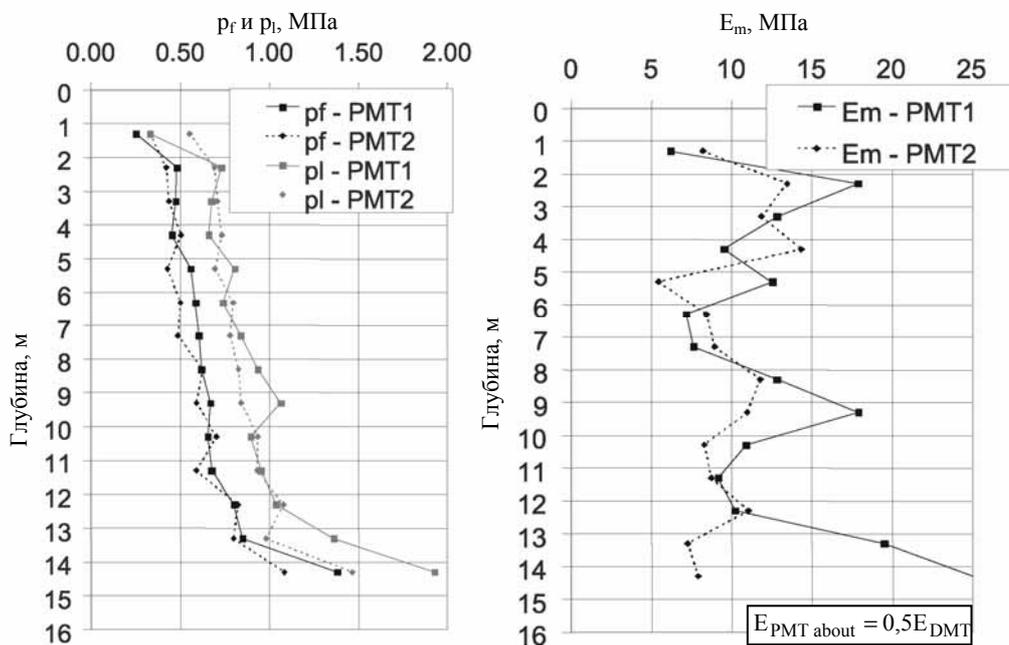


Рис. 13. Площадка SKW: результаты измерений pressiометром Менарда

вижность поведения сваи. Из данного примера четко видно, что жесткость взаимодействия для свай «фундекс», «атлас» и «омега» более надежна, чем для сваи «оливье», особенно в плане повышения несущей способности башмака сваи, поскольку эта способность не снижается даже после достижения своего предельного значения (8...5% от величины диаметра основания сваи). В целом, сваи «омега» и «атлас» ведут себя так же, как и свая «фундекс», но для них характерны меньшее взаимодействие между башмаком сваи и грунтом и более активное взаимодействие ствола сваи с грунтом. Все эти взаимодействия более очевидны для более длинных свай (11,83 м – сваи «омега» на рис. 28 и 32).

На основании детального анализа результатов испытаний винтовых свай были получены установочные параметры для башмака и ствола сваи, отражающие характер взаимодействия сваи с грунтом после ее установки. Кроме того, в ходе статических испытаний можно определить общую несущую способность сваи, а также несущие способности башмака и ствола сваи. Измеренные значения сравниваются с вычисленными (для каждой сваи) в ходе СРТ-испытаний на оси для буду-

щей сваи. Метод СРТ используется для прогнозирования несущей способности пяты сваи (Van Impe et al, 1988).

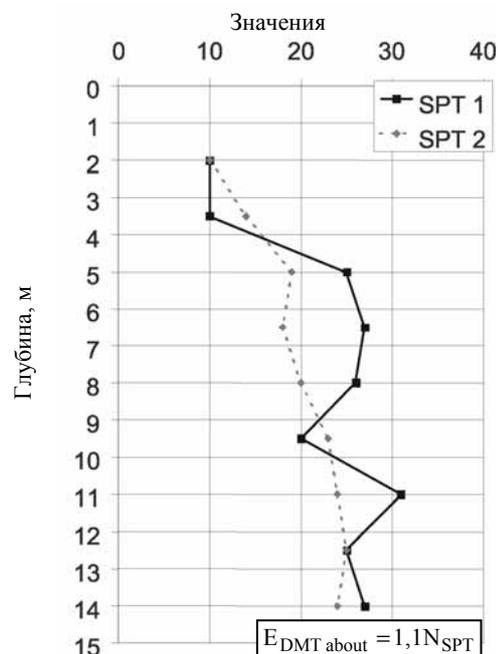


Рис. 14. Площадка SKW: результаты испытаний методом СРТ

Граншея

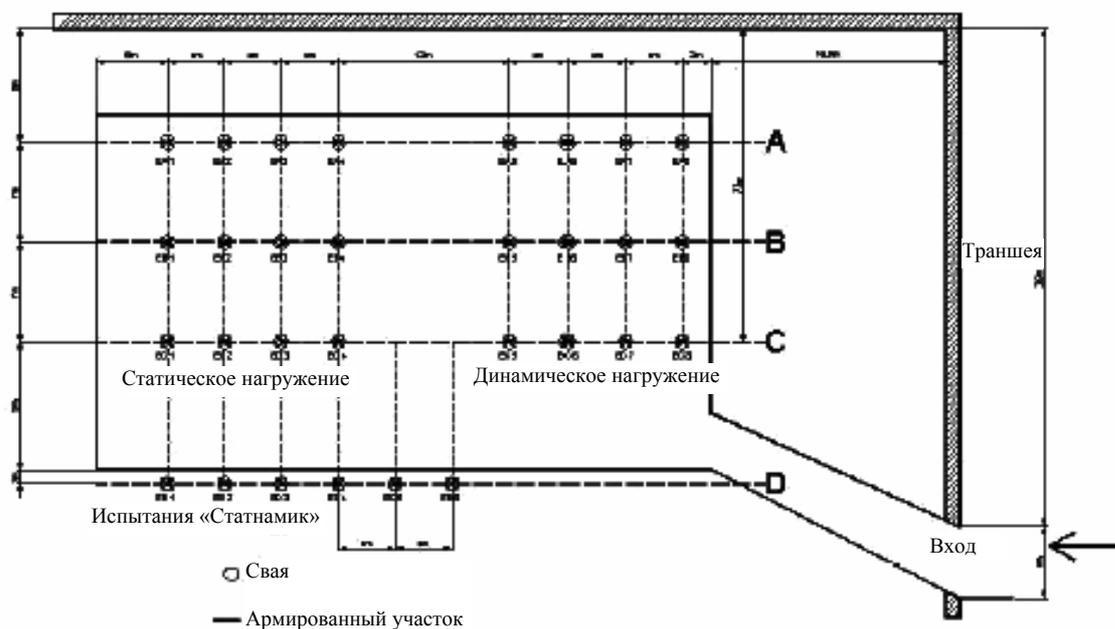


Рис. 15. Площадка SKW: Испытания на нагрузку

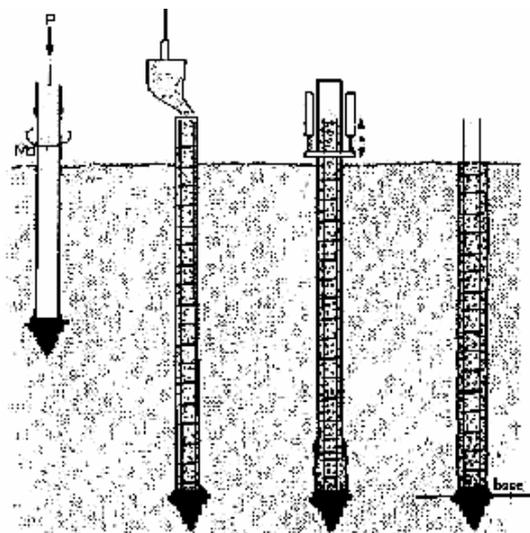


Рис. 16. Винтовые сваи «фундекс»

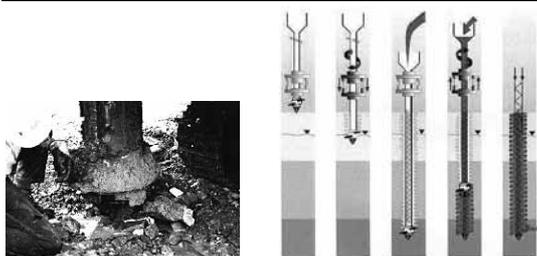


Рис. 17. Винтовые сваи «атлас»

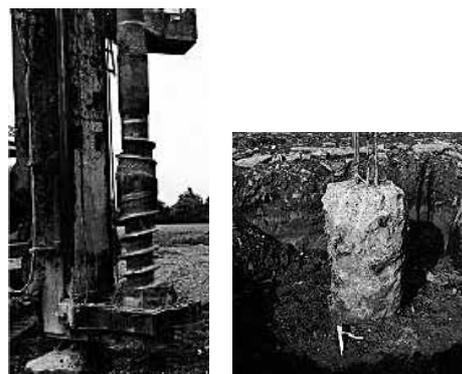
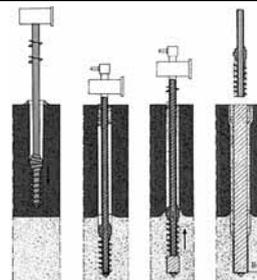


Рис. 20. Винтовые сваи «де вааль»

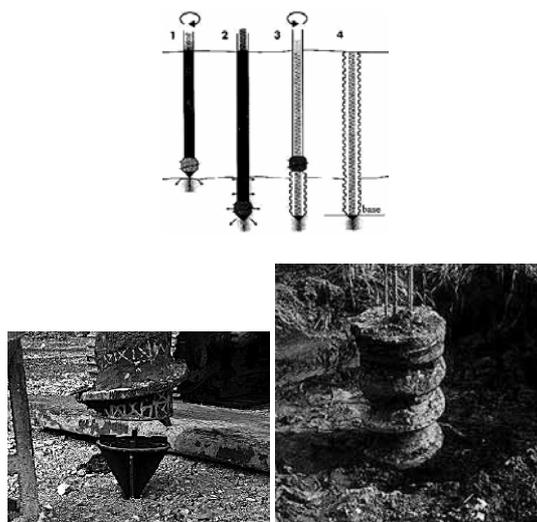


Рис. 18. Винтовые сваи «оливье»

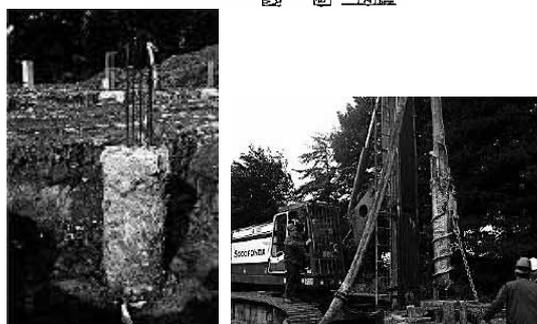
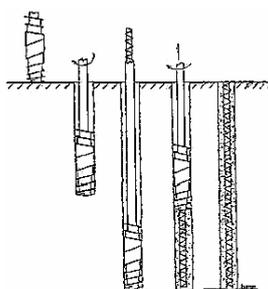


Рис. 19. Винтовые сваи «омега»

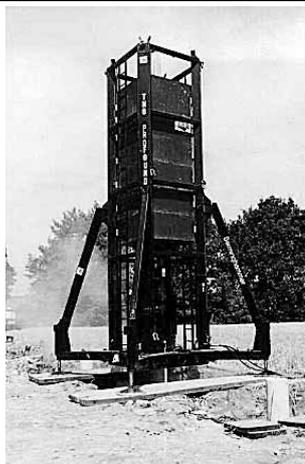


SKW – Система роликового нагружения весом 350 т

Рис. 21. Площадка SKW:
Испытания на статическую нагрузку



Рис. 22. Площадка SKW: Испытания на статическую нагрузку



Статическая нагрузка гравия в контейнере на оголовке сваи – 20 тонн
Детонация между оголовком сваи и грузом повторяется дважды для каждой сваи; мощная система гидравлического демпфирования предотвращает падение груза на оголовок сваи после детонации.

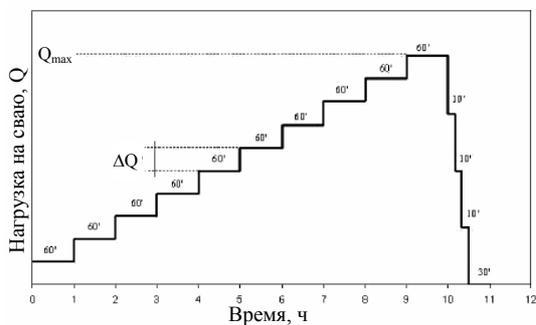


Рис. 23. Площадка SKW: Схема проведения испытания на статическую нагрузку

Рис. 25. Испытания «Статнамик» на кинематическую нагрузку

Груз весом 4 т, свободно падающий с высоты 0,4 м; 0,8 м; 1,20 м; вновь 0,8 м; вновь 1,20 м
Непрерывно измерялись ускорение и перемещение оголовка сваи

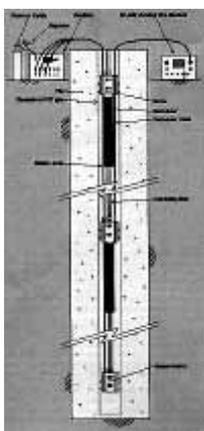


Рис. 24. Мониторинг испытаний на статическую нагрузку

Рис. 26. Испытания на динамическую нагрузку

где $\beta = 1$; $q_{bu}^{(m)}$ из СРТ-Е (Van Impe, 1988);
 $-\varepsilon_b = 1 - 0,01(D_b / d - 1)$.

Сопротивление по стволу сваи

$$R_{su} = \frac{D_s}{d} \cdot \xi_f \cdot \Delta Q_{st} = \xi_f \cdot Q_{su}$$

или

$$R_{su} = \pi \cdot D_s \cdot (\sum H_i \cdot \eta_{pi} \cdot q_{ci})$$

Коэффициент устройства пяты сваи

$$R_{bu} = \alpha_b \cdot \varepsilon_b \cdot Q_{bu} \Rightarrow \alpha_b = \frac{R_{bu}}{\varepsilon_b \cdot Q_{bu}}$$

Несущая способность пяты сваи

$$R_u = R_{bu} + R_{su}$$

Лобовое сопротивление сваи

$$R_{bu} = \beta \cdot \alpha_b \cdot \varepsilon_b \cdot q_{bu}^{(m)} \cdot A_b = \beta \cdot \alpha_b \cdot \varepsilon_b \cdot Q_{bu}$$

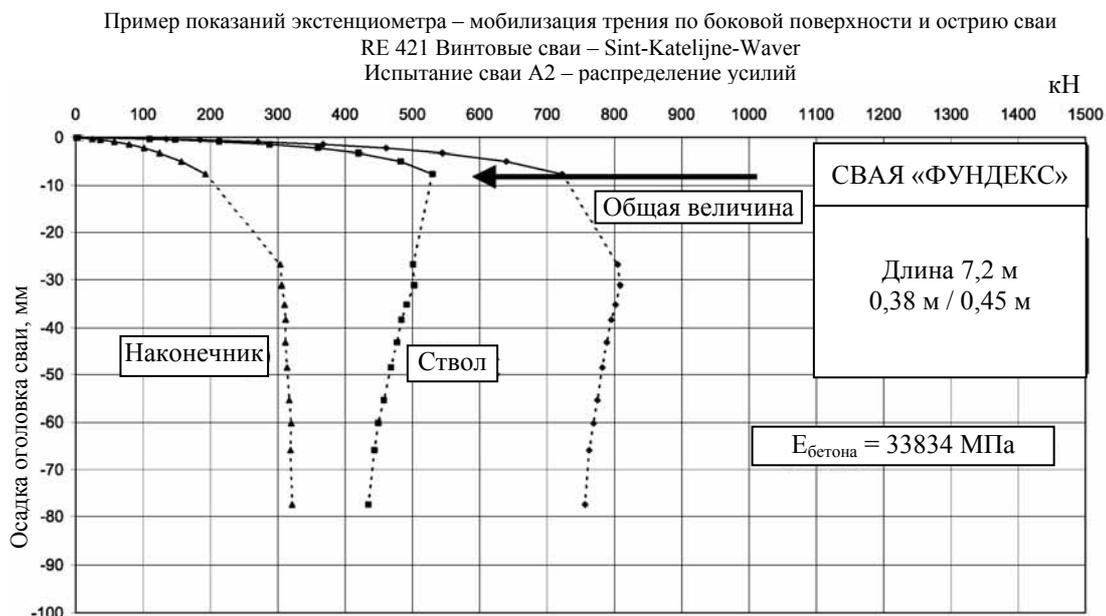


Рис. 27. Результаты испытаний на статическую нагрузку коротких свай «фундекс»

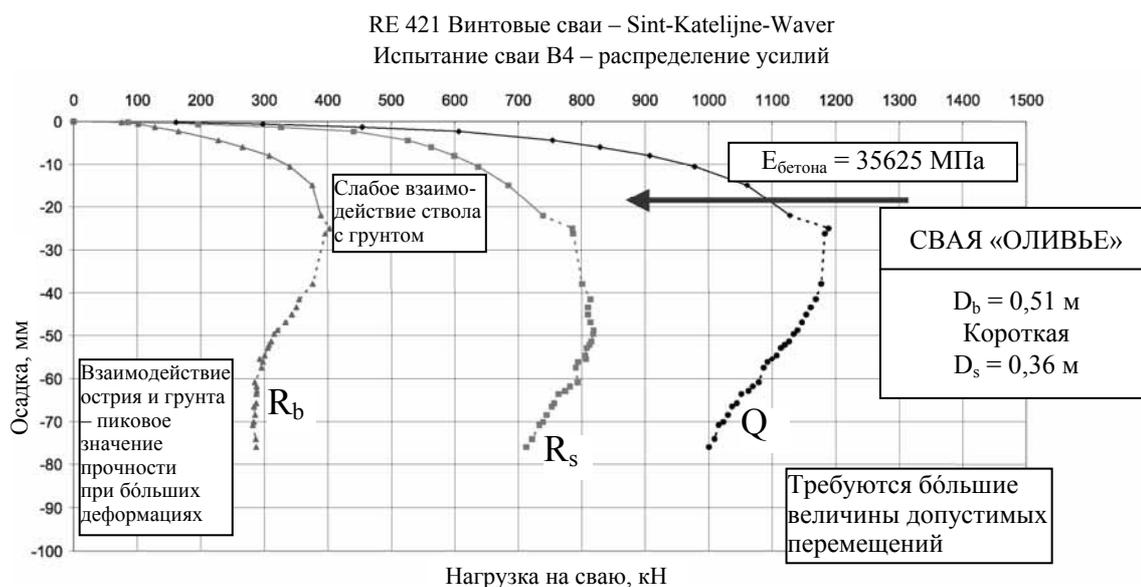


Рис. 28. Результаты испытаний на статическую нагрузку коротких свай «оливье»

Коэффициент устройства ствола сваи

$$R_{su} = \xi_f Q_{su} \Rightarrow \xi_f = \frac{R_{su}}{Q_{su}}$$

или

$$R_{su} = \pi D_s (\sum H_i \cdot \eta_{pi} \cdot q_{ci}) \Rightarrow \eta_p = \frac{R_{su}}{\pi D_s \sum H_i q_{ci}}$$

В качестве контрольных точек для анализа коэффициентов использовались различные критерии отказа: $s_0 = 25 \text{ мм}$; $s_0 = 10 \% D_b$; $s_0 = 15 \% D_b$; $s_0 = \text{макс}$.

Результаты подобного анализа установочных параметров для данного инженерно-геологического разреза также зависят от вида сваи, особенностей ее установки, критериев

RE 421 Винтовые сваи – Sint-Katelijne-Waver
Испытание сваи C2 – распределение усилий

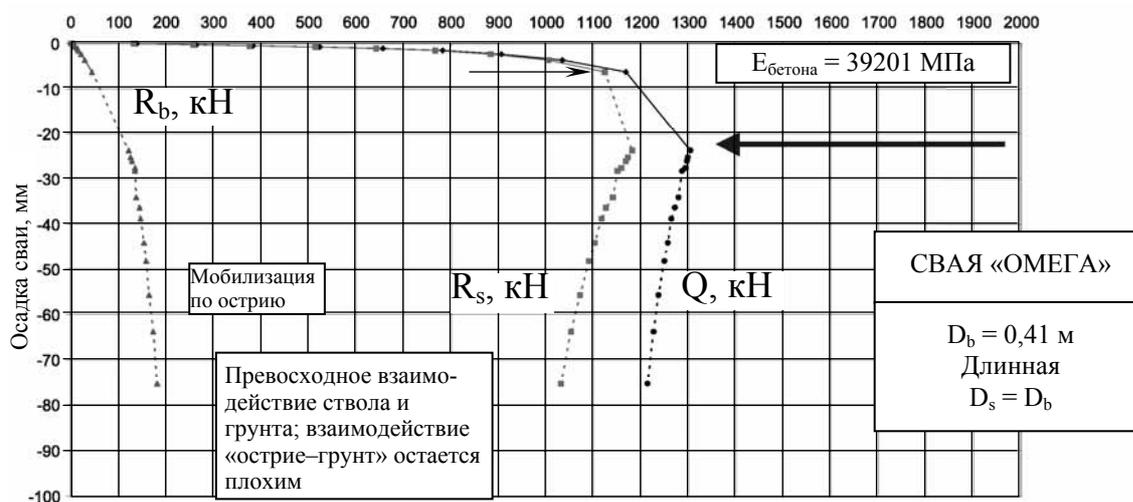


Рис. 29. Результаты испытаний на статическую нагрузку длинных свай «омега»

RE 421 Винтовые сваи – Sint-Katelijne-Waver
Испытание сваи C4 – распределение усилий

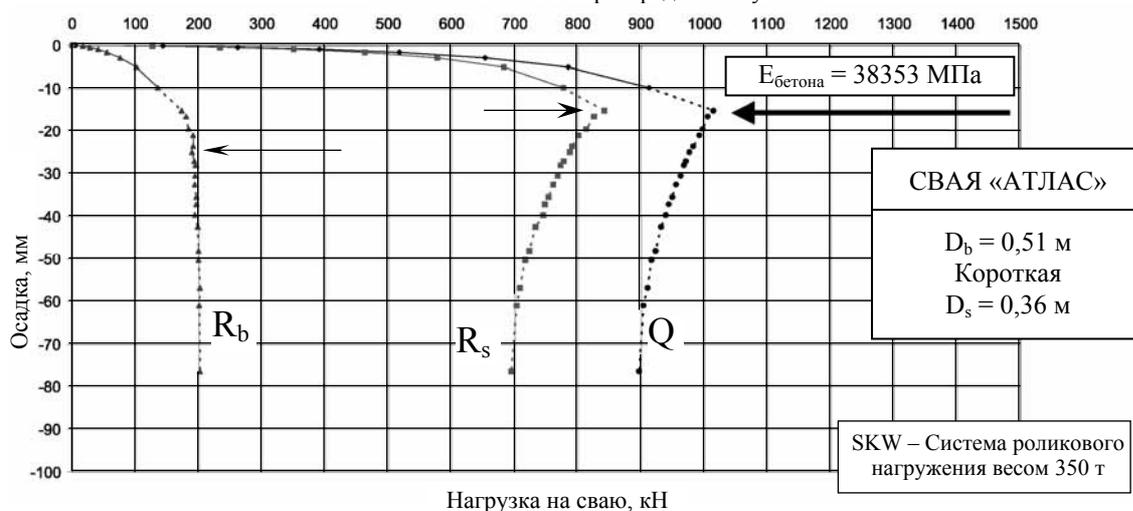


Рис. 30. Результаты испытаний на статическую нагрузку коротких свай «атлас»

отказа, диаметра и длины. В табл. 1 приведен пример такого анализа для свай «омега» в условиях данной площадки. Аналогичные результаты могут быть получены и для других видов свай. В табл. 2 показаны примеры использования подобного анализа для всех видов винтовых свай, испытываемых в ходе рассматриваемого исследования, при этом считается, что коэффициент отказа $s_0 = 10\%$. Сложнее всего преобразовать полученные

значения в более универсальные единицы для определения несущей способности ствола винтовых свай, поскольку данная операция предполагает очень точное определение диаметра сваи на основании установочных параметров. Можно предположить, что в рамках данного исследования следовало несколько изменить установочные параметры после выемки тестовых свай весной 2003 г. Единственное надежное сравнение можно

RE 421 Винтовые сваи. Площадка Sint-Katelijne-Waver
Испытание сваи С4 на статическую нагрузку
Распределение нагрузки, кН

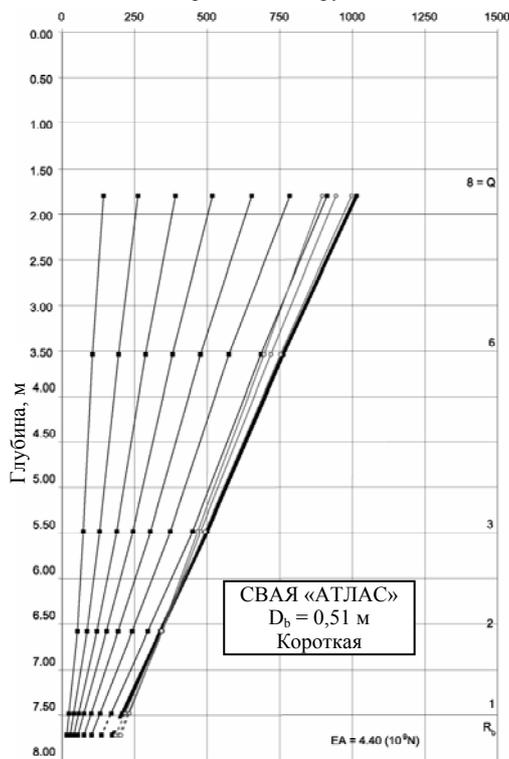


Рис. 31. Результаты испытаний на статическую нагрузку коротких свай «атлас»

RE 421 Винтовые сваи – Sint-Katelijne-Waver
Испытание сваи С2 на статическую нагрузку
Распределение нагрузки, кН

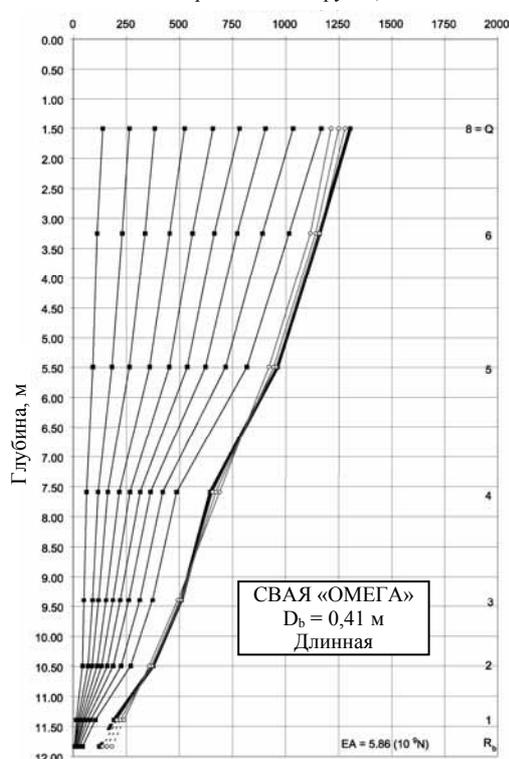


Рис. 32. Результаты испытаний на статическую нагрузку длинных свай «омега»

Таблица 1

Измеренные коэффициенты устройства свай по данным экстензометров
Свай «Омега»

Критерий потери несущ. способности, S_0	α_b измерен.			ξ_f измерен.			η_b измерен.		
	Коротк.	Длинн.	Среднее знач.	Коротк.	Длинн.	Среднее знач.	Коротк.	Длинн.	Среднее знач.
Пиковый	0,58	0,47	0,53	0,83	0,85	0,84	0,034	0,039	0,037
25 мм	0,60	0,47	0,54	0,82	0,85	0,84	0,034	0,039	0,037
10% D_b	0,67	0,57	0,62	0,77	0,80	0,79	0,032	0,037	0,035
15% D_b	0,71	0,66	0,69	0,74	0,77	0,76	0,031	0,035	0,033
Макс.	0,74	0,71	0,73	0,72	0,74	0,73	0,030	0,034	0,032

Коэффициенты качества устройства свай зависят от:
вида свай (технологии устройства – деталей);
длины и диаметра свай.

вывести из так называемого номинального диаметра сваи, который указывается в спецификации к каждой свае, и технологии установки. Все сваи, используемые в проекте Limeletter, извлечены для определения их реальных параметров.

2.2. Вертикальная и боковая циклическая нагрузки на винтовые сваи

В ходе создания железнодорожного тоннеля под Ла-Маншем для строительства высокоскоростных путей на болотистой местности вдоль Темзы применялись насыпи с использованием винтовых свай (рис. 33, 34).

Предварительные комплексные испытания на циклическую и статическую нагрузки проводились на тестовых сваях, оснащенных измерительными приборами (табл. 3, 4). Тестовые сваи TP1–TP3 подвергались осевому нагружению, сваи TP4–TP7 – боковому на-

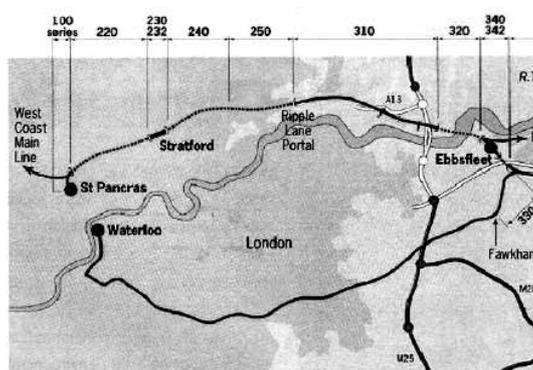


Рис. 33. Проектирование высокоскоростной железнодорожной магистрали на слабых грунтах

гружению в условиях фиксации оголовка свай (TP4 и TP5) или свободного нагружения на оголовки свай (TP6 и TP7). На данной площадке в условиях типичного для Лондона заболоченного грунта (рис. 35) в основном

Таблица 2

Измеренные коэффициенты устройства свай по данным экстензометров при критерии потери несущей способности $S_0 = 10\% D_b$

Вид сваи	α_b	ξ_f измерен.			η_p измерен.		
		Коротк.	Длинн.	Среднее знач.	Коротк.	Длинн.	Среднее знач.
Фундекс	0,95	0,83	0,75	0,79	0,034	0,030	0,032
Де вааль	0,65	0,89	0,86	0,88	0,036	0,035	0,036
Оливье	0,80	1,01	0,87	0,94	0,042	0,035	0,039
Омега	0,75	0,79	0,84	0,82	0,032	0,035	0,034
Атлас	0,60	0,80	0,87	0,84	0,032	0,035	0,034

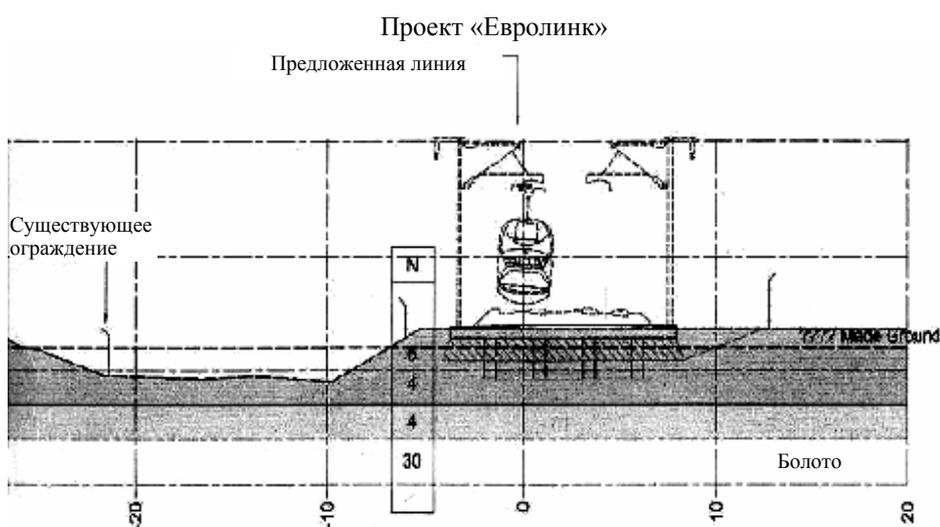


Рис. 34. Проектное решение высокоскоростной ж/д магистрали в болотистой местности

Таблица 3

Проект устройства свай «Атлас» в Дагенхэме (Великобритания). Показания датчиков нагрузки/перемещений и мессур, установленных на 4 глубинах, снимались каждые 12 сек.

Свая	Вид испытания	Пиковая статическая нагрузка, кН	Макс. перемещение, мм	Остаточн. перемещение, мм
ТР1 510/710 9,25 м	Вертикальное циклическое и последующее осевое статическое нагружение	4200	61,11	47,61
ТР1 510/710 5,50 м	Вертикальное циклическое и последующее осевое статическое нагружение	2250	62,19	49,35
ТР1 510/710 5,75 м	Вертикальное циклическое и последующее осевое статическое нагружение	2080	62,72	52,63

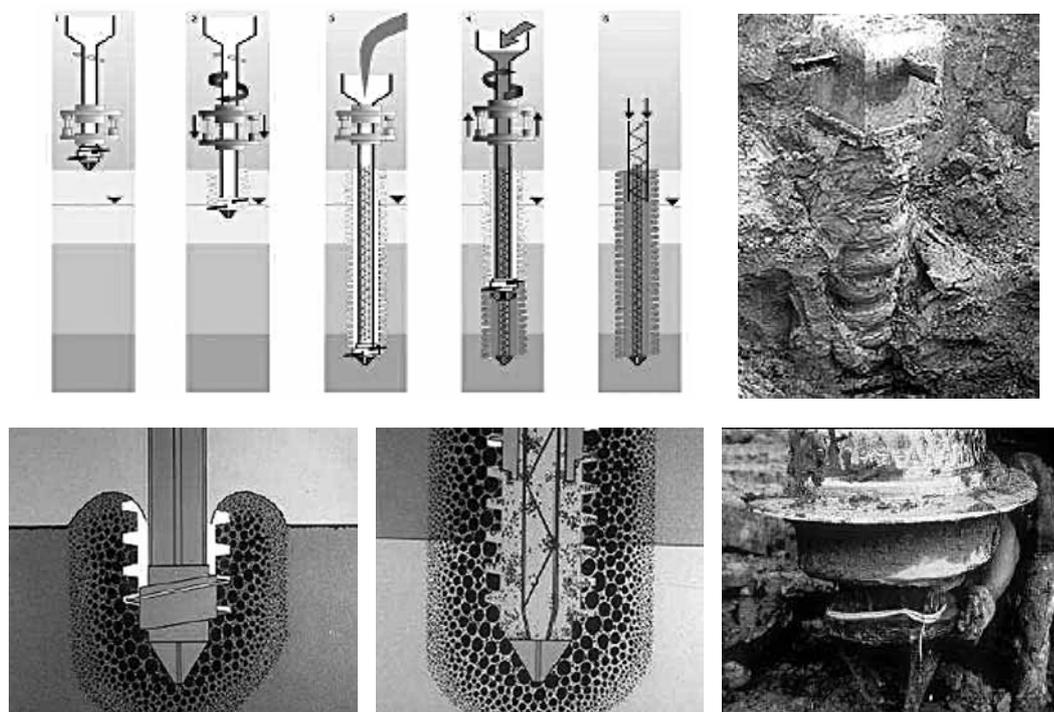


Рис. 35. Насыпь на сваях в болотистой местности

испытывались сваи двух длин. Короткие винтовые сваи проходили через слой очень слабой органической глины, очень плотного песка и достигали слоя гравия. Длинные сваи ввинчивались на глубину 9,25 м, до плотного песка и гравия, а также лежащего под ними слоя частично разрушенного мела. Основными параметрами для определения несущей способности свай под действием боковой

нагрузки являлись модуль малых деформаций сдвига G_0 и зависящий от него модуль сдвига. На рис. 36 показана кривая уменьшения уровня деформации.

Сваи ТР1 (длинная), ТР2 и ТР3 (короткие) подвергались вертикальному (осевому) нагружению с помощью 4 нагрузочных свай, устанавливаемых на каждую тестовую сваю. Боковая нагрузка прикладывалась к сва-

Проект устройства свай «Атлас» в Дагенхэме (Великобритания). Показания инклинометров для фиксации положения оси свай, датчиков нагрузки/перемещений и мессур, установленных на 4 глубинах, снимались каждые 12 сек.

Свая	Вид испытания	Пиковая статическая нагрузка, кН	Макс. перемещение, мм	Остаточн. перемещение, мм
ТР4 – ТР4i 510/710 8,50 м	Боковое циклическое и последующее осевое статическое нагружение	400 Сваи-близнецы с общим фиксированным ростверком	11,48	4,17
ТР5 – ТР5i 510/710 4,74 м	Боковое циклическое и последующее осевое статическое нагружение	400 Сваи-близнецы с общим фиксированным ростверком	14,98	5,81
ТР6 560/760 9,00 м	Боковое циклическое и последующее осевое статическое нагружение	200 Свободный оголовок	23,29	7,86
ТР7 560/760 5,20 м	Боковое циклическое и последующее осевое статическое нагружение	200 Свободный оголовок	39,71	14,75

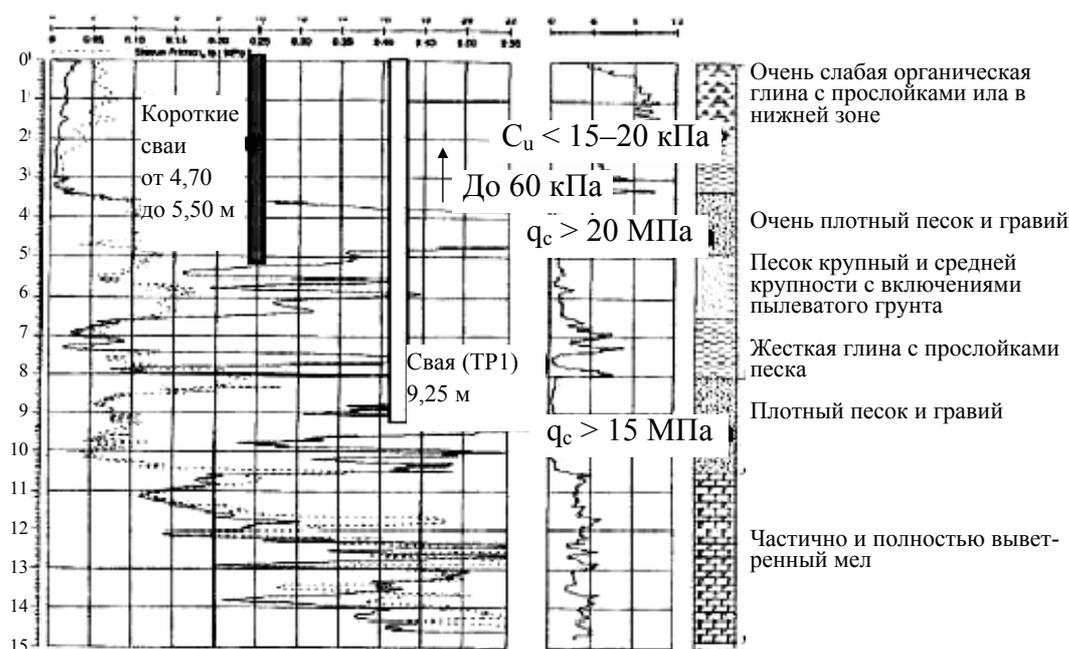


Рис. 36. Инженерно-геологический разрез грунта на площадке Дагенхэм (Великобритания)

ям с фиксированным оголовком ТР4 (длинная) и ТР5 (короткая), а также к сваям ТР6 (длинная) и ТР7 (короткая) в условиях свободного нагружения на оголовок свай (см. табл. 3, 4).

Результаты вертикальных (осевых) нагружений свай могут быть описаны следующим образом:

Циклическая нагрузка:

Начальная статическая нагрузка составляла 450 кН, прикладывалась с одинаковым приращением и выдерживалась на каждом уровне до скорости осадок < 0,1 мм/ч.

Динамическая нагрузка осуществлялась в 6 заходов по 10000 вертикальных циклов

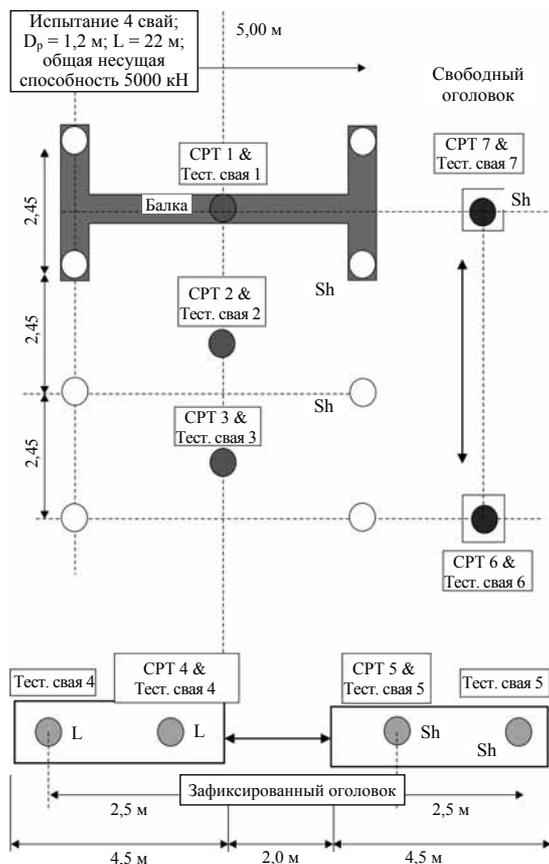


Рис. 37. План испытательной площадки в Дагенхэме

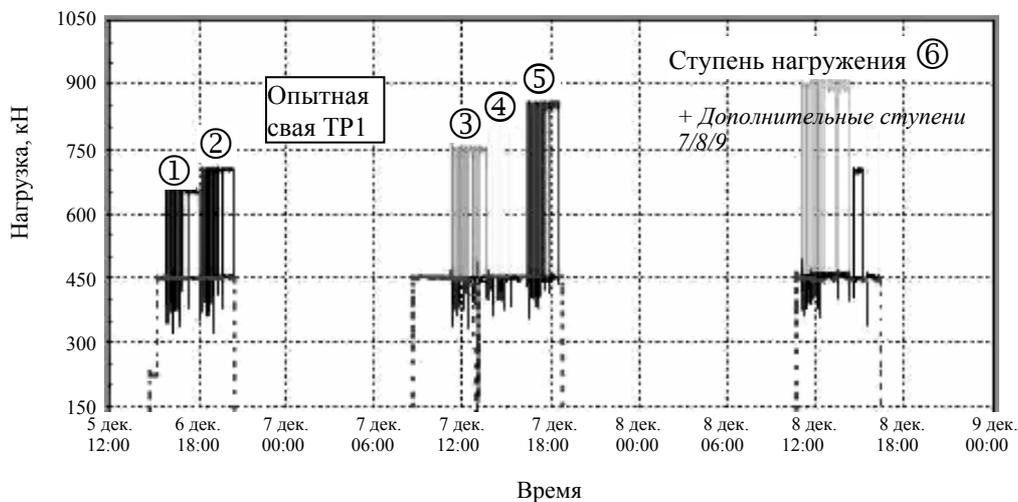
сверху, всегда начиналась в условиях статической нагрузки (частота – 2 Гц), при каждом заходе амплитуда изменялась. Общая осадка под действием быстрой циклической нагрузки должна достичь 10 мм, или 60 000 циклов. Последний шаг (разгрузка до 0 кН) должен длиться не менее 0,5 ч.



Рис. 38. Экспериментальное оборудование для нагружения винтовых свай

Последующая статическая нагрузка (с шагом 300 кН) увеличивалась до критического состояния (10% от диаметра сваи, или 5000 кН). Время приложения нагрузки должно быть более 15 мин, чтобы скорость осадки достигла < 0,1 мм/ч. На рис. 39 приведены

а



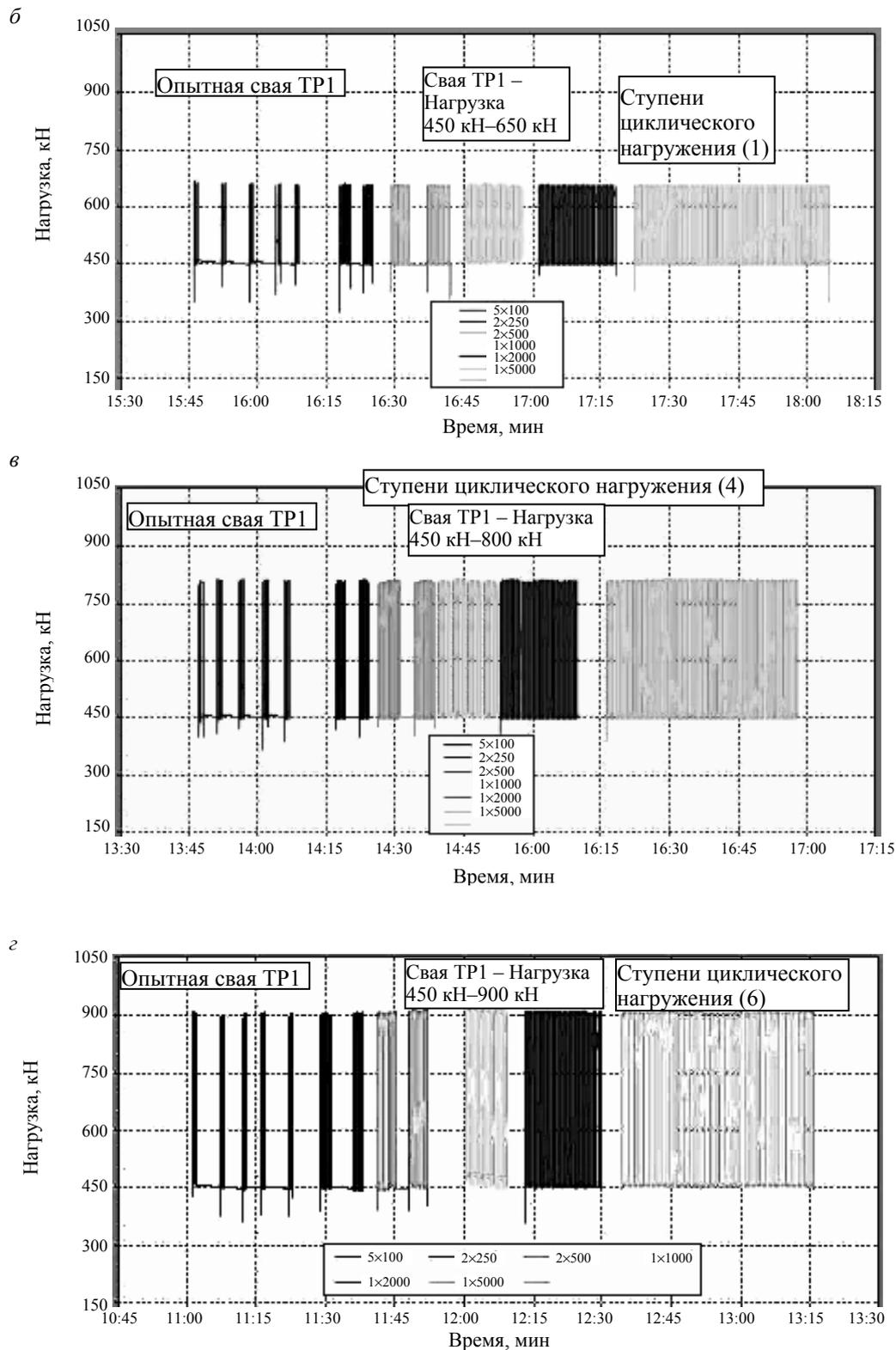


Рис. 39. Вертикальная циклическая нагрузка на свая «атлас TP1»

примеры осевой циклической нагрузки на сваи и результаты последующего испытания свай на статическую осевую нагрузку (свая TP1).

С учетом результатов предыдущих СРТ-испытаний на оси расположения TP1 с использованием методов Ван Импе (1986), де Бира (1972) и LGM (1970) при идеальных установочных параметрах (рис. 41): $\alpha_b = 1,0$ для пяты сваи при номинальном диаметре пяты 0,610 м и $\xi_f = 1$ для ствола сваи – были рассчитаны несущие способности пяты сваи ствола

сваи. Значение $\xi_f = 1$ для ствола сваи «атлас» выверялось в данных условиях много раз (Van Impe 1988, 1993) и может считаться достаточно точным. Однако из сравнения результатов прогнозирования несущей способности пяты сваи с ее измеренным значением (учитывая, что важный критерий отката составляет 10 % D_b) видно, что общая несущая способность сваи «атлас» TP1 и несущая способность ее пяты были переоценены (рис. 41). Прогнозируемые и измеренные величины

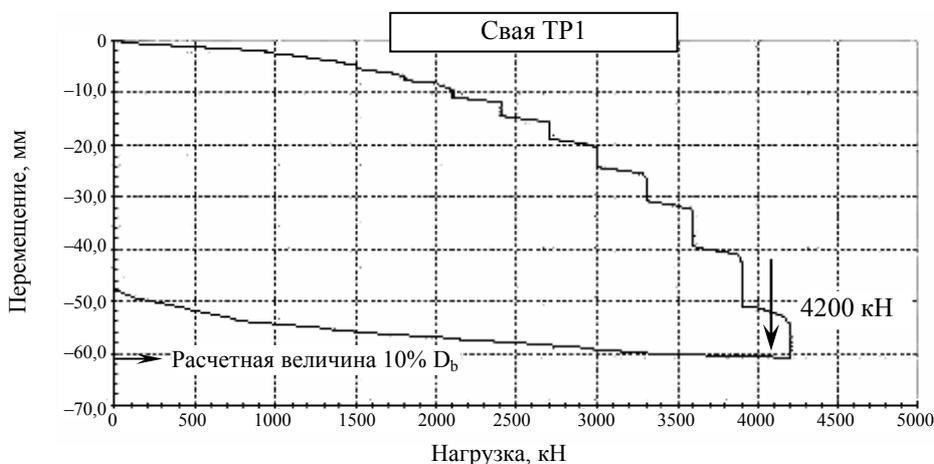


Рис. 40. Статическая нагрузка до потери несущей способности сваи TP1



Рис. 41. Прогноз несущей способности по пяте и стволу сваи традиционными методами на основании СРТ (тип С). Несущая способность по пяте рассчитана тремя методами (De Beer, Van Impe–De Beer, LGM) с использованием результатов СРТ в месте устройства сваи TP1

несущей способности пяты будут хорошо соотноситься только при $\alpha_b = 0,64$. Кроме того, данная величина α_b входит в диапазон значений коэффициента α_b для свай «атлас», установленных в бумовой глине для испытаний несущей способности ствола сваи (см. табл. 2).

На рис. 43–50 приводятся результаты осевых испытаний свай TP2 и TP3 на циклическую и статическую нагрузки с выводом соответствующего коэффициента α_b .

Боковое нагружение свай TP4–TP7 (рис. 51, 52) может проходить в такой последовательности (см. также табл. 4):

боковая циклическая нагрузка:

начальная нагрузка составляла 10 кН и прикладывалась статически в течение 2 мин, постепенно уменьшаясь до 0 кН;

боковая нагрузка составляла 20 кН и прикладывалась в режиме 2 мин нагрузки – 2 мин разгрузки;

далее прикладывалась боковая нагрузка $\Delta 10$ кН (2 мин нагрузки – 2 мин разгрузки);

каждая ступень выдерживалась 2 мин, а боковое перемещение не превышало 0,02 мм;

боковая циклическая нагрузка выдерживалась до тех пор, пока голова сваи не сместилась более чем на 10 мм (100 циклов);

заключительная ступень – разгрузка до 0 кН (30 мин).

Статическая возрастающая нагрузка увеличивалась до максимального уровня циклической нагрузки. Она увеличивалась по 10 кН до условий критического смещения (10% диаметра сваи, или 200 кН/400 кН).

На рис. 53 приведены примеры боковой циклической нагрузки и результаты последующего испытания свай на статическую боковую нагрузку.

3. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ФУНДАМЕНТОВ ГЛУБОКОГО ЗАЛОЖЕНИЯ

3.1. Проектирование и анализ

Поскольку такие параметры, как жесткость наземных сооружений и их взаимодействие с группой свай, ведут себя нелинейно, более рациональным будет интерактивное проектирование (подразумевающее активное использование более гибких проектировочных решений) с использованием более универсальных методов испытания грунта и мониторинга установки свай. Согласно очень точному замечанию Х. Поулоса (Poulos – Orlando, 2002), перспектива улучшения свайных фундаментов должна способствовать развитию методов проектирования, в которых уделяется большое вни-

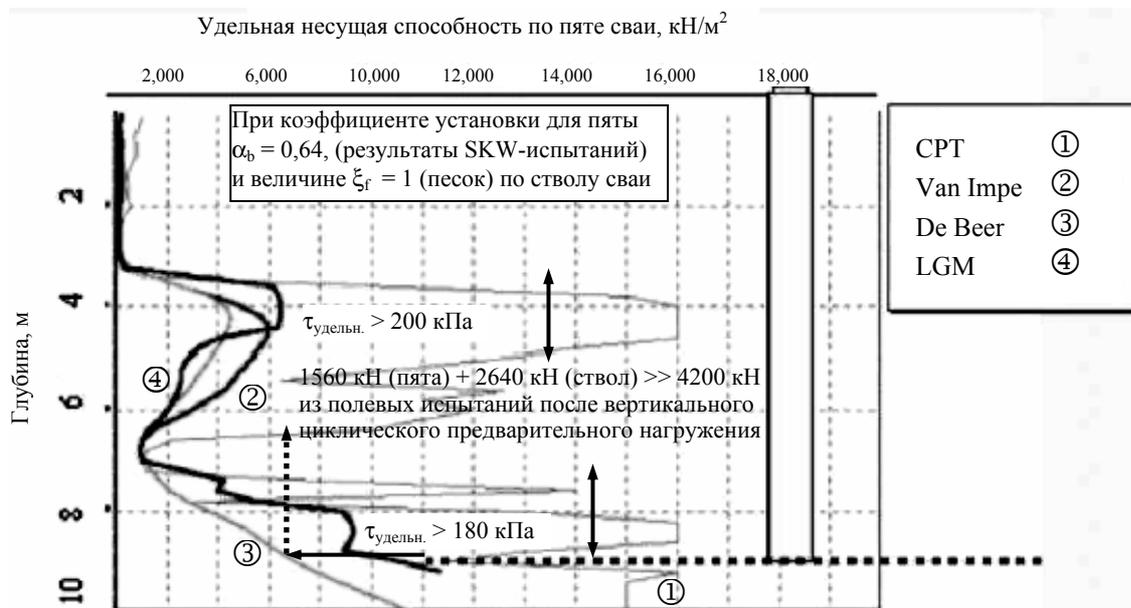


Рис. 42. Изменения в прогнозе несущей способности по пяте и стволу сваи традиционными методами на основании CPT (тип C)

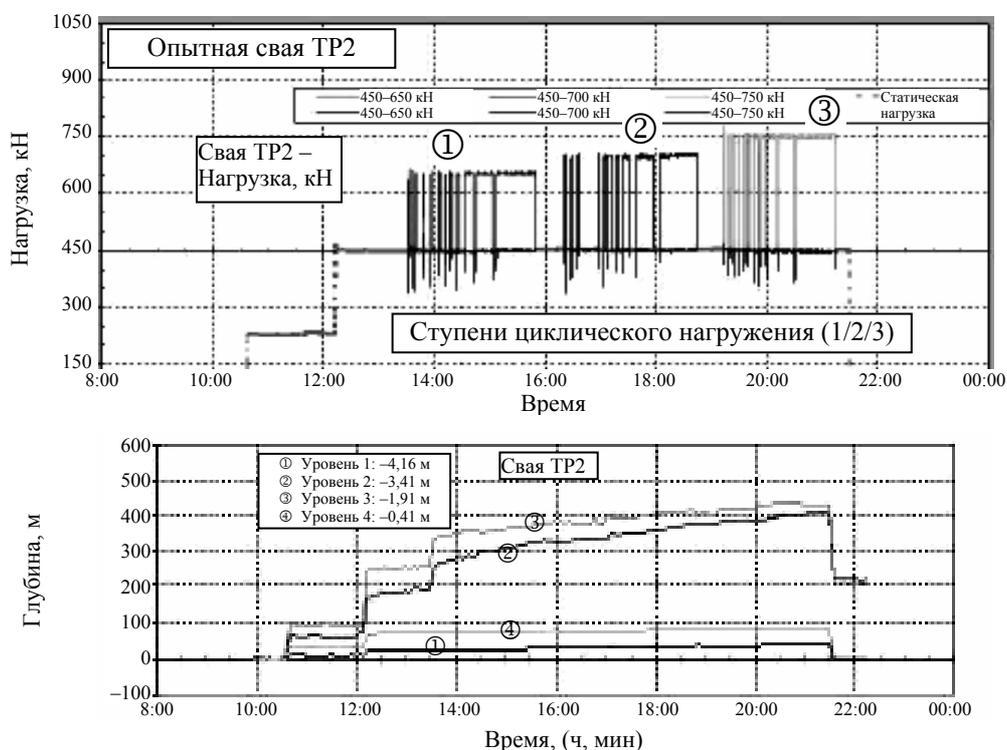


Рис. 43. Вертикальная циклическая нагрузка на сваю «атлас TP2»

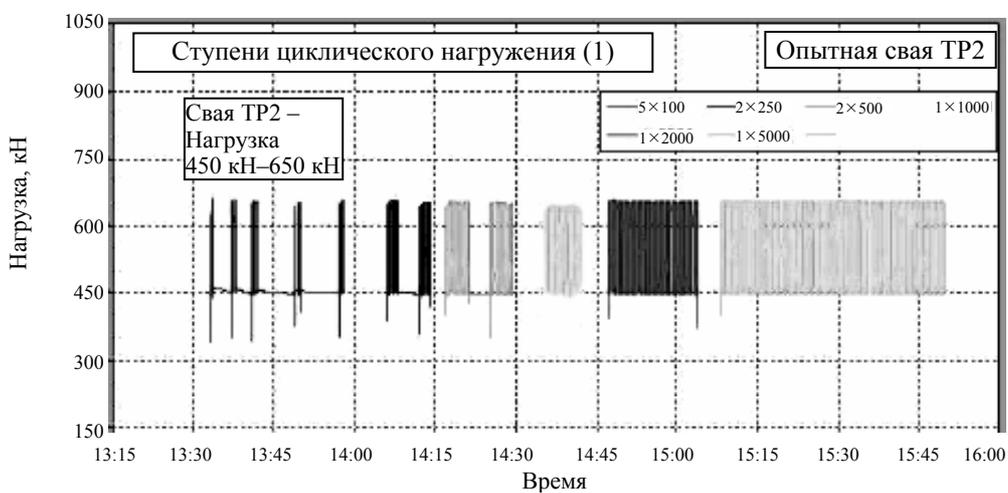


Рис. 44. Вертикальная циклическая нагрузка на сваю «атлас TP2»

мание исследованию грунта и полностью активизируются свайные фундаменты, например, через оптимизацию свайного ростверка.

3.2. Особенности свай

Можно ожидать, что в будущем для изготовления свай будут использоваться армированные пластиковые и стекловолоконные

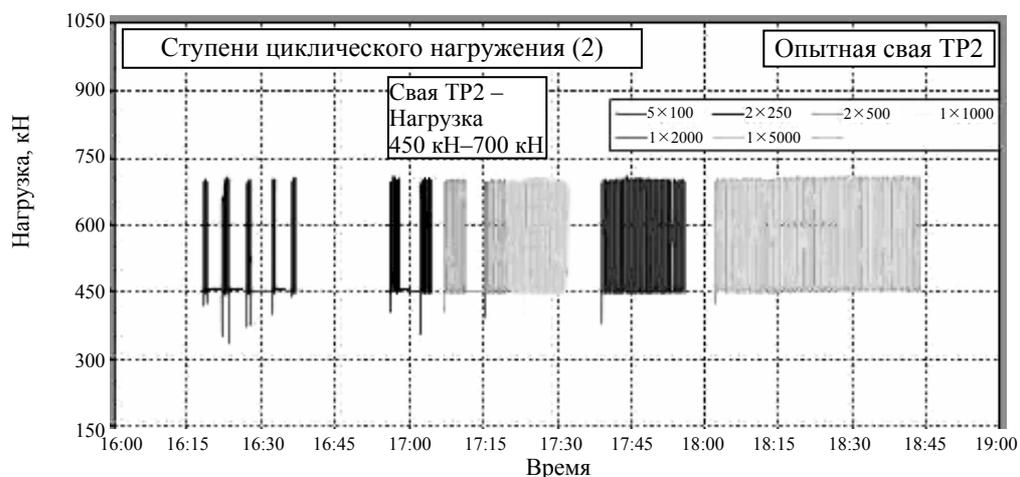


Рис. 45. Вертикальная циклическая нагрузка на сваю «атлас TP2»

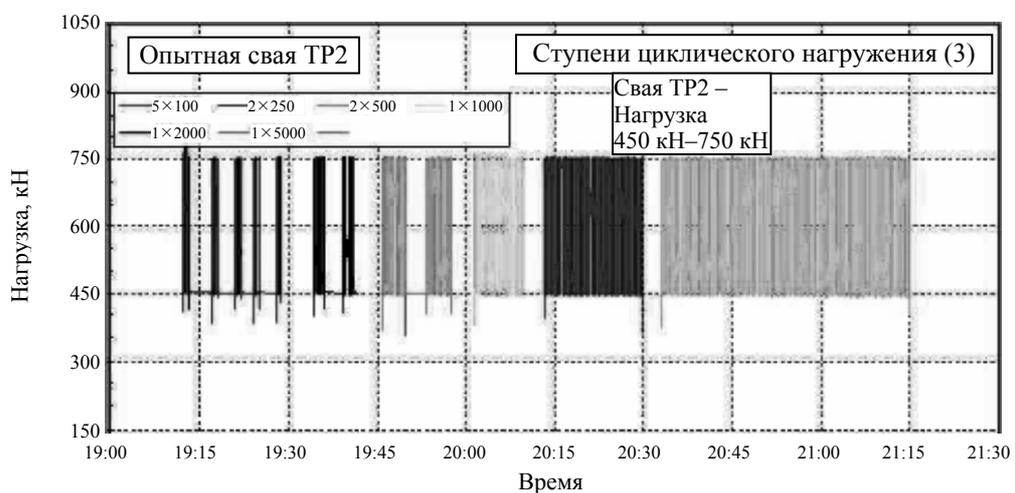


Рис. 46. Вертикальная циклическая нагрузка на сваю «атлас TP2»

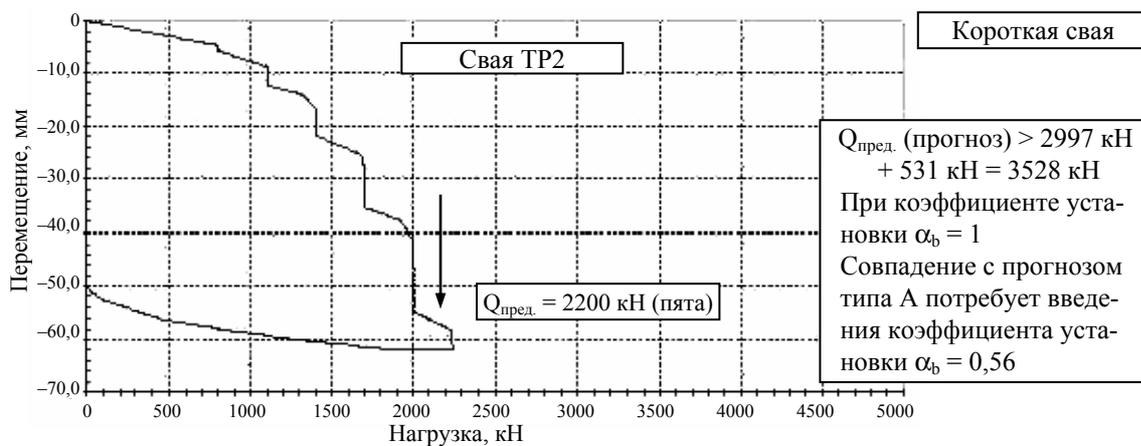


Рис. 47. Статическая нагрузка до потери несущей способности сваи TP2 с корректировкой фактора установки для его соответствия результатам испытаний

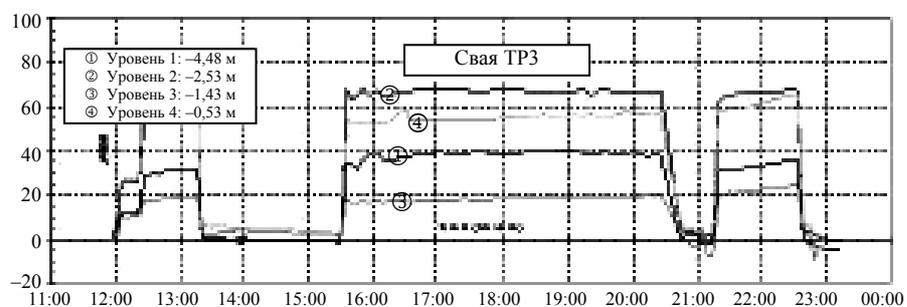
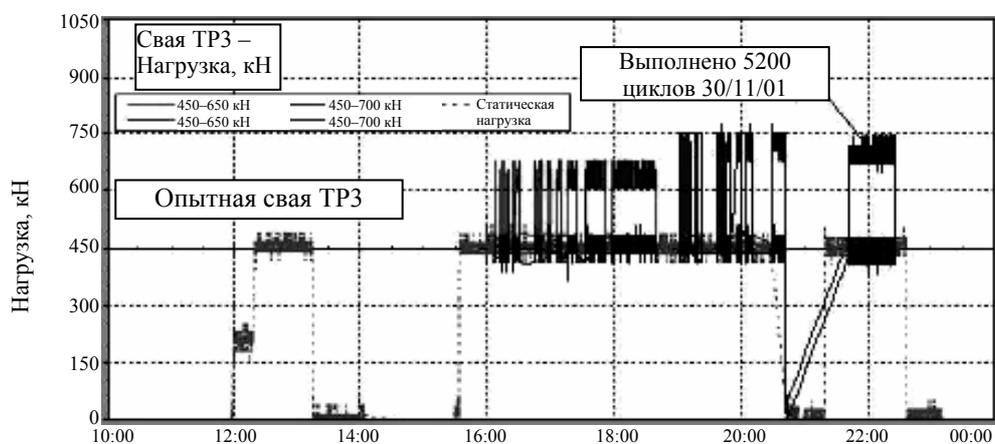


Рис. 48. Вертикальная циклическая нагрузка на свая «атлас TP3»

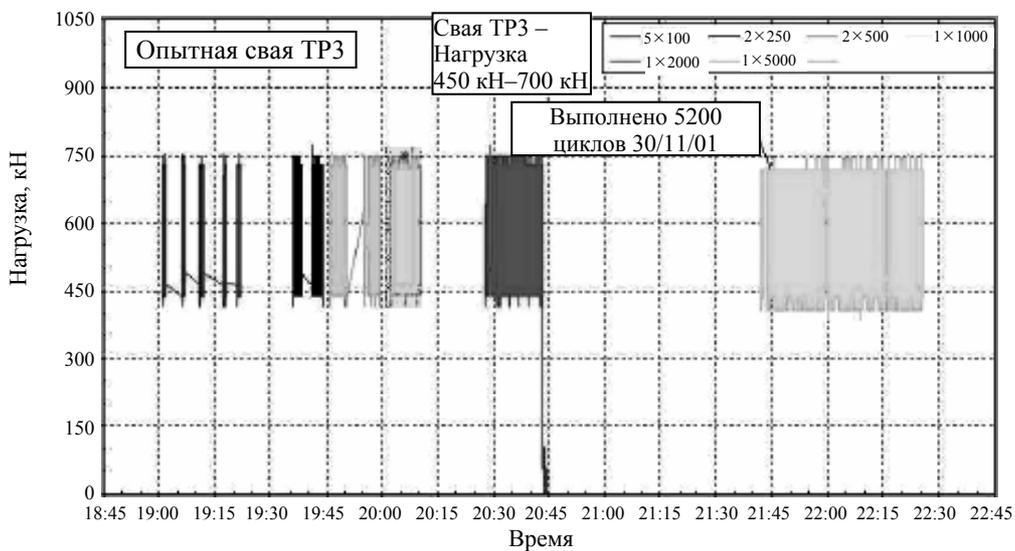


Рис. 49. Вертикальная циклическая нагрузка на свая «атлас TP3»

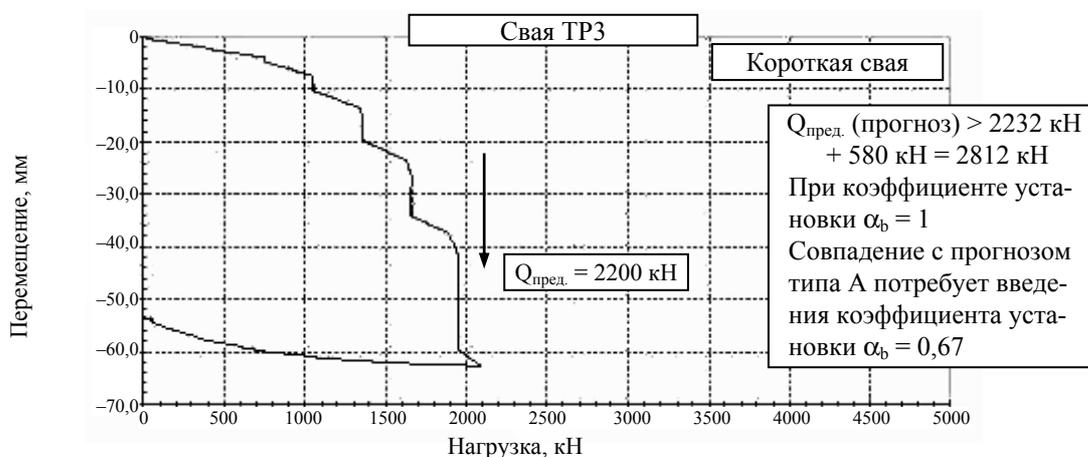


Рис. 50. Статическая нагрузка до потери несущей способности сваи TP3 с корректировкой фактора установки для его соответствия результатам испытаний



свай; сваи из волокна, ориентированного в одном направлении и т. д.

3.3. Испытание свай

Безусловно, будут созданы более совершенные механизмы испытания фундаментов в процессе их эксплуатации. Можно ожидать (Poulos – Orlando, 2002), что в дальнейшем станут активнее использоваться методы микрогеофизического контроля за поведением (мини-SASW) и жесткостью свай.

3.4. Препятствия на пути развития новых технологий в области строительства фундаментов глубокого заложения

Мы считаем, что в данном случае самая серьезная проблема – невозможность отказа от старых методов проектирования, базирующихся на различных нормах и предписаниях, что часто делает их слишком формальными и консервативными. Кроме того, все большее количество неквалифицированных инженеров или специалистов совершенно в другой области используют «черные ящики» сложных численных кодировок, даже не представляя себе реальные геотехнические требования и не понимая сущности изменения параметров грунта. И эту проблему необходимо решать (Poulos – Orlando, 2002).



Фиксированный оголовок; боковая нагрузка
Тяжелый ростерк на обеих сваях

Рис. 51. Расположение свай с зафиксированными оголовками, испытываемых на боковую нагрузку

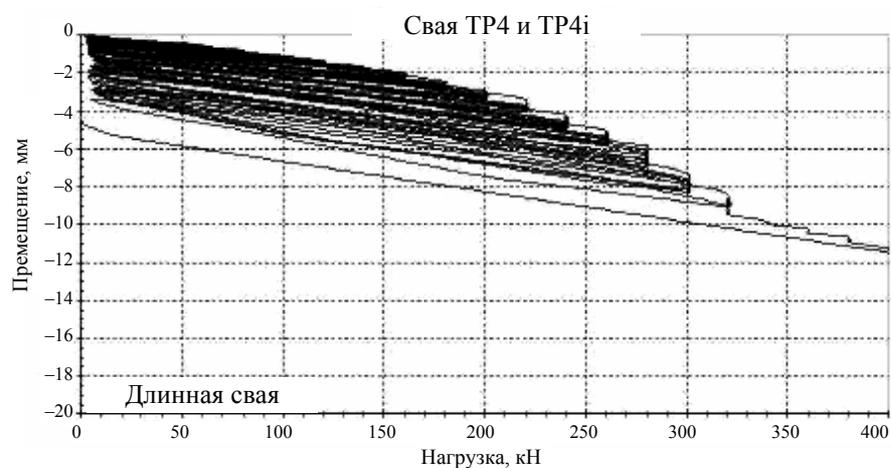
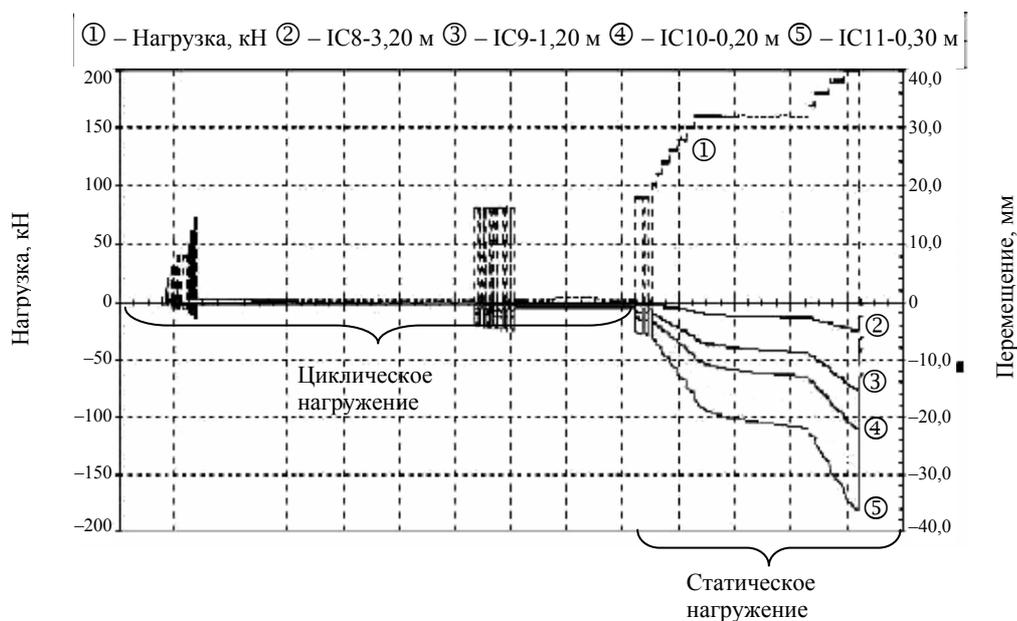


Рис. 52. Испытание сваи TP7 на боковую нагрузку



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализируя современные тенденции и перспективы развития в области строительства фундаментов глубокого заложения хотелось бы отметить следующее. Мировой рынок завоевывают современные технологии строительства фундаментов глубокого заложения, однако на внутренних рынках до сих пор господствуют традиционные концепции фундаментостроения. Большинство норм и стандартов являются преградой на пути развития

новых тенденций, поэтому на нас лежит особая ответственность за разработку Еврокода 7.

Но даже если мы не будем постоянно ссылаться на нормы и правила, процесс повсеместного внедрения новых концепций и технологий будет достаточно сложным, поскольку он связан с большими экономическими затратами. Поэтому необходимо разрабатывать более гибкие совместные мировые стратегии, обеспечивать более эффективное взаимодействие между геотехниками и исполнителями работ по строительству фундамен-

тов глубокого заложения, активизировать практическую направленность исследований в области существующих технологий, вкладывать средства в развитие методов мониторинга и новых технологий, прежде всего в дальнейшую разработку метода наблюдений, применение которого поможет сократить затраты на проектирование.

Для развития новых технологий и выполнения поставленных задач необходимо более

плодотворное сотрудничество государственных чиновников, разработчиков норм, исполнителей проектов и др. Но мы уверены, что несмотря на все проблемы и финансовые сложности новые технологии и инновационные инженерные решения в области геотехники и фундаментостроения, завоюют мировой рынок.