

## ПРОВЕДЕНИЕ ГЛУБИННЫХ ЗЕМЛЯНЫХ РАБОТ В СЛОЯХ ПЕРЕУПЛОТНЕННОЙ ГЛИНЫ. СЛУЧАЙ ИЗ ПРАКТИКИ (ЯПОНСКИЙ ЦЕНТР ВО ФРАНКФУРТЕ, ГЕРМАНИЯ)

**Я. ЭЛЬ-МОССАЛЛАМИ** - *д-р техн. наук, профессор университета Эйн Шэмс, Каир (Египет), компания ARCADIS Trischler & Partner, Дармштадт, Германия.*

Данная работа представлена в ТК38 ISSMGE «Взаимодействие оснований и сооружений» в качестве случая из практики. Автор провел численный анализ системы подпорных стен при откопке глубокого котлована во Франкфурте-на-Майне. Представлены результаты расчета и их сопоставление с данными натурных наблюдений.

### ВВЕДЕНИЕ

В процессе развития территории Европейского финансового центра во Франкфурте, мегаполисе, стоящем на двух реках (Рейне и Майне), был спроектирован небоскреб, уникальный для Европы по сравнению даже с самыми выдающимися высотными зданиями.

Для сооружения цокольного этажа и подземной парковки в Японском центре потребовалось откопать котлован глубиной примерно 16 м. Основная башня комплекса с размерами в плане 37×37 м имеет нецентрированную подземную зону (рис. 1). Фундаменты главной башни и боковых сооружений могут быть спроектированы без осадочных швов с применением плитно-свайного фундамента. Для уменьшения крена здания до допустимых пределов сваи в основании башни размещены на различных расстояниях.

### 1. ГЕОТЕХНИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ

В центре Франкфурта верхние слои грунта (примерно 5...7 м от уровня поверхности) представлены четвертичным песком и гравием, которые подстилает так называемая франкфуртская глина, образовавшаяся 2...10 млн лет назад как отложения в море третичного периода в районе Майнца. В слой глины входят пласты известняка, линзы бурого угля

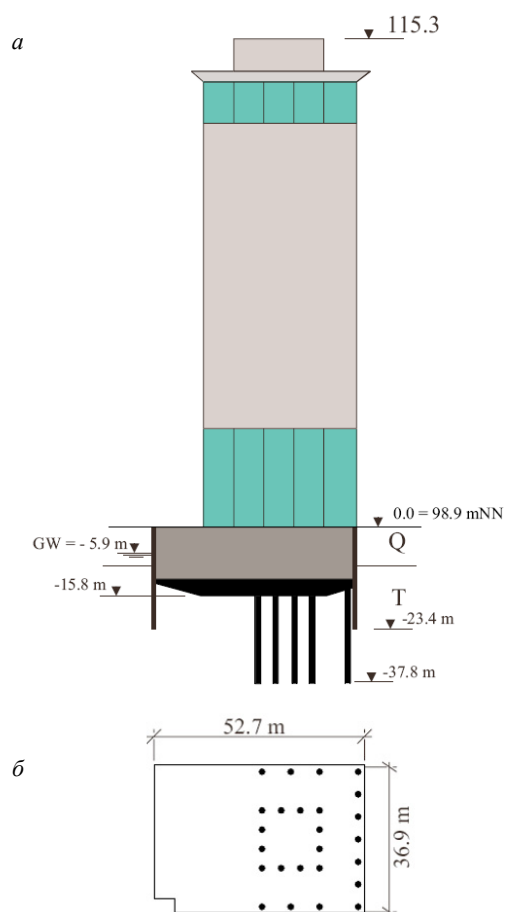


Рис. 1. Общий план высотного здания японского центра и его фундаментов: *a* – поперечный разрез; *b* – план; *Q* – четвертичный песок/гравий; *T* – третичная глина

© Y. El-Mossallamy, 2006

Internet: [www.georec.spb.ru](http://www.georec.spb.ru)

и слой известкового песка. Уровень грунтовых вод в основном находится прямо над поверхностью слоя глины, причем вода циркулирует в растрескавшихся пластах известняка и залежах песка, что приводит к различным обжимающим давлениям воды. Глина геологически переуплотняется через более древние выветрившиеся отложения и вулканические скалы, оставшиеся от Вогельсбергских вулканов. В результате перечисленных явлений основание испытывает большие горизонтальные напряжения. Это влияет на деформацию и поведение переуплотненной глины при разрушении. Основные геотехнические параметры, характеризующие различные слои грунта, приведены в табл. 1.

## 2. СИСТЕМА ПОДПОРНЫХ СТЕН ПРИ ОТКОПКЕ ГЛУБОКОГО КОТЛОВАНА

С учетом грунтовых условий, а также подземного загрязнения в некоторых областях требовалось по возможности избежать понижения уровня грунтовых вод, минимизировать риск избыточных осадок соседних зданий и не нанести ущерба окружающей среде. В грунтовых условиях Франкфурта это можно сделать, установив герметичные стены вокруг отрываемого котлована и соединив их нижний край со слоем глины, лежащим ниже водоносного

четвертичного слоя.

Уникальной чертой подпорной конструкции, используемой при проведении земляных работ по проекту Японского центра, стало применение разгрузочных скважин и расположенных уступами свай различной длины (рис. 2, 3). Благодаря данной системе удалось уменьшить давление воды на подпорную конструкцию и создать проект, отвечающий эксплуатационным и экологическим требованиям. Разгрузочные скважины распределялись по площади котлована для предотвращения выпора дна под действием направленных вверх гидравлических градиентов. Подпорные стены состояли из секущих буронабивных свай диаметром 0,9 м. Сначала на расстоянии 1,5 м устанавливали гладкие бетонные сваи, острия которых находились чуть ниже уровня конечной глубины откопки. Затем для большей гарантии водонепроницаемости между гладкими сваями сооружали железобетонные сваи, которые перекрывали гладкие сваи на 0,15 м. Железобетонные сваи уходили примерно на 8 м ниже конечной глубины откопки (рис. 2).

## 3. ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ

Для моделирования поведения грунта и конструкций во время откопки котлована

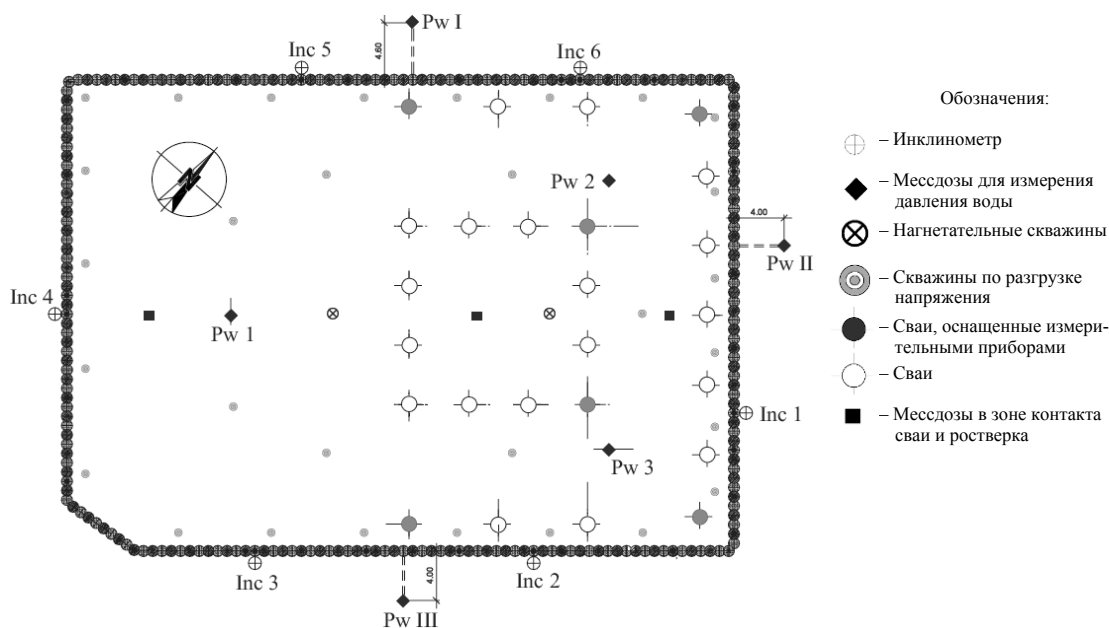


Рис. 2. План с местами расположения измерительных приборов

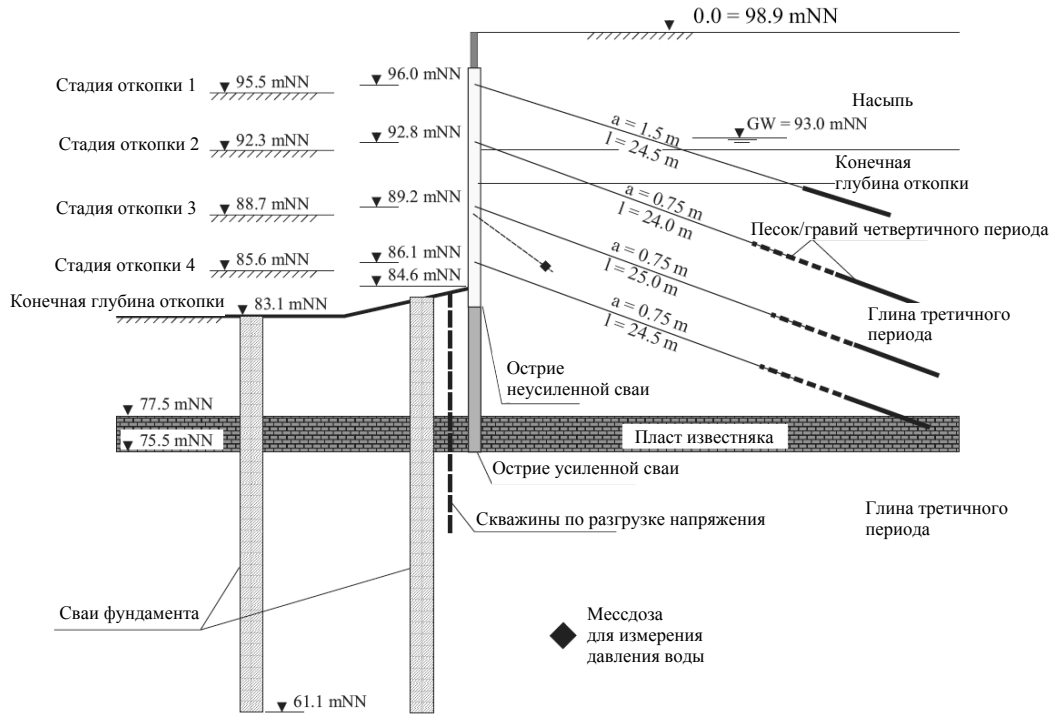


Рис. 3. План и размеры котлована

проводился конечноэлементный анализ, включавший вычисление гидравлических параметров и деформаций. Грунт моделировался с использованием упругопластической модели упрочняющейся среды HSM Plaxis. Основным преимуществом данной модели является возможность разграничения начальных условий нагружения и процесса разгрузки – повторного нагружения. В этой модели жесткость грунта зависит от траектории нагружения и уровня прикладываемых напряжений. В рамках данной работы параметры дренированного грунта использовались для изучения долгосрочного поведения укрепленного грунта во время откопки котлована. Но для проектирования необходима проверка как долгосрочного, так и краткосрочного поведения.

Для получения надежных расчетов, описывающих работу системы подпорных конструкций, применяемых при откопке котлована, проводили как традиционные грунтовые изыскания, так и обширные полевые испытания. На образцах франкфуртской глины ненарушенной структуры выполняли серию

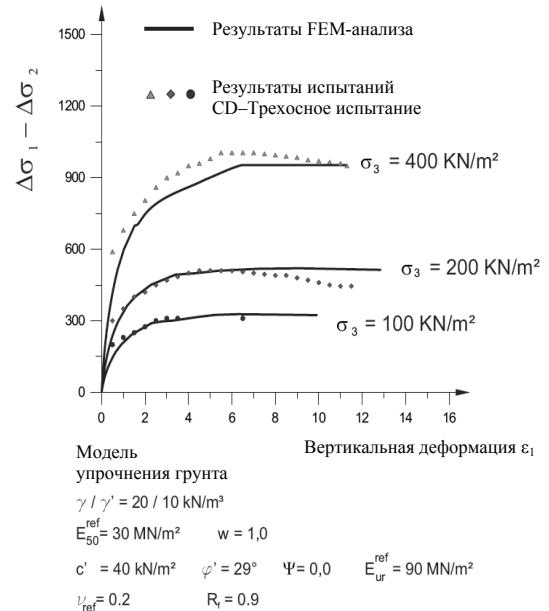


Рис. 4. Обратные расчеты для трехосных испытаний на образцах франкфуртской глины ненарушенной структуры

испытаний на трехосное сжатие. Сравнение результатов трехосных испытаний, а также

численного моделирования с использованием модели упрочнения грунта позволяет вывести применяемую модель (рис. 4). El-Mossallamy & Stahlmann (1999) показали, что модель упрочнения грунта исключительно реалистично описывает проблемы, возникающие при откопке котлована, прежде всего благодаря возможности рассматривать пластические деформации, так как в данном случае касательные напряжения находятся ниже поверхности разрушения Мора-Кулона (сдвиговое упрочнение).

На основе результатов лабораторных и полевых испытаний, а также опыта осуществления подобных проектов были определены необходимые параметры грунта для различных видов применяемых материальных управлений (табл. 1, 2).

Таблица 1

**Геотехнические параметры**  
(модель упрочнения грунта)

Параметр грунта	Насыпь	Четвертичный песок/гравий	Переуплотненная глина
$E_{50}^{ref}$ , МН/м <sup>2</sup>	20	30	35
$E_{ur}^{ref}$ , МН/м <sup>2</sup>	50	75	105
$\nu_{ur}$	0,2	0,2	0,2
$m$	0,5	0,5	1,0
$R_f$	0,9	0,9	0,9
$\gamma/\gamma'$ , кН/м <sup>3</sup>	18/8	19/11	20/10
$k_x$ , м/с	$10^{-3}$	$10^{-3}$	$2,5 \times 10^{-5}$
$k_y$ , м/с	$10^{-3}$	$10^{-3}$	0,01 $k_x$
$c'$ , кН/м <sup>2</sup>	-	-	20
$\phi'$ , град	30	35	20
$K_0$	0,5	0,43	0,8

Обозначения:  $E_{50}^{ref}$ ,  $E_{ur}^{ref}$  – жесткость при первичном нагружении и при разгрузении/повторном нагружении;  $\nu_{ur}$  – коэффициент Пуассона при разгрузении/повторном нагружении;  $m$  – степень в соотношениях жесткости;  $R_f$  – коэффициент разрушения;  $\gamma/\gamma'$  – общая/эффективная удельная масса грунта;  $k_x$ ,  $k_y$  – коэффициент фильтрации в горизонтальном и вертикальном направлениях;  $c'$  – сцепление;  $\phi'$  – угол внутреннего трения;  $K_0$  – коэффициент давления грунта в состоянии покоя.

Таблица 2

**Геотехнические параметры**  
(модель Мора-Кулона)

Параметр грунта	Известняк
$E$ , МН/м <sup>2</sup>	750
$\nu$	0,3
$\gamma/\gamma'$ , кН/м <sup>3</sup>	20/10
$k_x$ , м/с	$10^{-3}$
$k_y$ , м/с	$10^{-3}$
$c'$ , кН/м <sup>2</sup>	200
$\phi'$ , град	35

Элементы конструкции: сваи ( $E_{бет} = 30000$  МН/м<sup>2</sup>,  $\nu = 0,2$ ); растяжки арматуры ( $E_{ст} = 195000$  МН/м<sup>2</sup>).

Для FEM-анализа плоских деформаций использовались изопараметрические треугольные элементы с 15 узлами. На рис. 5 показана применяемая сетка конечных элементов. Стена из буронабивных свай моделировалась как линейный упругий материал. Анкер моделировался с использованием специального элемента, воспринимающего лишь усилия растяжения и не имеющего изгибной жесткости. Участок со свободной длиной анкера моделировался как тросовый элемент с узлами, на который воздействовали лишь осевые усилия.

Поскольку на поведение грунта значительное влияние оказывает история нагружения, моделировались следующие стадии строительства:

1. Начальные напряжения.
2. Сооружение стены из буронабивных свай.
3. Первая фаза откопки.
4. Установка и предварительное нагружение первого анкера.
5. Вторая фаза откопки и анализ фильтрации с учетом гидравлических условий грунта, стены и скважин по разгрузке напряжения.
6. Установка и предварительное нагружение второго анкера.
7. Третья фаза откопки и анализ фильтрации.
8. Установка и предварительное нагружение третьего анкера.
9. Четвертая фаза откопки и анализ фильтрации.
10. Установка и предварительное нагружение четвертого анкера.
11. Пятая фаза откопки для достижения конечной глубины котлована и анализ фильтрации.

В рамках данной статьи представлены результаты лишь завершающей стадии строительства.

На рис. 6 приводится сравнение между вычисленными и измеренными горизонтальными смещениями стены из буронабивных свай. Для изучения влияния различных параметров проводились расчеты при следующих условиях:

1. Не рассматривалось влияние известнякового пласта и свай фундамента.

2. Учитывалось только влияние известнякового пласта.

3. Рассматривается влияние известнякового пласта и свай фундамента.

Вычисленные величины осадок рядом с откапываемым котлованом сравнивали с измеренными осадками зданий, расположенных в непосредственной близости от Японского центра (рис. 7). В основном наблюдалось хорошее соответствие между рассчитанными и измеренными осадками. Как видно из рис. 7,

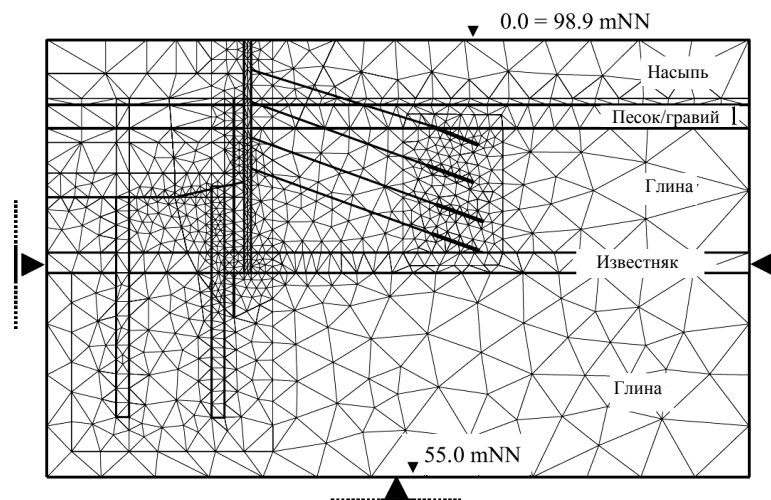


Рис. 5. Сетка конечных элементов

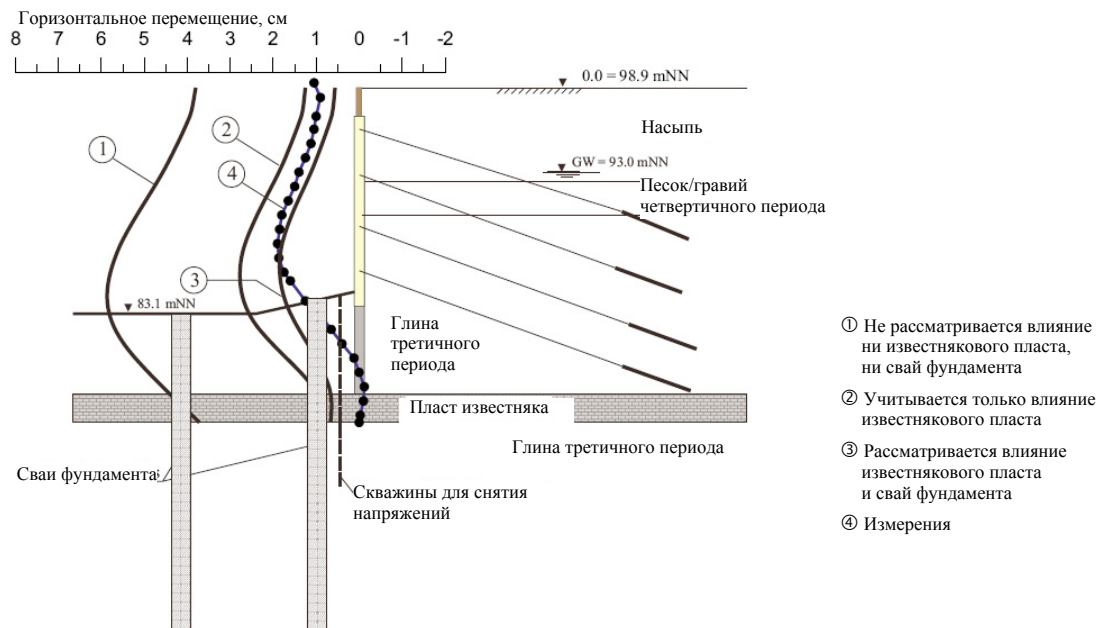


Рис. 6. Сравнение вычисленных и измеренных величин горизонтальных смещений подпорной стены, используемой при откопке котлована

откопка котлована влияла на деформацию зданий, находящихся на достаточно большом расстоянии от нового сооружения. Прежде

всего это происходит из-за увеличения эффективных напряжений грунта в результате активизации фильтрационного давления.

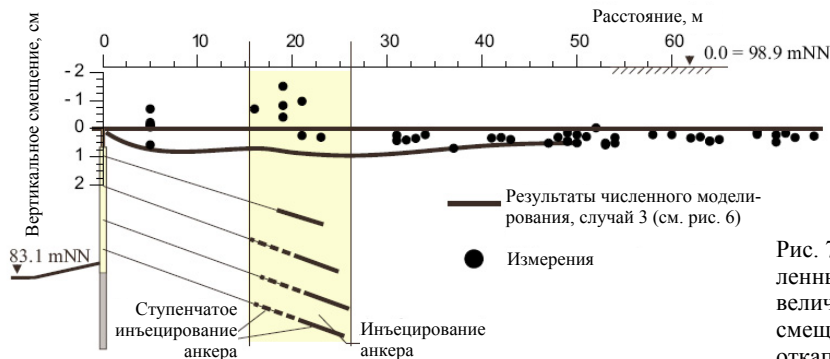


Рис. 7. Сравнение вычисленных и измеренных величин вертикальных смещений за пределами откапываемого котлована

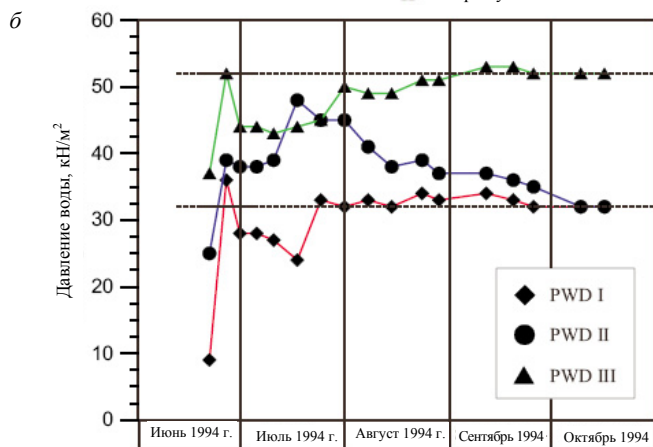
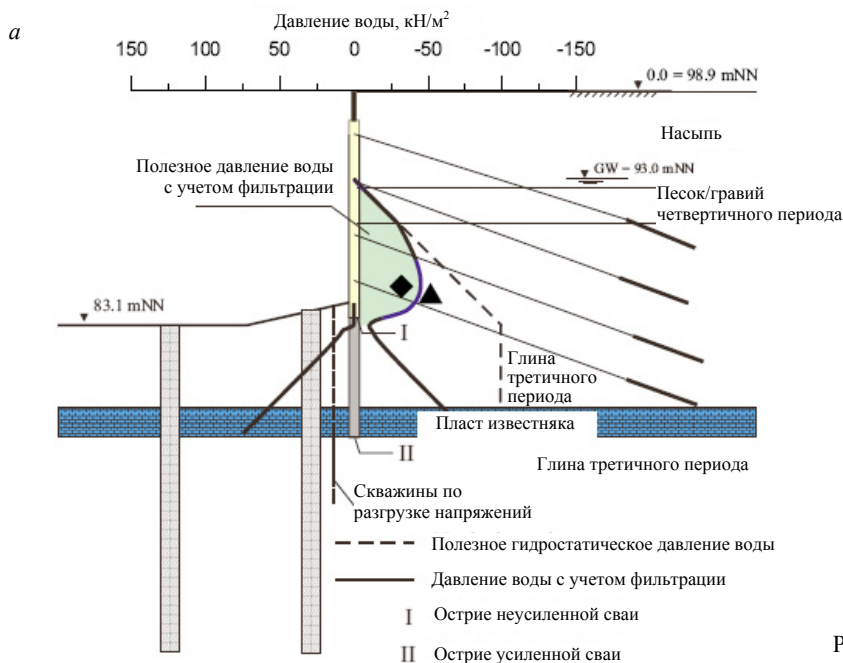


Рис. 8. Распределение давления воды на подпорную стену во время откопки котлована: а – распределение давления воды; б – измеренные величины давления поровой воды

Также наблюдалось пучение грунта (особенно в области корней анкеров), что обусловило различие между вычисленными и измеренными осадками. Это объясняется воздействием относительно высокого давления, прикладываемого при инъецировании анкера в ходе его установки и повторного инъецирования через день после установки, которое не учитывалось при численном моделировании.

На процесс проектирования и напряжен-

но-деформированное состояние такой водонепроницаемой подпорной конструкции значительное влияние оказывает давление воды. При традиционном анализе в большинстве случаев давление воды рассматривается как гидростатическое. Однако с учетом фильтрации реальное давление воды на подпорную стену меньше гидростатического (рис. 8).

Результаты моделирования методом конечных элементов показывают, что, если при

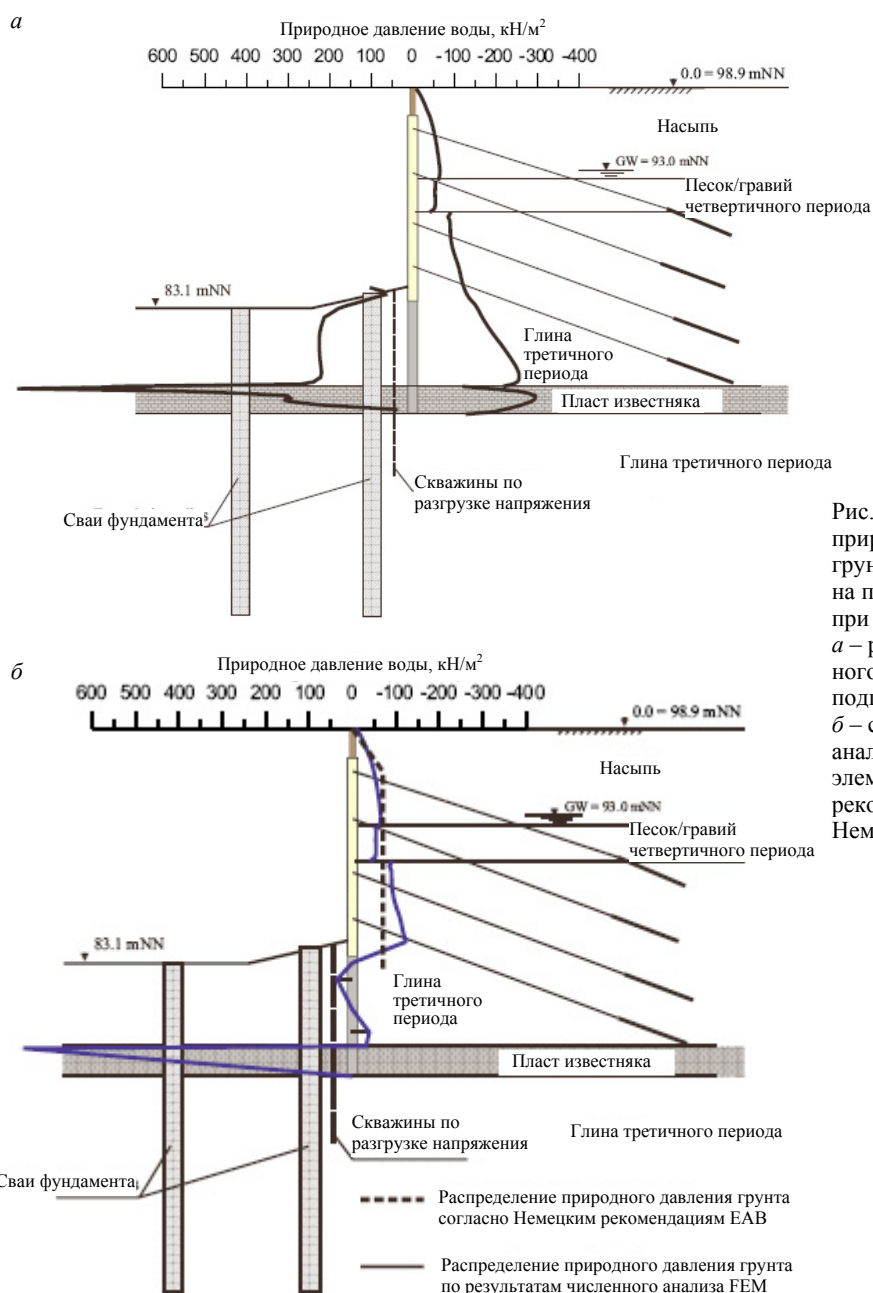


Рис. 9. Распределение природного давления грунта, воздействующего на подпорную стену при откопке котлована: а – распределение природного давления грунта на подпорную стену (FEM); б – сравнение результатов анализа методом конечных элементов и величин, рекомендуемых Немецкими ЕАВ

анализе принимать во внимание фильтрацию, а также гидравлические условия (ступенчатое распределение длин свай и установку скважин для снятия напряжения), то это значительно уменьшает давление воды на стену. Следовательно, можно получить гораздо более экономичный проект с точки зрения глубины заложения стены, внутренних напряжений в стене и усилий на анкер. Измеренные величины давления воды за стеной (см. рис. 8, б) колеблются от 32 до 54 кН/м<sup>2</sup> и хорошо согласуются с вычисленными величинами. Данное наблюдение подчеркивает преимущества использования ступенчатой длины свай для уменьшения давления воды на стену и улучшения напряженно-деформированного состояния системы.

На рис. 9,а показано распределение давления грунта на стену по результатам FEM-

анализа; на рис. 9,б – полезное давление грунта. Далее для сравнения приводится распределение давления грунта на стену вплоть до нулевой точки нагружения согласно Немецким рекомендациям по откопке котлованов (EAB). Результаты сравнения свидетельствуют о хорошем соответствии рекомендуемых величин с полученными при анализе методом конечных элементов, где природное давление грунта является выходным параметром анализа, а распределение давления грунта по классической схеме рассматривается как входной параметр прилагаемой нагрузки. Важной чертой классического проектирования является выбор способа распределения природного давления грунта для получения более надежного проекта стены. Величины, предлагаемые Немецкими рекомендациями EAB, представляются достаточно обоснованными.