



## Испытания грунтов методом статического зондирования

**Г.Г. БОЛДЫРЕВ**

Директор по науке и инновациям ООО «НПП Геотек», д.т.н., проф.,  
g-boldyrev@geotek.ru

**А.В. МЕЛЬНИКОВ**

Инженер-исследователь ООО «НПП Геотек», к.т.н.,  
alexvmuller@gmail.com

Метод испытаний грунтов статическим зондированием широко применяется как в отечественной, так и в зарубежной практике инженерно-геологических изысканий. В России стандартизирован метод испытания электрическим зондом (ГОСТ 19912). В США испытания выполняются в соответствии с требованиями стандарта ASTM D 5778. В странах Европейского Союза – в соответствии с требованиями Еврокод 7 часть 2 (EN 1997-2).

Применение метода СРТ имеет ряд преимуществ по сравнению с другими традиционными методами в связи с быстротой проведения испытаний, возможностью их повторения и экономичностью. Это приводит к устойчивому росту использования метода во многих странах мира, в том числе и в России. Основным преимуществом метода является возможность получения в реальном режиме времени информации о мощности слоев грунта и его виде. К недостаткам следует отнести



Рис. 1. Комплект СРТ зонда: 1 – ноутбук; 2 – блок электроники; 3 – дальномер с кабелем; 4 – зонд; 5 – вилка и оголовник; 6 – кабель зонда

### ЧИТАЙТЕ В НОМЕРЕ:

**Рассказ о современных геофизических методах**

М.В. Рогачев

**7**

**Преодолеть технологическое отставание**

В.В. Приклонский

**12**

**Инженерно-геологическая оценка состояния литотехнических систем историко-культурных сооружений для обоснования их мониторинга**

В.А. Королёв, Н.В. Кузнецова

**21**

**Торжественная церемония награждения победителей профессионального конкурса НОПРИЗ на лучший инновационный проект 2016 года**

**25**

ти невозможность проведения испытаний в плотном песке, гравелистых и твердых глинистых грунтах. Однако основным недостатком данного метода является необходимость применения корреляционных зависимостей между результатами зондирования и данными лабораторных испытаний образцов грунта. Имеющиеся многочисленные корреляции можно применять лишь как оценочные значения на стадии проектного задания. Данная проблема легко устранима путем привязки известных корреляционных зависимостей к региональным инженерно-геологическим условиям.



Рис. 2. Тензометрические элементы и плата электроники зонда

Кроме того, следует отметить как недостаток высокую стоимость оборудования, высокие требования к квалификации оператора, необходимость постоянной калибровки датчиков и водонасыщение пористых фильтров.

Электрический/тензометрический зонд (СРТ) и пьезозонд (СРТu) наиболее часто применяются на практике вследствие простоты метода испытаний и экономичности. Возможность быстрого повторения испытаний, анализ большого коли-

чества данных и разработка собственных региональных корреляционных зависимостей также являются привлекательными для его широкого применения на практике. Следует отметить, что в России пока нет стандарта для испытаний грунтов пьезозондом.

ООО «НПП Геотек» разработало конструкцию зонда типа СРТ, комплект которого показан на рисунке 1. Зонд данной модификации предназначен для проведения статических испытаний дисперсных природных и техногенных грунтов по ГОСТ, ASTM D5778, BS EN ISO 22476-1. Основные решаемые задачи: комплексная оценка физико-механических свойств грунтов в соответствии с СП 47.13330.2012 и выделение инженерно-геологических элементов.

Зонд обеспечивает измерение удельного сопротивления грунта под конусом  $q_c$  и муфте трения  $f_s$ , угол наклона оси зонда к вертикали. Частота протоколирования 3 Гц позволяет выполнять измерения параметров зондирования через каждые 7 мм по глубине при

Обозреватель протоколов [v1.0-71-g04a7046]

Файл Вид Сервис [НПП Геотек]

Оперативный фильтр: не задано

Идентификатор заказа:

Набор фильтров: Создать... Удалить Свойства

Протоколы испытаний АСИС

- Статическое зондирование
- Испытания штампом

Свойства протокола: Общие Данные Экспресс-отчет

Таблица: Test Фильтр: Пенетрация В буфер обмена Отбраковать

Время от [Time]	Дейст [Actio]	Изменения в с [ActionChange]	Вертикальное полож [dalnomer]	Вертикальный [angle1]	Вертикальный уг [angle2]	Вертикальная на [fs]	Вертикальная нагр [qc]
21.97			0.345	-3.3	3.4	0.3	0.099
22.2			0.346	-3.3	3.4	0.3	0.099
22.27			0.348	-3.3	3.4	0.3	0.099
22.36			0.351	-3.3	3.4	0.3	0.099
22.56			0.351	-3.7	3.3	0.3	0.099
22.63			0.352	-3.7	3.3	0.3	0.099
22.71			0.355	-3.7	3.3	0.3	0.099
22.79			0.357	-3.7	3.3	0.3	0.099
23.03			0.359	-3.7	3.3	0.3	0.099
23.12			0.361	-3.8	2.6	0.3	0.108
23.19			0.364	-3.8	2.6	0.3	0.108
23.43			0.365	-3.8	2.6	0.3	0.108
23.55			0.367	-3.8	2.6	0.3	0.108
23.6			0.37	-3.8	2.6	0.3	0.108
23.71			0.37	-3.7	1.5	0.3	0.122
23.81			0.377	-2.7	1.5	0.3	0.122

Создан Код Наименование алгоритма

11:06:2016	ПТ 1.4.3	Статическое зондирование
11:06:2016	ПТ 1.4.3	Статическое зондирование
12:06:2016	ПТ 1.4.3	Статическое зондирование
13:06:2016	ПТ 1.4.3	Статическое зондирование
13:06:2016	ПТ 1.4.3	Статическое зондирование
14:06:2016	ПТ 1.4.3	Статическое зондирование
14:06:2016	ПТ 1.4.3	Статическое зондирование
15:06:2016	ПТ 1.4.3	Статическое зондирование

Показывать протоколов: Все Показано 57 проток

Сканировать Индексирование успешно завершено. Добавлено 0; нет на диске 0; всего 57.

Рис. 3. Окно просмотра данных протоколирования

постоянной скорости погружения 20 мм/с. Измерение глубины зондирования выполняется в полностью автоматическом режиме с помощью дальномера. Имеются два варианта дальномера: 1) при использовании вращателя буровой установки в качестве задавливающего устройства и 2) при использовании специализированного задавливающего устройства для статического зондирования. Варианты отличаются исполнением и длиной троса дальномера. Возможен также вариант комплекта статического зондирования без дальномера. В этом случае через заданные интервалы глубины (смотрятся по рискам штанг) необходимо нажимать кнопку на портативном компьютере.

В комплект входит необходимое количество штанг статического зондирования. Для погружения зондировочных штанг буровыми установками типа ПБУ, УГБ, УБШМ используется наголовник Ш-55, соединение – шестигранник 55. Для погружения буровыми установками типа УРБ-2А2 с присоединительной резьбой 3-50 используется наголовник 3-50. Вся «электроника» размещена внутри самого зонда (рис. 2). Благодаря этому на поверхность по кабелю идёт цифровой сигнал по RS-485, который не подвержен искажениям на длинном кабеле, в отличие от аналогового сигнала.

Считывание параметров зондирования и их протоколирование

выполняются автоматически программой АСИС-4. Графики зондирования строятся в режиме онлайн на экране компьютера, все результаты измерений записываются в файл протокола. Для работы с протоколом испытания используется специальный программный модуль, входящий в состав ПО АСИС 4. В рабочем окне отображается список протоколов всех испытаний, выполненных в алгоритме «Статическое зондирование». Ненужные протоколы можно выделить и нажать кнопку «Отбраковать» для исключения из текущего окна просмотра, либо кнопку «Удалить» для окончательного удаления файлов протокола. В модуле присутствует возможность фильтрации

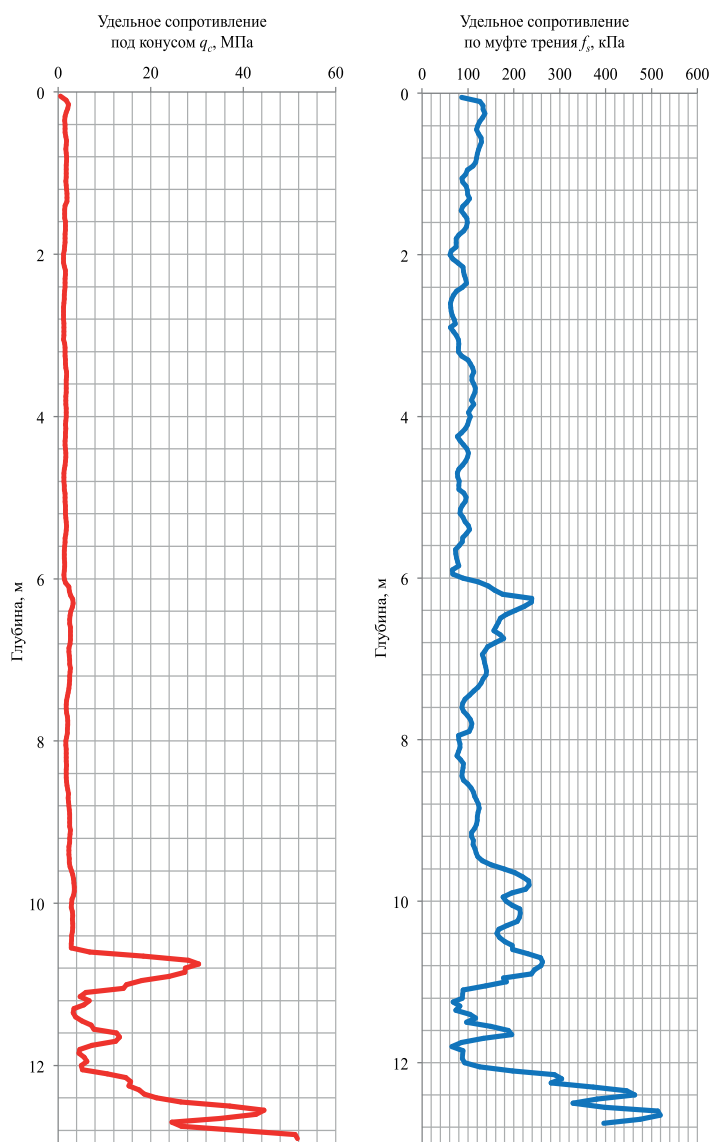


Рис. 4. Основные параметры зондирования

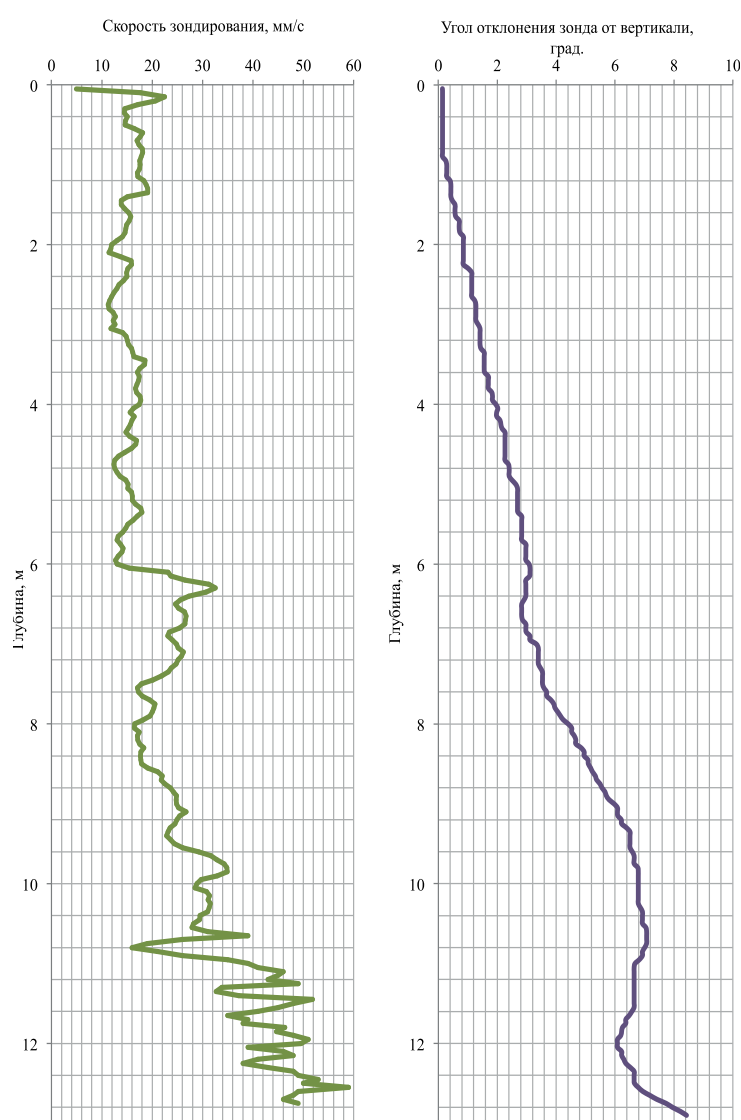


Рис. 5. Параметры зондирования

результатов испытаний по произвольному признаку, задаваемому пользователем.

Данные из обозревателя протоколов могут быть скопированы в любую стороннюю программу обработки, в том числе в прилагаемый к оборудованию шаблон в MS Excel. Такой шаблон (см. рисунки ниже) позволяет не только получить отчет об испытаниях, но и легко его редактировать в случае не-

обходимости. Отчет содержит в себе информацию о площадке, точке зондирования, исполнителе, графики основных и контрольных параметров зондирования, классификацию по диаграмме Robertson P.K. (см. Болдырев, 2013; Lunne et al., 1997) с использованием функции типа грунта  $I_C$ .

Диаграмма Робертсона позволяет приближенно оценить степень переуплотнения грунта, чувстви-

тельность, жесткость, минералогический состав, пористость.

Измеренные показания усредняются в пределах выбранных пользователем интервалов глубины. Кроме того, добавлена возможность автоматизированного расчета  $\phi$ ,  $c$ ,  $E$  по рекомендованным в СП 47.13330.2012 таблицам и другим, в том числе зарубежным, источникам. Пользователь выбирает из выпадающего меню тип грунта и генетический тип, задает глубину залегания ИГЭ, вычисление характеристик происходит автоматически. В конце отчета приводится сводная таблица параметров зондирования. Результаты измерений могут усредняться с любым шагом по глубине. На рисунке 5 приведены параметры зондирования с усреднением каждые 20 см.

Достоверность измерений подтверждается сертификатом калибровки, выполненной в соответствии со специальной методикой и при использовании эталонных электронных динамометров.

### ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДАННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Результаты СРТ и СРТУ испытаний могут быть использованы для определения стратиграфии, классификации грунтов и определения свойств дисперсных и мягких скальных грунтов, если позволяет устройство нагружения и мощность зонда.

Результаты СРТ испытаний должны быть связаны с лабораторными испытаниями образцов грунта с целью корректировки известных или нахождения новых эмпирических зависимостей для параметров прочности и деформируемости (Мельников, 2015). В том случае, если результаты СРТ испытаний используются для классификации грунтов, классификация должна быть основана, как минимум, на значениях лобового сопротивления конуса, сил трения и коэффициента трения. Лучшая классификация получается из

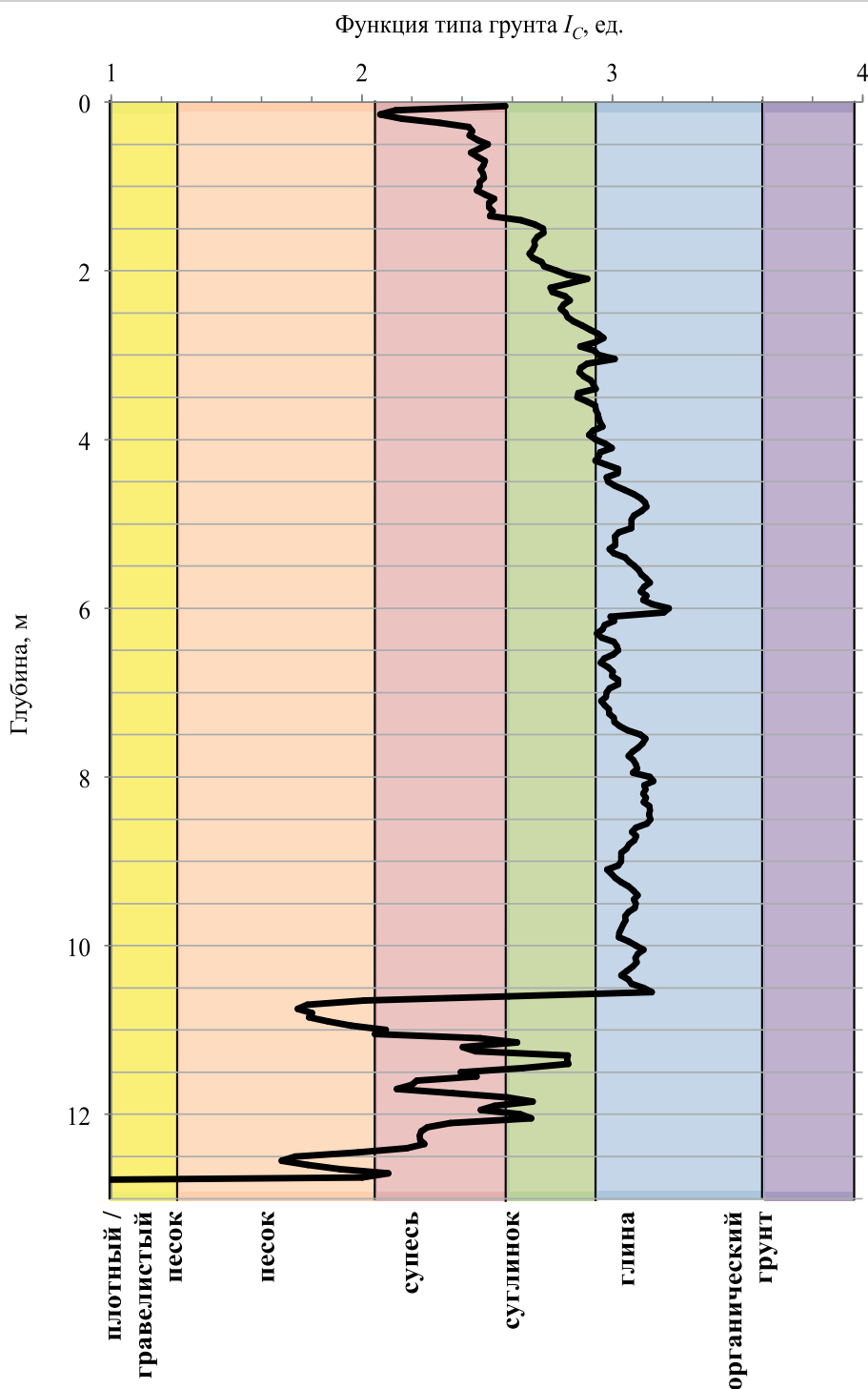


Рис. 6. Классификация грунта по параметру  $I_C$  (Lunne et al., 1997)

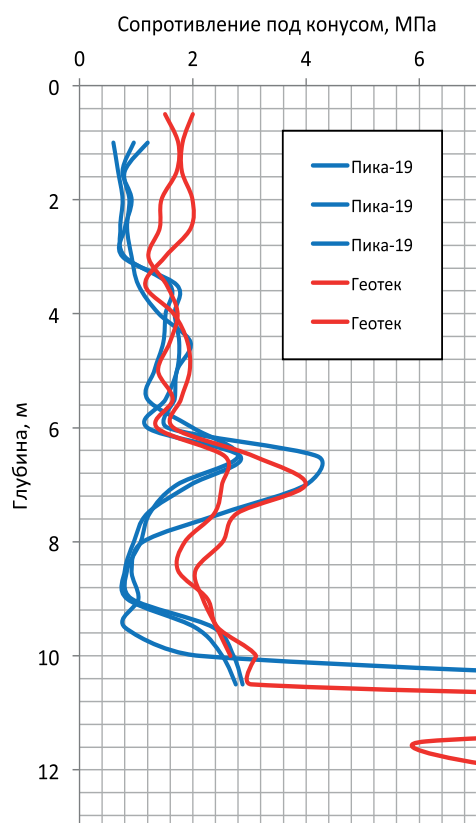


Рис. 7. Удельное сопротивление под конусом

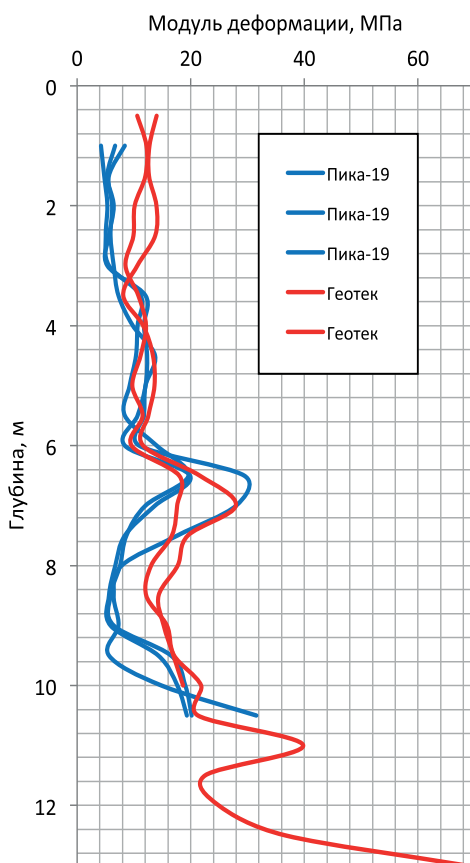


Рис. 8. Определение модуля деформации

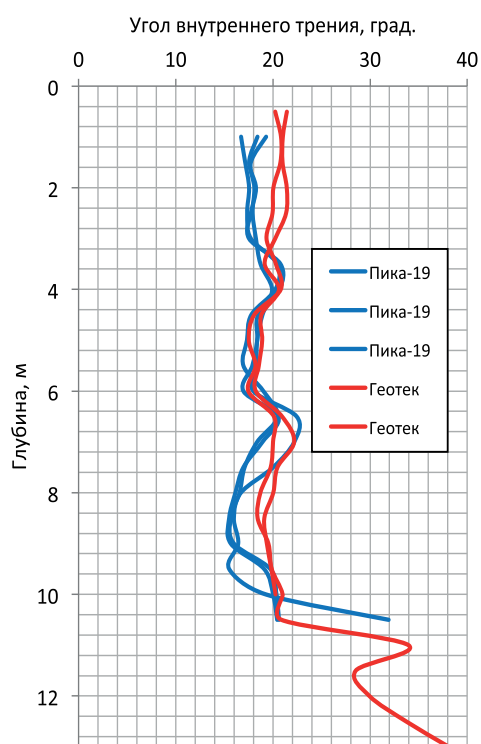


Рис. 9. Определение угла внутреннего трения

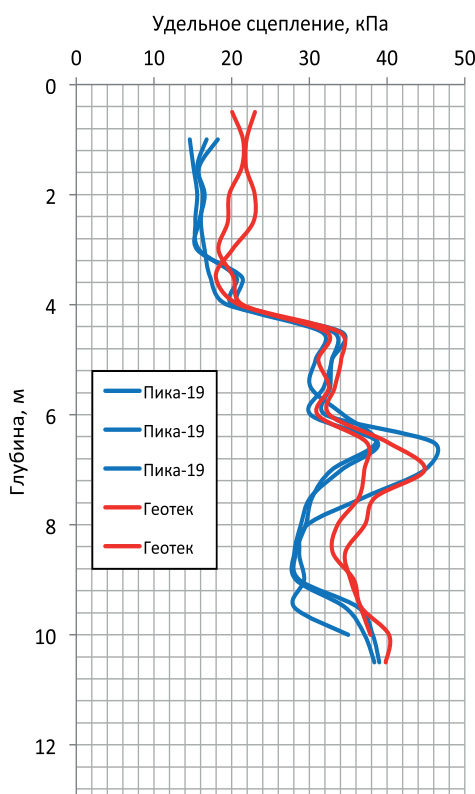


Рис. 10. Определение сил удельного сцепления

СРТУ — испытаний с использованием значения полного сопротивления конуса, избыточного порового давления и коэффициента порового давления.

Определение прочностных и деформационных характеристик грунтов по данным статического зондирования выполняется с использованием корреляционных зависимостей, находимых путем статистического анализа параметров зондирования и лабораторных испытаний. Известные зависимости дают удовлетворительное совпадение для песчаных грунтов и значительно хуже для глинистых грунтов. Для примера, ниже приведено несколько подобных зависимостей.

Давление предварительного уплотнения может быть найдено из следующей эмпирической зависимости (Мауне, 2007):

$$\sigma'_p = 0,305(q_t - \sigma_{vo}), \quad (1)$$

или

$$\sigma'_p = 0,65(q_t - \sigma_{vo})I_p^{-0,23}, \quad (2)$$

где  $I_p$  — число пластичности глинистого грунта.

Как было отмечено выше, приведенные эмпирические зависимости были получены для конкретных грунтовых отложений. Поэтому для иных грунтов необходимо провести лабораторные испытания, например, компрессионные, найти  $\sigma'_p$ , затем провести полевые испытания и ввести корректировку в уравнения (1) и (2).

Между результатами СРТ и дренированным углом внутреннего трения существует зависимость, вида (Lunne et al., 1997):

$$\varphi' = 13,5 \lg q_c + 23, \quad (3)$$

где  $q_c$  — лобовое сопротивление конуса, МПа.

Эта зависимость справедлива для песка выше уровня грунтовых вод и сопротивлении конуса в диапазоне 5–28 МПа.

Оценка механических характеристик грунтов

Условные обозначения		Расшифровка		Условные обознач.		Расшифровка																					
f		флювиогляциальные		a		аллювиальные																					
lg		озерно-ледниковые		Pg		покровные																					
llh		озерно-болотные		g		моренные																					
др Q4 (a,f)		другие четвертичные аллювиальные и флювиогляциальные		Q4		четвертичные																					
др Q4 (не a,f)		другие четвертичные, кроме аллювиальных и флювиогляциальных		Q3		третичные																					
др (не g)		другие, кроме ледникового комплекса		Q2		двоичные																					
Инженерно-геологические условия				СП 47.13330.2012		TCH 50-304-2001		Kulhawy и Mayne (1990), Lunne и Christophersen (1983)		Мельников (2015)		СП 47.13330.2012		TCH 50-304-2001		Robertson и Campanella (1983)		Kulhawy и Mayne (1990)		Robertson (2015)		СП 47.13330.2012		TCH 50-304-2001		Almeida (2010), Hong (2010), Remei (2013) и др.	
ИГЭ	Тип грунта	Генетический тип	Глубина залегания, м		E, МПа				φ, °				с, кПа		с <sub>и</sub> , кПа												
			Верх слоя	Низ слоя											от	до											
2	Суглинок	a-Q4		3.90	10.8	10.8	13.5	11.8	20.3	20.5				20	27	60	188										
3	Глина	a-Q4	3.90	6.00	10.5	10.5	23.3	10.8	17.8	20.5				32	26	56	176										
4	Глина	a-Q4	6.00	10.60	17.5	17.5	22.5	17.4	20.0	21.5				37	30	93	292										
5	Песок	a-Q4	10.60	12.90	36.9	50.9	50.3	57.9	34.5	38.6	39.0	33.6	29.1														

Горизонтальные напряжения по предложению Мэйна могут быть найдены из эмпирической зависимости следующего вида:

$$K_o = 0,1(q_t - \sigma_{vo}) / \sigma'_{vo}, \quad (4)$$

где  $\sigma'_{vo}$  — эффективное вертикальное напряжение от собственного веса грунта, а  $\sigma_{vo}$  — полное вертикальное напряжение от собственного веса грунта.

Более точно горизонтальные напряжения могут быть измерены прессиометром, динамометрическим зондом или дилатометром при проведении полевых испытаний. Они могут быть также найдены из лабораторных испытаний образцов грунта в приборе трехосного сжатия или компрессионном приборе с измерением боковых напряжений.

Выполнено большое количество исследований с целью связать значения одометрического модуля деформации с лобовым сопротивлением конуса. Общая зависимость имеет вид:

$$E_{oed} = \alpha q_c, \quad (5)$$

где  $q_c$  — измеренное значение лобового сопротивления конуса.

Величина коэффициента перехода  $\alpha$  зависит от вида грунта. ☞

ГОСТ 19912 для этих же целей рекомендует использовать табличные значения. Ниже в таблице приведены характеристики грунтов, найденные с использованием различных корреляционных зависимостей. Таблица является частью шаблона в Excel для обработки результатов испытаний статическим зондом, в ней характеристики рассчитываются для каждой точки измерений по глубине зондирования. Затем значения характеристик усредняются в диапазоне глубин залегания каждого ИГЭ, глубины верха и низа ИГЭ пользователь задаёт самостоятельно, ориентируясь на данные опорных скважин и результаты зондирования, в том числе параметр IC (рис. 6).

С целью оценки различных конструкций СРТ зондов были проведены сравнительные испытания зондами ООО «НПП «Геотек» (данные 2016 года) и ООО «НТЦ «ПИКА-ТЕХНОСЕРВИС»» Пика-19 (данные 2013 года). Результаты испытаний приведены на рисунках 7-10. По таблицам приложения И СП 47.13330.2012 были определены модуль деформации, угол внутреннего трения и сцепление грунтов. Графики указанных характеристик представлены на рисунках 8-10. Расчеты были выполнены автоматизировано в упомянутом ранее шаблоне Excel без усреднения результатов по ИГЭ. ☞

## ЛИТЕРАТУРА

- Болдырев Г.Г. Полевые методы испытаний грунтов (В вопросах и ответах). Саратов: Издательский центр «РАТА», 2013. С. 356.
- Мельников А.В, Болдырев Г.Г. Корреляционные уравнения оценки модуля деформации грунтов по результатам статического зондирования.
- Основания, фундаменты и механика грунтов, № 3, 2015. С. 2-7.
- Рыжков И.Б., Исаев О.Н. Статическое зондирование грунтов. Изд-во «Ассоциация строительных ВУЗов» («АСВ»). М. 2010, 496 с.
- ASTM D5778 – 12. Standard Test Method for Electronic Friction Cone and Piezocone Penetration Testing of Soils. 2012.
- Lunne T., Robertson P.K. and Powell J.J.M. Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice, New York. 1997, 352 p.
- Mayne P. W. Cone Penetration Testing State-of-Practice. Final Report. NCHRP Project 20-05. 2007. Topic.37-14. [http://geosystems.ce.gatech.edu/Faculty/Mayne/papers/NCHRP%20CPT%20Synthesis%20\(2007\)%20color.pdf](http://geosystems.ce.gatech.edu/Faculty/Mayne/papers/NCHRP%20CPT%20Synthesis%20(2007)%20color.pdf).