

ЧТО ТАКОЕ БУРОВОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ГРУНТОВ?

WHAT IS RUSSIAN DRILLING TESTING OF SOILS?

БОЛДЫРЕВ Г.Г.

Профессор кафедры геотехники и дорожного строительства Пензенского государственного университета архитектуры и строительства, директор по научной работе и инновациям ООО «НПП «Геотек»», д. т. н., г. Пенза, g-boldyrev@geotek.ru

BOLDYREV G.G.

Professor of the Geotechnics and Road Construction Department of the Penza State University of Architecture and Construction, director for research and innovation of the "Geotek" LLC research and production enterprise, Penza, g-boldyrev@geotek.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Инженерно-геологические изыскания; буровое зондирование; статическое зондирование; параметры зондирования; механическая мощность; удельная энергия; выделение слоев грунта.

АННОТАЦИЯ

В статье рассмотрена технология исследования грунтов методом бурового зондирования. Показана возможность использования при этом величин механической мощности и удельной энергии для выделения слоев грунта с различной прочностью.

KEY WORDS

Engineering-geological survey; Russian drilling testing (drilling sensing); cone penetration testing; sensing parameters; mechanical power; specific energy; singling out soil layers.

ABSTRACT

The article considers the soil investigation technology by the drilling sensing method. At that, the possibility of using values of the mechanical power and specific energy for singling out soil layers with various strengths is shown.

Инженерно-геотехнические изыскания как самостоятельный вид инженерных изысканий в России введен в 2006 году постановлением Правительства Российской Федерации № 20 от 19.01.2006 «Об инженерных изысканиях для подготовки проектной документации, строительства, реконструкции объектов капитального строительства».

Виды работ в составе инженерно-геотехнических изысканий определены в приказе Минрегиона России № 624 от 30.12.2009 «Об утверждении Перечня видов работ по инженерным изысканиям, по подготовке проектной документации, по строительству, реконструкции, капитальному ремонту объектов капитального строительства, которые оказывают влияние на безопасность объектов капитального строительства». В соответствии с этим приказом в составе инженерно-геотехнических изысканий выделяется не-

сколько видов работ, в том числе определение механических характеристик грунтов методами статического, динамического и бурового зондирования. Первые два метода известны и широко применяются в практике инженерно-геологических изысканий, Метод же бурового зондирования малоизвестен и не используется при определении механических характеристик грунтов и расчленении грунтовой толщи на отдельные слои (рис. 1, б).

Более широкое применение в отечественной и преимущественно в зарубежной практике находит метод статического зондирования (Cone Penetration Testing — CPT), который используется не только для расчленения грунтовой толщи на инженерно-геологические элементы (ИГЭ), но и для определения прочностных и деформационных характеристик грунтов [1–4, 8, 10]. При установлении механических характеристик грунта используются корреляцион-

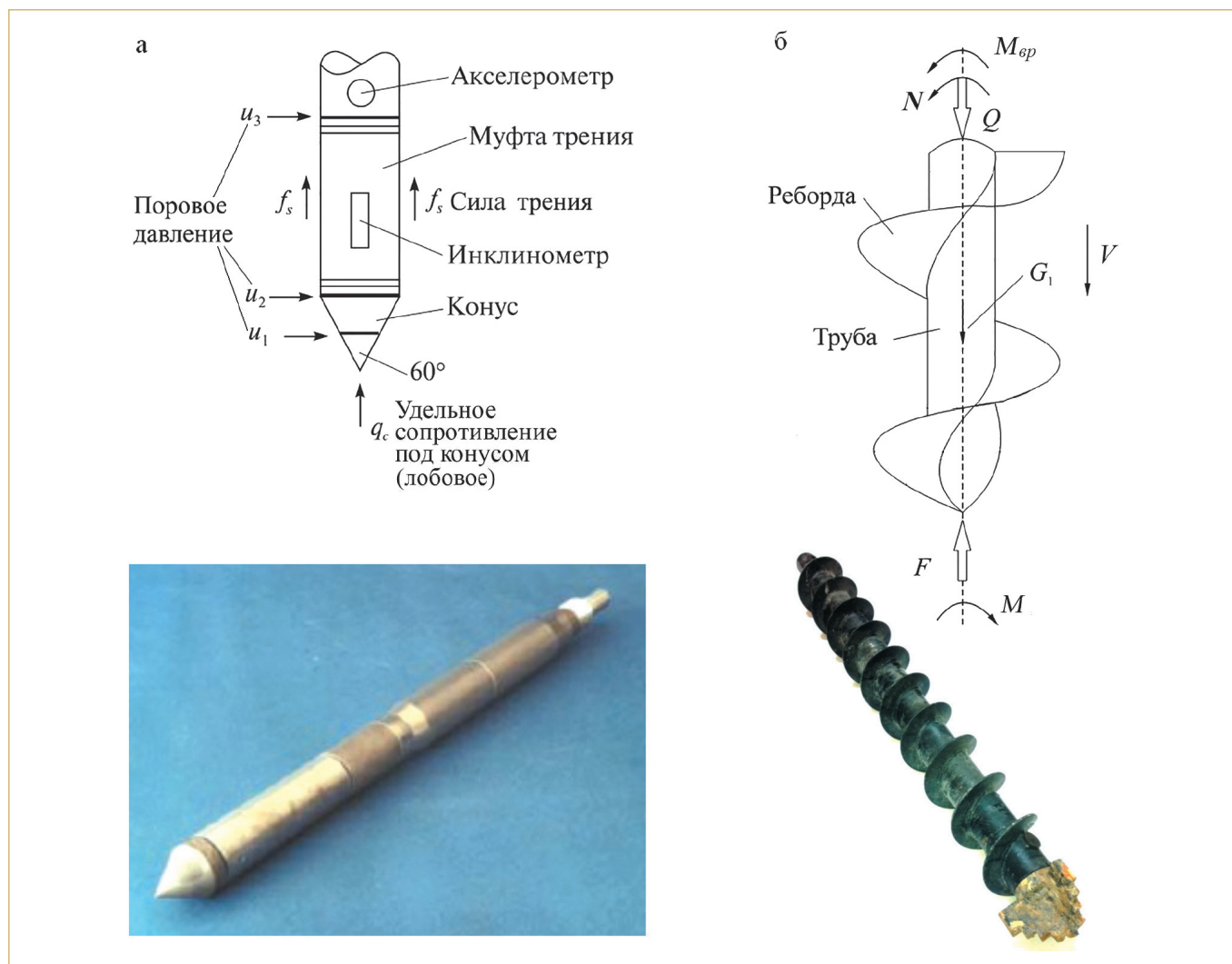


Рис. 1. Измеряемые параметры при статическом (а) и буровом (б) зондировании грунтов большинством наиболее распространенных зондов. Буквенные обозначения: $M_{вр}$ — крутящий момент в верхней части буровой колонны; N — частота вращения буровой колонны; Q — осевая нагрузка в верхней части буровой колонны; V — скорость перемещения буровой колонны; G_1 — вес буровой колонны с грунтом на ребрах; F — сила реактивного сопротивления грунта в забое скважины; M — крутящий момент в забое скважины

ные зависимости между параметрами, измеряемыми в процессе внедрения в него зонда, и данными его лабораторных испытаний [9]. Минимальный набор измеряемых параметров при выполнении СРТ: удельное сопротивление грунта под кончиком зонда (лобовое сопротивление) q_c , удельное сопротивление грунта по боковой поверхности (сила трения) f_s , поровое давление u . В зависимости от типа зонда поровое давление (u_1, u_2, u_3 — см. рис. 1, а) измеряется на одном из участков зонда. Отклонение зонда от вертикали измеряется встроенным инклинометром, а скорость поперечных волн в грунте — акселерометром. Последний применяется для определения упругого модуля сдвига. Используя параметры зондирования q_c, f_s, u и корреляционные уравнения, находят физические и механические характеристики грунтов (например, <http://www.novotechsoftware.com>, СП 47.13330). В некоторых зондах также имеются встроенная видеокамера, датчик сопротивления, датчик гамма-излучения.

Несмотря на ряд преимуществ статического зондирования по сравнению с другими полевыми методами испытаний и его широкое использование на протяжении последних 45 лет, оно неприменимо в мерзлых (за исключением пластичномерзлых) [4, 8] и скальных грунтах. При исследовании песчаных и гравелистых грунтов или на больших глубинах возможности метода СРТ также ограничены, так как в этих случаях требуется использование более прочных зондов и машин с большой собственной массой (для чего обычные автомашины утяжеляют добавочными грузами из монолитного бетона или стальных пластин или выполняют анкеровку буровой установки).

Более перспективным методом полевых исследований свойств грунтов является, по мнению автора, метод бурового зондирования (Russian Drilling Testing — RDT) [1–3, 6, 7]. В отличие от статического зондирования он применим не только в глинистых и песчаных, но и в крупнообломочных, скальных и мерзлых грунтах.

Под буровым зондированием понимается исследование свойств и стратиграфии грунтов путем измерения и интерпретации параметров бурения (см. рис. 1, б) — крутящего момента $M_{вр}$, осевой нагрузки погружения и подъема буровой колонны Q , веса буровой колонны с грунтом на ребордах шнеков G_1 , частоты N или угловой скорости ω ее вращения, скорости ее осевого перемещения V . По этим данным вычисляются сила лобового сопротивления F и крутящий момент в забое скважины M .

К сожалению, в СП 47.13330 нет никаких указаний по использованию метода бурового зондирования, несмотря на его отмеченное выше включение в список видов работ и на пункт 6.3.5 этого СП, в котором говорится о том, что применение шнекового и вибрационного бурения с отбором монолитов допускается при обосновании в программе инженерных изысканий методов их отбора (а, например, в США имеется стандарт на отбор монолитов при бурении полым шнеком — ASTM D 6151 [5]). Согласно приложению Г части IV СП 11-105-97 «Правила производства работ

в районах распространения многолетнемерзлых грунтов» при инженерно-геологических изысканиях в криолитозоне рекомендуются колонковый, ударно-канатный и вибрационный способы бурения мерзлых грунтов, а бурение шнеком не указывается. Но это не значит, что метод бурового зондирования нельзя применять в данных грунтах. Надо внедрять в практику изысканий новые технологии и изменять существующие стандарты. Однако неоднократные обращения автора данной статьи в Национальное объединение изыскателей (НОИЗ) и после этого в Национальное объединение проектировщиков и изыскателей (НО-ПРИЗ) отклика не получили.

Также буровое зондирование позволяет прямым методом, без использования корреляционных зависимостей, определять модуль деформации грунта и силу сопротивления сдвигу [1, 3]. В то же время, применяя корреляционные зависимости, можно находить и другие характеристики грунтов, как и в случае статического зондирования. Естественно, как и все новые технологии изысканий, данный метод требует тщательной проверки и апробирования в различных грунтовых условиях, что выполняется в настоящее время сотрудниками ООО «НПП «Геотек»».

Метод бурового зондирования включает измерение ряда параметров в процессе бурения скважины сплошным или полым шнеком, которые приведены в таблице.

Одним из вычисляемых параметров бурового зондирования является механическая мощность вращательной нагрузки в забое скважины A (кДж/с), характеризующая работу, затрачиваемую в единицу времени при бурении скважины:

$$A = M \cdot 2\pi N, \quad (1)$$

где M — крутящий момент в забое скважины, Н·м; N — частота вращения бурового инструмента, с⁻¹.

Показатель A был впервые применен в ПНИИИС в 1989 году с целью выделения мощности слоев с различной прочностью при исследованиях в Монголии, по результатам

Таблица

Параметры, измеряемые при буровом зондировании с использованием сплошного или полого шнека

Параметр	Размерность	Диапазон	Точность, % от диапазона
Крутящий момент	кН·м	0–0,5	1,0
Усилие подачи	кН	0–50	1,0
Усилие подъема/вес буровой колонны с грунтом на ребордах	кН	0–50	1,0
Частота вращения	об./мин.	0–300	1,0
Глубина	м	0–30	0,5
Отклонение от вертикали	град.	0–10	0,5

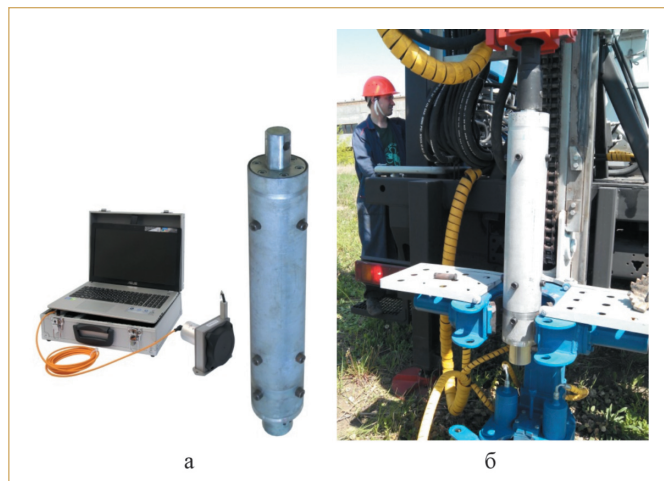


Рис. 2. Комплект для испытаний методом бурового зондирования (а) и подготовка к работе устройства для бурового зондирования (б) (www.npp-geotek.com)

которых был составлен отчет¹. Позднее, в работах [1, 3] была показана возможность применения данного метода не только для выделения инженерно-геологических элементов, но и для определения модуля деформации.

В 1965 году Р. Тиль [11] предложил использовать для контроля процесса бурения такой параметр, как удельная энергия E (кДж/м³), под которой понимается работа, необходимая для пробуривания единичного объема грунта:

$$E = Q/S + 2\pi \cdot M \cdot N/S \cdot V, \quad (1)$$

где Q — осевая сила, приложенная к инструменту в забое скважины, кН/м; S — площадь поперечного сечения скважины, м²; M — крутящий момент бурового инструмента, кН·м (принимаемый равным моменту по верху буровой колонны $M_{вр}$); N — частота вращения, с⁻¹; V — скорость поступательного движения бурового инструмента, м/с.

Показатель E используется для оптимизации скорости погружения буровой головки в грунт при проходке глубинных вертикальных, наклонных и горизонтальных скважин. Скорость погружения бурового инструмента зависит от нескольких факторов, в том числе от нагрузки на инструмент, скорости его вращения, градиента давления в забое скважины, давления бурового раствора, прочности породы и др. Однако в области инженерно-геологических изысканий показатель E практически не используется, несмотря на то что также выполняется бурение скважин, но только меньшей глубины.

Преимущество бурения полыми шнеками заключается в том, что одновременно с ним можно отбирать монолиты грунта для лабораторных испытаний с целью нахождения корреляционных связей между параметрами, измеренными

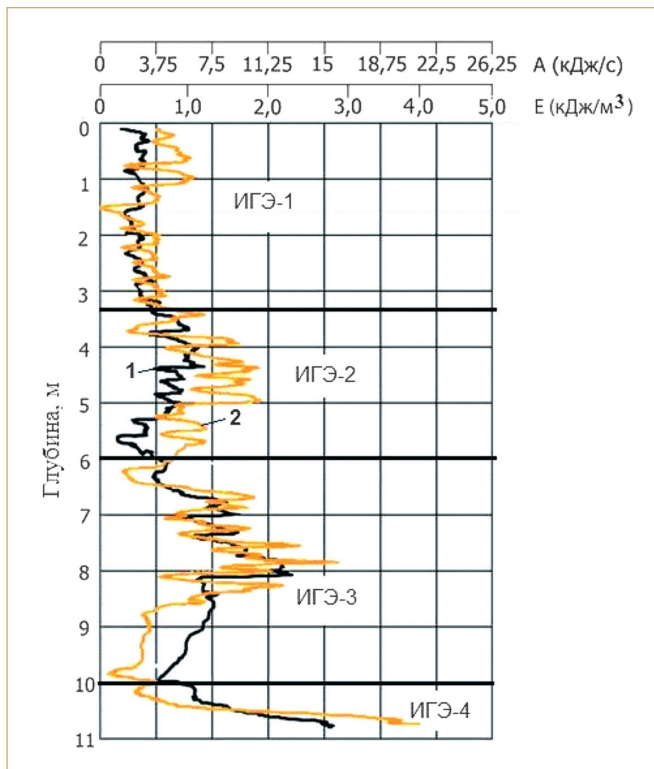


Рис. 3. Графики бурового зондирования (A — механическая мощность; E — удельная энергия)

при буровом зондировании и при тестировании в лаборатории. Технология отбора монолитов при бурении полыми шнеками применяется, например, в США [5]. Объединение процессов зондирования бурением и отбора монолитов исключает проходку дополнительных скважин с целью отбора проб, что неизбежно при исследованиях грунтов методом статического зондирования.

Исследования грунтов методом бурового зондирования проводятся следующим образом. В стандартный патрон вращателя бурового станка вставляется устройство для измерения параметров бурения, конструктивно выполненное в виде цилиндра с шестигранными хвостовиками по его торцам (рис. 2). Это устройство может быть установлено на любых буровых станках, включая малогабаритные. Одним концом оно соединяется с приводом бурового станка, а ко второму присоединяется первое звено сплошного или полого шнека. Устройство включает датчики для измерения параметров бурения, перечень которых приведен в таблице. Сигналы с датчиков усиливаются, преобразовываются в цифровой вид и по беспроводной связи передаются на компьютер. Датчик перемещений, при помощи которого контролируется глубина бурения, соединен проводной связью с одним из СОМ-портов² компьютера. Ком-

¹ Зянгиров Р.С., Афонин А.П., Кальбергенев Р.Г. и др. Научные исследования по оценке механических свойств грунтов хвостохранилища ГОК «ЭРДЭНЭТ» в МНР полевыми и лабораторными методами. М.: НПО «Стройизыскания», ПНИИИС, 1989. 137 с.

² СОМ-порт (communications port), или последовательный порт, — двунаправленный последовательный интерфейс, который предназначен для обмена байтовыми данными. — *Ред.*

пьютер располагается в кабине или на шасси автомашины. Устройство для измерения параметров бурения работает автономно без участия бурового мастера. Измеряемые параметры автоматически записываются в базу данных компьютера. При необходимости контроля показания датчиков можно выводить на экран компьютера. Предусмотрена также возможность отображения на дисплее профилей изменений параметров бурения с глубиной, один из которых показан на рис. 3.

Процедура испытаний грунтов методом бурового зондирования включает следующие операции:

- Установка бурового станка на месте исследований и подготовка его к работе.
- Закрепление устройства для регистрации параметров бурения в приводе бурового станка и установка дальности на мачте бурового станка.
- Соединение первого звена сплошного или полого шнека с устройством для регистрации параметров бурения.
- Запуск питания электроники устройства и программы управления измерениями.
- Запуск привода бурового станка и бурение скважины.

- Автоматическое протоколирование значений параметров, измеряемых при бурении.
- Интерпретация полученных данных.

Процедура испытаний грунтов методом бурового зондирования с отбором монолитов грунта включает следующие дополнительные операции:

- Прекращение бурения скважины полым шнеком на заданной глубине.
- Извлечение устройства для измерения параметров бурения.
- Присоединение к буровым штангам тонкостенного пробоотборника и его погружение в грунт ниже забоя скважины.
- Извлечение пробоотборника на поверхность и замена его устройством для измерения параметров бурения.
- Продолжение процесса бурения.

Процедура испытаний с целью определения модуля деформации грунтов методом бурового зондирования включает следующие дополнительные операции:

- На заданной глубине испытаний прекращается бурение скважины.

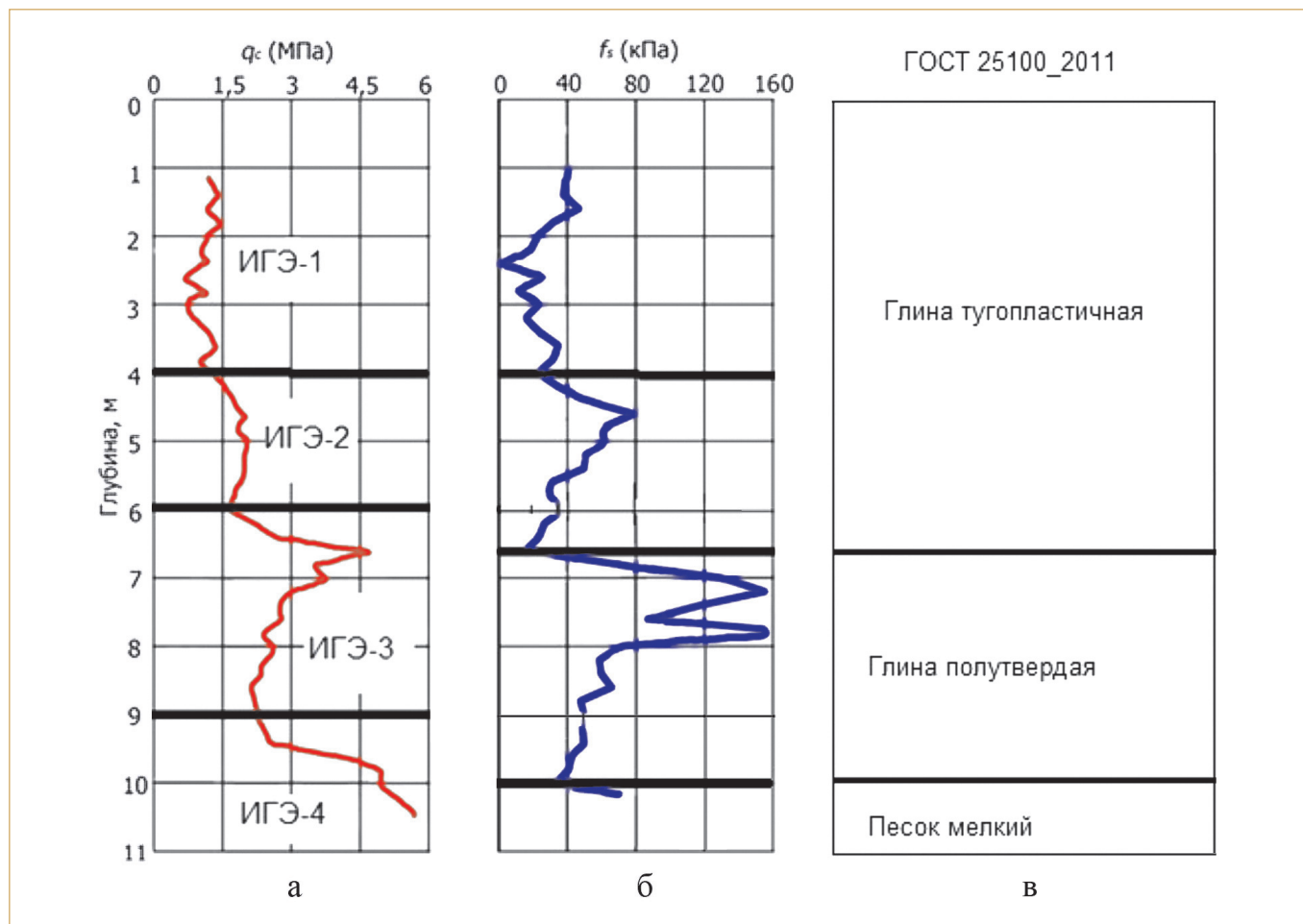


Рис. 4. Сводные результаты статического зондирования: а — удельное сопротивление грунта под конусом зонда q_c ; б — удельное сопротивление грунта на боковой поверхности зонда f_s ; в — выделение слоев с использованием классификационных показателей по ГОСТ 25100-2010

- Буровая колонна при помощи привода бурового станка поднимается вверх на 10–20 см над забоем скважины и прокручивается для снятия сил трения между стенкой скважины и шнеком.
- Буровая колонна опускается в забой скважины, включается вращение, и долото погружается в грунт на 20–30 см ниже забоя скважины.
- С помощью устройства для регистрации параметров бурения выполняется пошаговое задавливание шнека в грунт с измерением его осадки и давления.
- С использованием решения, приведенного в ГОСТ 20276-2012, и зависимости «осадка — давление» находится модуль деформации грунта на заданной глубине.

Пример подобного зондирования и сравнение его данных с результатами испытаний винтовым штампом приведен в работах [1, 3].

На рисунках 3 и 4 приведены результаты бурового и статического зондирования грунтов на глубину до 11 м в пределах одной и той же площадки (на расстоянии не более 2 м), предположительно сложенной тугопластичными глинами мощностью 10 м, подстилаемыми мелким песком. По полученным данным статического зондирования было выполнено разбиение грунтовой толщи на инженерно-геологические элементы (см. рис. 4, а, б). Подобное разбиение было выполнено и на профилях механической мощности и удельной энергии, графики которых показаны на рис. 3. Если сравнить рис. 3 и 4, то можно сделать вывод о совпадении количества и мощности выделенных инженерно-геологических элементов, выявленных обоими методами. Таким образом, можно говорить о совпадении результатов использования двух рассматриваемых методов

испытаний при выделении и определении мощности ИГЭ. Из профилей, которые приведены на рис. 3 и 4, видно, что на глубине от 6 до 9 м залегает более прочный, чем глина, слой (как позже показал отбор монолитов из контрольной скважины, это песок средней крупности).

С целью сравнения полученных результатов было проведено бурение контрольной скважины на глубину до 12 м с отбором монолитов грунта. С использованием классификационных показателей по ГОСТ 25100-2010 было выполнено разбиение грунтовой толщи на ИГЭ. Как видно из рис. 4, в, классический метод ГОСТ 25100 дал несколько иные результаты, чем статическое и буровое зондирование. В пределах глубины 1,0–6,5 м был выделен один инженерно-геологический элемент, в то время как интерпретация результатов СРТ и RDT дала два ИГЭ. Однако из рис. 4, а видно, что ИГЭ-1 и ИГЭ-2 могут быть объединены в один элемент, так как в их пределах значения q_c по глубине изменяются незначительно.

Заключение

В настоящее время наиболее широкое применение как в отечественной, так и в зарубежной практике инженерно-геологических изысканий находит метод статического зондирования грунтов. Альтернативой ему является метод бурового зондирования, который имеет ряд преимуществ при исследовании не только дисперсных, но и мерзлых и скальных грунтов. Для выделения слоев с различной прочностью могут быть применены такие определяемые при буровом зондировании показатели, как механическая мощность вращательной нагрузки в забое скважины или удельная энергия. ■

Список литературы

1. Болдырев Г.Г. Полевые методы испытаний грунтов (в вопросах и ответах). Саратов: ПАТА, 2013. 356 с.
2. Болдырев Г.Г., Кальберген Р.Г., Кушниц Л.Г., Новичков Г.А. Метод бурового зондирования грунтов // Инженерные изыскания. 2012. № 12. С. 38–42.
3. Болдырев Г.Г., Мельников А.В., Меркульев Е.В., Новичков Г.А. Сравнение методов лабораторных и полевых испытаний грунтов // Инженерные изыскания. 2013. № 14. С. 28–46.
4. Рыжков И.Б., Исаев О.Н. Статическое зондирование грунтов. М.: Изд-во АСВ, 2010. 496 с.
5. ASTM D 6151. Standard practice for using hollow-stem augers for geotechnical exploration and soil sampling. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2015.
6. Bevilacqua M., Ciarapica F.E., Marchetti B. Acquisition, processing and evaluation of down hole data for monitoring efficiency of drilling processes // Journal of Petroleum Science Research. 2013. V. 2. № 2. P. 49–56.
7. Cardu M., Oreste P., Pettinau D., Guidarelli D. Automatic measurement of drilling parameters to evaluate the mechanical properties of soils // American Journal of Applied Sciences. 2013. V. 10. № 7. P. 654–663.
8. Lunne T., Yang S., Schnaid F. Session report 2: CPT interpretation / Proceedings of the 3-d International symposium on cone penetration testing. Las Vegas, Nevada, USA, 2014. P. 145–164.
9. Methods for estimating the geotechnical properties of the soil. Semi-empirical correlations of geotechnical parameters based on in situ tests. Geostru, 2015. 46 p.
10. Robertson P.K., Cabal K.L. Guide to cone penetration testing for geotechnical engineering. Gregg Drilling & Testing Inc., 2010. 138 p. URL: <http://www.novotechsoftware.com/downloads/PDF/en/Ref/CPT-Guide-5ed-Nov2012.pdf>.
11. Teale R. The concept of specific energy in rock drilling / International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. 1965. V. 2. P. 57–73.