

УДК 624.131.35

Аннотация

В статье приводится исторический обзор развития статического зондирования, рассмотрены механические, гидравлические и электрические зонды, описаны принципы их работы, изложены особенности работы пьезозонда при статическом зондировании с измерением порового давления, а также принципы работы сейсмического конуса. Выделены преимущества современного оборудования и технологий статического зондирования, рассмотрен вопрос влияния скорости внедрения зонда на процессы, возникающие в грунте, и их воздействие на результаты измерений. Оценены факторы, влияющие на результаты статического зондирования.

Ключевые слова: статическое зондирование, механический зонд, гидравлический зонд, электрический зонд, пьезозонд, сейсмозонд.

Ил. 8. Библиогр.: 14 назв.

STATIC CONE PENETRATION TEST IN GEOTECHNICAL PRACTICE**Abstract**

The article provides a historical overview of the development of static cone penetration, considered mechanical, hydraulic and electrical cone, and describes how they work, set out the features of Piezocone at static cone penetration with pore pressure measurement, as well as the principles of seismic cone. Performed the advantages of modern equipment and technologies static cone penetration test. Discussed the influence of the speed of the introduction of the cone on the processes occurring in the soil and their influence on the measurement results. Evaluated the factors affecting the results of the static penetration test.

Key words: static cone, mechanical cone, hydraulic cone penetration, an electrical cone penetration, piezocone, seismic cone penetration test.

Fig. 8. Ref.: 14 titles.

СТАТИЧЕСКОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ В ГЕОТЕХНИЧЕСКОЙ ПРАКТИКЕ



Моради Сани Б.

Введение

Проблемы проведения изысканий при проектировании усиления фундаментов связаны с необходимостью получения достоверной информации в минимально возможные сроки, а также, как правило, в стесненных условиях. Этим условиям отвечают методы скоростных изысканий, таких как статическое или динамическое зондирование.

Строительство зданий и сооружений всегда требовало надежных и быстро получаемых знаний о грунтах основания фундаментов. Наиболее полными сведениями о грунтах являются данные, получаемые путем полевых исследований и лабораторной обработки монолитов грунта, добытых в процессе бурения скважин или при откопке шурфов. Эти процессы длительны по времени и относительно дороги. Поэтому усилия специалистов были направлены на применение методов ускоренных изысканий строительных свойств

грунтов, таких как статическое и динамическое зондирование грунтов, испытание грунтов крыльчаткой на срез и др.

Использование данных статического зондирования в геотехнических расчетах является ограниченным, что обусловлено незначительным количеством отечественных работ, связанных с этим вопросом. Поэтому методы расчета несущей способности свай по данным статического зондирования, применяемые за рубежом, представляют для нас особый интерес.

Статическое зондирование: исторический обзор

Статическое зондирование является одним из методов скоростных изысканий строительных свойств грунтов и впервые разработано в Голландии в 1934 году. Первоначально использовалось для местонахождения и оценки плотности слоя песка в мягкой дельтовой глине для проектирования забивных свай [1].

6. На последнем этапе внешние штанги (трубы) вдавливает на 20 см, используя муфты трения на последних 16 см и конус на последних 12 см.

7. Повторяют процедуру, чтобы измерить сопротивление конуса и боковое трение каждые 20 см.

8. В промежутке через каждый метр добавляют новые внутренние и внешние штанги (рис. 4) [3, 4].

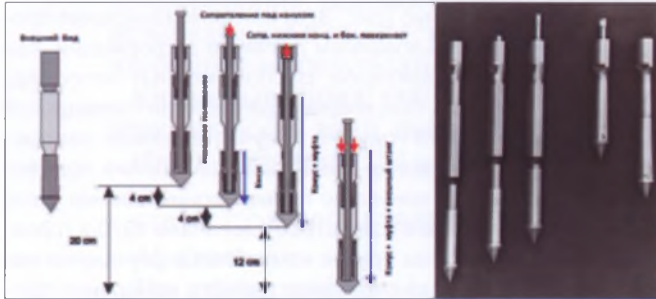


Рис. 4. Процесс выполнения зондирования механическим конусом

Поскольку наконечник конуса Делфта и наконечник Бегеманна являются механическими, они прочные, простые в использовании и обслуживании. Они могут предоставить надежные результаты, если оборудование хранится и используется правильно, а испытание проводится с осторожностью. Однако у них есть система измерения, которая может привести к серьезным ошибкам. Некоторые из них описаны Бегеманном (1969) и Де-Рюитер (1971).

Из-за трения, которое развивается между внутренней штангой и внутренней стенкой внешней трубы, сопротивление конуса всегда должно быть измерено в то время, когда внутренние штанги движутся относительно внешней штанги (трубы). Это нужно для того, чтобы свести трение к минимуму. Нажатие на внутренний и внешний стержни во время измерения сопротивления конуса приведет к большим нерегулярным изменениям в трении стержня. Затем значительно уменьшится в измеряемых сопротивлениях конуса, который после проникновения остановится для того, чтобы можно было добавить штанги [4].

Французской фирмой Sol Essais разработан гидравлический зонд, в котором центральная штанга отсутствует, а давление передается с зондирующего наконечника на цилиндр, снабженный поршнем, а от поршня – на манометр, расположенный на поверхности земли (рис. 5). С помощью такого зонда измеряется

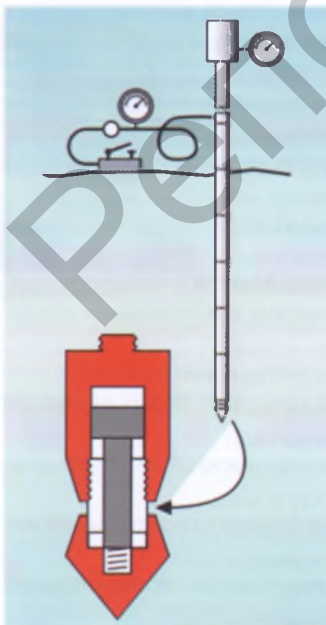


Рис. 5. Гидравлический зонд французской фирмы Sol Essais

сопротивление грунта внедрению конуса и общее задавливающее усилие. Имеется несколько модификаций такого зонда, однако диаметры конусов (45, 75 и 110 мм) не являются стандартными.

Одним из недостатков установок для статического зондирования является невозможность прохождения даже тонких прослоек (слоев) и включений твердых пород в геологическом разрезе. В связи с этим в ряде стран разработаны комбинированные установки статического и динамического зондирования. Так, норвежской фирмой Geonog разработана комбинированная установка. Статическое зондирование производится тензометрическим наконечником. При достижении твердой прослойки и максимального сопротивления зондирования включается виброударная динамическая нагрузка.

Электрический конус (наконечник с электротензометром)

Электрические конусы стоят дороже как с точки зрения их производства, так и записи данных. Их преимущество – простота в использовании. Электрические конусы измеряют силы, близкие к точке их приложения, следовательно, без трения стержневые сокращения эффектов, описанные выше, обеспечивают почти непрерывные данные по глубине грунта. На рисунке 3 показана схема электрического конуса. Конус измеряет сопротивление в стандартной комплектации и боковое трение. Кроме того, в зависимости от особенностей конуса производителя в дальнейшем измерениям могут быть доступны:

1. Отклонения зонда от вертикали (для проверки, что конус при погружении не уходит из вертикального направления), в связи с этим фирма Fugro применяет тензометрические наконечники, в которые вмонтированы небольшие инклинометры.
2. Поровое давление в пьезозонде.
3. Удельное сопротивление грунта (используется, например, в изучении поллюции).
4. Колебания грунта с использованием трехкомпонентных сейсмоприемников (в сейсмическом конусе).
5. Гамма-излучения обратного рассеивания (для определения плотности).
6. Значения прессиометра.
7. Акустический пенетрометр.

Мей (Meigh) (1987) перечислил практичность электрического пенетрометра:

1. Повышение точности и повторяемости результатов, особенно в слабых грунтах.
2. Лучшее разграничение и изображение тонких слоев (потому что показания могут быть приняты чаще).
3. Скорость работы.
4. Возможность расширения спектра датчиков, которые находятся выше наконечника.
5. Доступность обработки данных.

Во многих странах широко применяются электрические конусы благодаря их скорости и удобству. Сравнивая рисунки 3 и 4, можно сделать вывод, что трения механических

и электрических конусов имеют существенно различные геометрии, а это имеет важное значение для интерпретации данных конуса. Проникновение электрического конуса позволяет получать не только диаграммы сопротивления конуса и бокового трения, но и определять виды грунта и его параметры. Это дает возможность инженеру принимать решение о выборе дизайна полевых исследований и строительных работ даже во время проведения исследований.

Оценивая в целом применение механических и тензометрических наконечников, следует отметить, что практика показывает необходимость использования и тех и других наконечников в зависимости от различных условий [4, 5].

Пьезозонд – статическое зондирование с измерением порового давления

Измерение порового давления во время зондирования проводится не так часто, как измерение сопротивления конуса и боковой поверхности. В последнее время значительно увеличивается информация об огромном потенциале этого наконечника, особенно при зондировании в связных грунтах. В аппарат с электронным датчиком для порового давления включен и установлен пористый элемент.

Как показано на рисунке 6, существуют три популярные позиции для этого пористого элемента. Основное применение пьезозонда заключается в следующем:

1. Профилирование. Измерительный элемент тонких поровых давлений позволяет обнаружить наличие тонких зернистых (сыпучих) слоев в мягких глинистых грунтах. Такие слои имеют большое значение для скорости консолидации мягких глинистых грунтов.
2. Определение вида грунта. Соотношение между избыточным поровым давлением и сопротивлением конуса позволяет найти полезный вид грунта.
3. Определение статического давления пор.
4. Определение полевых характеристик консолидации [4, 5].

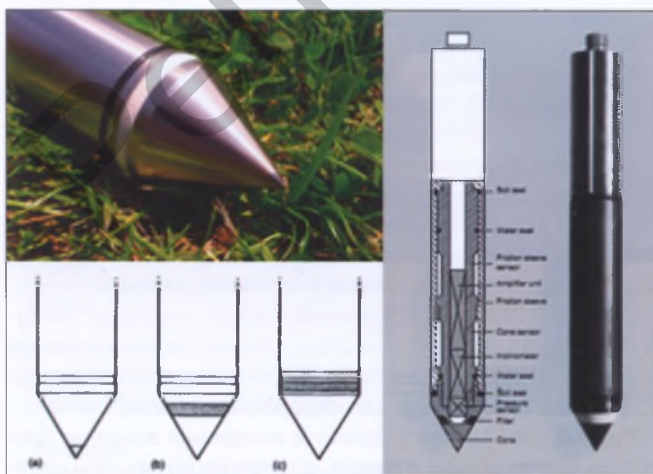


Рис. 6. Статическое зондирование с измерением порового давления с разными позициями пористых фильтров (a, b, c)

Сейсмический конус (сейсмозонд)

Сейсмический конус содержит один или два из трех компонентов массива геофона, который установлен внутри на некотором расстоянии позади муфты трения пьезозонда. Геофон обеспечивает сбор данных о сейсмических волнах, позволяет определить скорости продольных и поперечных волн в грунтах различного физического состояния. Для проведения сейсмозонда выбранный источник энергии зависит от полевых условий и конкретных данных, которые должны быть собраны для проекта. Рисунок 7, б показывает типичную схему для сейсмических тестирований конуса в скважинах. Если используются два массива, то вертикальные расстояния между ними будут 1 м и более. В последние годы сейсмический конус оказался ценным инструментом для определения значений очень малых деформаций жесткости (G0) с помощью либо параллельно поперечному отверстию тестирования или более обычного (более экономного) сейсмического скважинного испытания.

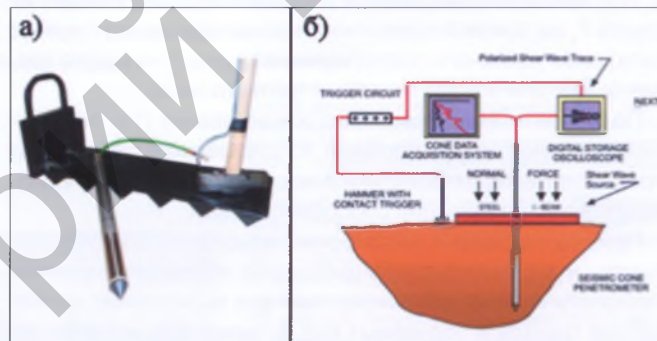


Рис. 7. а – сейсмическое оборудование; б – схема сейсмических тестирований конуса

Установки статического зондирования широко выпускаются за рубежом – во Франции, Германии, Швеции, Голландии и др. В целом они подразделяются по усилию вдавливания на легкие (до 50 кН) и тяжелые (до 200 кН).

Разработаны установки как портативные с вдавливанием вручную для исследования верхних слоев грунта, так и тяжелые на базе автомобилей и тракторов на собственном гусеничном ходу.

Значения статического зондирования зависят от типа грунта и гранулометрического состава, плотности и консистенции, которые также влияют на отношение q_c к f_s . Корреляции были разработаны между коническим лобовым сопротивлением (q_c также упоминается как несущая способность конуса) и коэффициентом трения $R_t (=f_s/q_c)$ для определения классификации грунтов.

Очевидно, что конусы несколько иной конструкции будут давать несколько различные значения для q_c и f_s , особенно в мягких глинах и илах. Это, видимо, связано с тем, что поровое давление на измеренное сопротивление проникновению оказывает муфта трения из-за неравномерных площадей конусов. Кроме того, было признано, что природное давление увеличивается с глубиной. Оно влияет на сопротивление под конусом, как это происходит с результатами испытаний стандартным пробоотборником на проникновение (SPT) [6].

В последнее время произошли важные события в развитии и стандартизации статического зондирования. Современные стандарты включают BS 1377: Часть 9:1990 и ASTM D3441 (1986). Международные источники для исследования (IRTP) можно найти в материалах первого международного симпозиума по зондированиям (ISOPT1 – ISSMFE 1988), отличную информацию об испытании дает Мей (1987). Во время использования конус будет стерт, поэтому следует проводить регулярные проверки, чтобы он продолжал работать по требованиям стандартов, указанных в кодексах. Шероховатости поверхности конуса и муфты трения существенно влияют на сопротивление конуса. Поэтому он должен поддерживаться на заданном значении рекомендуемой шероховатости $0,5 \text{ м} \pm 50\%$. Калибровка системы измерения должна проводиться регулярно, а нулевое измерение нагрузки – до и после каждого испытания [4].

Результаты зондирования представляют в виде графика изменения по глубине удельного сопротивления грунта q_c под наконечником зонда, а также общего сопротивления грунта F_s на боковой поверхности зонда (для зонда первого типа) либо удельного сопротивления грунта f_s на муфте трения зонда (для зондов второго и третьего типа).

По результатам статического зондирования (т.е. по величине удельного сопротивления зондированию) определяют прочностные характеристики и модуль деформации, производится расчет несущей способности свай.

При планировании инженерных изысканий следует учитывать, что статическое зондирование обладает широкими технологическими возможностями для выполнения проб отбора грунтов и подземных вод, а также специальных исследований грунтов в условиях естественного залегания.

Современное оборудование и технология статического зондирования позволяют осуществлять:

1. Отбор проб ненарушенного сложения водонасыщенных пылевато-глинистых грунтов длиной до 1,5 м и диаметром до 100 мм.
2. Замеры температуры и электропроводности грунтов.



Рис. 8. Общий вид многофункциональной пенетрационно-буровой установки (Geotech 210D)

3. Замеры деформационных характеристик слабых пылевато-глинистых грунтов в условиях естественного залегания с помощью дилатометров и прессиометра.

4. Постановку одноразовых фильтров для мониторинга загрязнения подземных вод, а также глубинных датчиков порового давления.

Большие преимущества открывает внедрение многоцелевых, пенетрационно-буровых установок, позволяющих производить скоростное вращательное бурение, зондирование различными зондами и наконечниками, а также проб отбор (рис. 8). Как правило, такие установки оборудуются бескабельной системой зондирования (акустическая или радиоволновая передача сигнала).

Для многоцелевых установок разработаны специальные программные пакеты, которые позволяют отслеживать как параметры зондирования, так и параметры бурения, в частности удельную энергию вращения снаряда, давление на забой и расход промывочной жидкости (так называемая программа MWD – Measure While Drilling).

Использование современной технологии зондирования открывает путь к овладению компьютерными программами обработки больших пакетов цифровых данных, что существенно упрощает весь процесс инженерных изысканий [7].

Применение статического зондирования в сочетании с другими методами изучения инженерно-геологических условий территории (участка) позволяет:

1. Наиболее полно оптимизировать процесс инженерно-геологических изысканий на основе сочетания геофизических методов, бурения скважин и других полевых методов.
2. Применять наиболее экологичные приемы и методы исследования грунтов, в частности ликвидационный тампонаж зондировочных скважин при бескабельном зондировании.
3. Повышать достоверность результатов инженерно-геологических изысканий.
4. Добиваться снижения затрат на производство инженерных изысканий при одновременном получении наиболее экономичных проектировочных решений.

На процесс погружения зонда в грунт оказывают влияние следующие факторы:

- скорость погружения зонда;
- поровое давление в грунте;
- физико-механические характеристики грунта;
- природное (бытовое) давление;
- параметры зондирующей установки;
- упругие деформации грунта и др.

Главное различие в методах заключается в способе погружения зонда: при статическом зондировании зонд вдавливается, а при динамическом забивается. Следовательно, вопрос состоит в различии скоростей погружения.

ГОСТ19912-2001 [8] регламентирует скорость погружения зонда при статическом зондировании не более $1,2 \pm 0,3 \text{ м/мин}$. Стандарты статического зондирования рекомендуют выполнять его со скоростью не более 1 м/мин.

Рассмотрим влияние скорости внедрения зонда на процессы, возникающие в грунте, а также на результаты измерений. По этому вопросу в настоящее время нет однозначного ответа.

По данным Керизеля [9], изменение скорости в пределах от 0,35 до 20 см/мин дало увеличение сопротивления грунта всего на 4%. Увеличение скорости от 2,1 мм/с до 2 см/с [10] также привело к увеличению сопротивления грунта. Однако эксперименты Р. Хейфели [11] и др. показали, что изменение скорости погружения зонда от 0,15 м/мин (2,5 мм/с) до 1,6 м/мин (26,7 мм/с) в глинистые грунты приводит к снижению сопротивления грунта.

А.Н. Зеленин [12], анализируя результаты опытных работ В.П. Горячкина, Тейлора, И.А. Сургучева, пришел к выводу, что при скоростях до 1,2 м/мин усилие резания грунта практически постоянно. Возрастание сопротивления следует ожидать при скоростях более 300 м/мин.

М. Бюиссон [13], отмечая возрастание бокового и лобового сопротивления свай после остановки процесса погружения, рекомендует принимать скорость погружения зонда не более 2 см/мин.

Влиянием гранулометрического состава грунтов, его физико-механических свойств и бытового давления на результаты статического зондирования занимался большой круг отечественных и зарубежных ученых (табл. 1) [11].

Данные таблицы 1 показывают, что на сопротивление погружению зонда оказывают влияние в сторону увеличения объемный вес, влажность и бытовое давление, последнее только в бесструктурных грунтах, причем основным является объемный вес.

Факторы, влияющие на результаты статического зондирования по исследованиям разных авторов

Таблица 1

Автор	Факторы, влияющие на результаты зондирования						
	гран. состав	форма и шероховатость зерен	объемный вес	влажность	сцепление упрочнения	сопротивление резанию	бытовое давление
С.А. Шашков	○	●	+	+	●	●	●
Г.К. Бондарик	●	●	+	○	●	●	●
С.Л. Голованенко	●	●	●	+	●	●	●
В.М. Сиденко	●	●	●	+	●	●	●
Л.Н. Воробков	●	●	+	●	●	●	+
М.И. Иванова	●	●	+	●	●	●	●
А.Н. Зеленин	●	●	●	●	●	+	●
И.И. Иванов	●	●	+	+	●	●	●
М.Я. Телегин	●	●	+	+	●	●	●
Р. Хейфели	●	●	●	+	●	●	●
Г. Амберг	●	●	●	+	●	●	●
Х. Джибс	●	●	+	●	●	●	+
В. Хольц	●	●	+	●	●	●	+
К. Шуберт	+	+	+	●	●	●	●
Г. Мус	●	●	+	●	+	●	●

Примечание:
 (+) – влияние на результаты зондирования;
 (○) – слабое влияние на результаты зондирования;
 (●) – указанные факторы не рассматривались.

ВЫВОДЫ

1. Несмотря на широкое применение статического зондирования, которое регламентировано действующими нормативными документами, необходимо дальнейшее совершенствование испытаний грунтов этим методом с целью получения полноценной информации [14].
2. На сопротивление погружению зонда оказывают влияние в сторону увеличения объемный вес, влажность и бытовое давление, последнее только в бесструктурных грунтах, причем основным является объемный вес.
3. Влияние гранулометрического состава и других факторов на результаты статического зондирования практически можно не учитывать.

Литература

1. Грунты. Методы полевых испытаний статическим и динамическим зондированием: ГОСТ 19912-2012. – Взамен ГОСТ 19912-2001; введ. 11.01.13. – Москва: Межгос. науч. тех. комиссия по стандартизации, техническому нормированию и сертификации в строительстве, 2013. – 26 с.
2. Barry, R.Ch. Subsurface Investigations. Geotechnical Site Characterization / Barry R.Ch., Jason D. – Washington, D.C.: U.S. Department of Transportation, 2001. – 305 p.
3. Robert, L.D. Engineering and Design Geotechnical investigations / Robert, L.D. Washington: Department of the army, U.S. Army Corps of Engineers, 2001. – 449 p.
4. Robertson, P.K. Guide to in-situ testing / Robertson P.K. – California: Gregg drilling & testing, Inc., 2006. – 100 p.
5. Clayton, C.R.I. Site Investigation / C.R.I. Clayton, M.C. Matthews. – University of Surrey, – 2000. – 490 p.
6. Honjo, Y. On reliability based performance design of pile foundations / Y. Honjo. Gifu, Japan: Gifu University, 2000. – 501 p.
7. Захаров, М.С. Статическое зондирование в инженерных изысканиях: учеб. пособие / М.С. Захаров. – Санкт-Петербург: СПб. гос. архит.-строит., ун-т, 2007. – 72 с.
8. Грунты. Методы полевых испытаний статическим и динамическим зондированием: ГОСТ 19912-2012. – Взамен ГОСТ 19912-2001; введ. 11.01.13. – Москва: Межгос. науч. тех. комиссия по стандартизации, техническому нормированию и сертификации в строительстве, 2013. – 26 с.
9. Трофименков, Ю.Г. Некоторые современные вопросы механики грунтов по материалам V конгресса / Ю.Г. Трофименков // Сборник материалов по проектированию и изысканиям ГПИ Фундаментпроект. ЦБТИ НИИОМТП. – Стройиздат. – Москва, 1962.
10. Клейнин, Н.П. Влияние скорости перемещения деформатора на сопротивление почвы деформированию / Н.П. Клейнин // Вестник сельскохозяйственной науки. – 1960. – № 5. – Р. 22-25.
11. Бондарик, Г.К. Динамическое и статическое зондирование грунтов в инженерной геологии / Г.К. Бондарик – М.: Недра, 1964. – 150 с.
12. Зеленин, А.Н. Физические основы теории резания грунтов / А.Н. Зеленин. – М.: издат. Акад. наук СССР, 1950. – 99 с.
13. Buisson, M. Relation entre les Résistances Statiques et Dynamiques des Pieux / M. Buisson, M. Chapon // Proc. Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., 3rd. – Zurich, 1954. – P. 16-21.
14. Каширский В.И., Дмитриев С.В. Статическое зондирование в России: исторический экскурс и современное состояние / В.И. Каширский, С.В. Дмитриев, А.Н. Бизов // Инженерные изыскания. – 2009. – № 5. – С. 30-40.