

И.Б. РЫЖКОВ, О.Н. ИСАЕВ

СТАТИЧЕСКОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ГРУНТОВ

CONE
PENETRATION
TESTING OF SOILS



И.Б. Рыжков, О.Н. Исаев

СТАТИЧЕСКОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ГРУНТОВ



Издательство Ассоциации строительных вузов
Москва, 2010

УДК 624.131.38
ББК 38.58

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор *Л.С. Амарян*
(ПНИИИС);

доктор технических наук, профессор *Б.В. Бахолдин*
(НИИОСП им. Н.М. Герсевича).

Рыжков И.Б., Исаев О.Н.

Статическое зондирование грунтов. Монография. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2010. – 496 с.

ISBN 978-5-93093-758-9

Приводится обзор исследований и анализ опыта практического применения метода статического зондирования грунтов в нашей стране и за рубежом за последние пять десятилетий. Рассматриваются конструкции зондов и зондировочных установок, способы зондирования и интерпретации получаемых данных, методы использования данных зондирования при решении различных практических задач.

Для инженерно-технических и научных работников изыскательских, проектных, строительных и научно-исследовательских организаций; студентов строительных и инженерно-геологических специальностей.

УДК 624.131.38
ББК 38.58

ISBN 978-5-93093-758-9

© Рыжков И.Б., Исаев О.Н., 2010
© Издательство АСВ, 2010

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	8
ГЛАВА 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ, ПРИМЕНЯЕМОЕ ОБОРУДОВАНИЕ, КРАТКАЯ ИСТОРИЯ ЗОНДИРОВАНИЯ	13
1.1. Основные понятия.....	13
1.2. Основные задачи, решаемые с помощью статического зондирования	17
1.3. Используемое оборудование.....	21
1.3.1. Механические зонды	21
1.3.2. Гидравлические (пневматические) зонды	27
1.3.3. Тензометрические зонды	28
1.3.4. Специальные зонды, совмещающие дополнительные функции	33
1.3.5. Зондировочные установки	55
1.4. Краткая история зондирования и тенденции его развития.....	67
ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЯ, СВЯЗАННЫЕ С ИЗУЧЕНИЕМ ПРОЦЕССА СТАТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ .	80
2.1. Физические и механические процессы, происходящие в грунте при статическом зондировании	80
2.2. Влияние конструкции и размеров зонда на результаты статического зондирования.....	85
2.3. Влияние методических факторов и условий выполнения статического зондирования.....	98
2.4. Теоретическая интерпретация связи между данными статического зондирования и механическими свойствами грунта.....	115
2.4.1. Эмпирические и теоретические зависимости в практике статического зондирования	115
2.4.2. Типичные математические модели статического зондирования	117
2.4.3. Использование модели упругопластической среды, разрушающейся согласно закону Кулона и деформирующейся линейно	124
2.4.4 Основные направления применения рассмотренных теоретических зависимостей	134
2.5. Теоретическая оценка роли точности и числа измерений при использовании статического зондирования.....	140
2.6. Некоторые обобщения практического характера.....	146

ГЛАВА 3. ПРАКТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СТАТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЯХ 151

3.1. Изучение характера напластования грунтов (построение литологических разрезов).....	151
3.1.1. Идентификация литологических разновидностей грунта ..	151
3.1.2. Составление литологических разрезов.....	166
3.2. Определение свойств грунтов.....	170
3.2.1. Типичные проблемы, затрудняющие исследования	170
3.2.2. Общие представления, используемые при практической оценке свойств грунтов	174
3.2.3. Определение основных прочностных характеристик грунтов	179
3.2.4. Определение модулей деформации грунтов.....	205
3.2.5. Определение прочих характеристик грунтов	222

ГЛАВА 4. «ПРЯМЫЕ» МЕТОДЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДАННЫХ СТАТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ 251

4.1. Особенности «прямых» и «косвенных» методов.....	251
4.2. Оценка сопротивляемости оснований мелкозаглубленных фундаментов (естественных оснований)	253
4.3. Определение несущей способности свай	264
4.3.1. Общие сведения	264
4.3.2. Исследования и практика применения статического зондирования в свайном фундаментостроении бывшего СССР и государств СНГ	268
4.3.3. Применение статического зондирования для определения несущей способности свай в странах дальнего зарубежья	292
4.4. Решение технологических задач.....	311
4.4.1. Оценка возможности забивки свай имеющейся сваебойной техникой.....	311
4.4.2. Вопросы производства земляных работ, уплотнения и закрепления оснований.....	324
4.5. Оценка опасности разжижения песков	334

ГЛАВА 5. ПРИМЕНЕНИЕ СТАТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В ОСОБЫХ УСЛОВИЯХ (В СПЕЦИФИЧЕСКИХ ГРУНТАХ) 345

5.1. Вечномерзлые (многолетнемерзлые) грунты.....	345
5.1.1. Общие сведения, историческая справка, оборудование и методы испытаний.....	345

5.1.2. Влияние технологических факторов на сопротивления мерзлого грунта зондированию	355
5.1.3. Влияние геокриологических факторов на сопротивления мерзлого грунта зондированию	360
5.1.4. Теплофизическое взаимодействие зонда с талым и мерзлым грунтом, измерение температуры грунта с помощью зонда	362
5.1.5. Идентификация талого и мерзлого состояний грунтов.....	364
5.1.6. Определение механических свойств мерзлых грунтов.....	366
5.1.7. Использование статического зондирования для расчета основания фундаментов на вечномерзлых грунтах.....	369
5.2. Просадочные грунты	375
5.3. Грунты с включениями крупных валунов или глыб (моренные, элювиальные и проч.).....	391
5.4. Использование зондирования в космических исследованиях. Грунт Луны	406

ГЛАВА. 6. ПРИНЦИПЫ СОВМЕСТНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СТАТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ С ДРУГИМИ ВИДАМИ ИСПЫТАНИЙ ГРУНТОВ.....

6.1. Сложности совместного использования различных видов испытаний	413
6.2. Корректировка результатов, получаемых по данным зондирования	419
6.3. Использование статического зондирования в комплексе с несколькими независимыми методами изучения грунта.....	435

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ПРИЛОЖЕНИЕ 1. ТЕРМИНОЛОГИЧЕСКИЙ СЛОВАРЬ ПО СТАТИЧЕСКОМУ ЗОНДИРОВАНИЮ

ПРИЛОЖЕНИЕ 2. АНГЛОЯЗЫЧНЫЕ СОКРАЩЕНИЯ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В ЗАРУБЕЖНЫХ ПУБЛИКАЦИЯХ ПО СТАТИЧЕСКОМУ ЗОНДИРОВАНИЮ

ПРИЛОЖЕНИЕ 3. ОСНОВНЫЕ БУКВЕННЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ 4. ПРИМЕНИМОСТЬ И ПОЛЕЗНОСТЬ ПОЛЕВЫХ МЕТОДОВ ИСПЫТАНИЙ ГРУНТОВ.....

ПРИЛОЖЕНИЕ 5. ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ДАТЧИКИ И УСТРОЙСТВА, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИ ЗОНДИРОВАНИИ.....

ЛИТЕРАТУРА

CONTENTS

INTRODUCTION.....	8
CHAPTER 1. BASIC CONCEPTS, APPLIED EQUIPMENT, SHORT RETROSPECT OF CPT	13
1.1. Basic concepts.....	13
1.2. Principle problems resolved with CPT.....	17
1.3. Applied equipment	21
1.3.1. Mechanical cone penetrometers.....	21
1.3.2. Hydraulic (pneumatic) cone penetrometers	27
1.3.3. Tensometric cone penetrometers	28
1.3.4. Special cone penetrometers with additional capabilities	33
1.3.5. CPT rigs	55
1.4. Brief retrospect of CPT and its principle development trends	67
CHAPTER 2. RESEARCH OF CPT PROCESS	80
2.1. Physical and mechanical processes, occurring in soil, during CPT	80
2.2. Effect of design and dimensions penetrometer on CPT results.....	85
2.3. Effect of methodology and conditions on CPT process	98
2.4. Theoretical CPT data and soil mechanical properties data interrelation.....	115
2.4.1. Empirical and theoretical relationships in CPT practical applications	115
2.4.2. CPT typical mathematical models	117
2.4.3. Application of linear elastoplastic model with Coulomb strength criterion	124
2.4.4. Principle application trends of the discussed theoretical dependences	134
2.5. Theoretical evaluation of accuracy and number of measurements in CPT	140
2.6. Some general practical generalizations	146
CHAPTER 3. PRACTICAL METHODS OF CPT APPLICATION IN SITE SURVEY	151
3.1. Investigation of soil stratification features (plots of lithological sections).....	151
3.1.1. Identification of soil lithological varieties	151
3.1.2. Lithological profiles plots.....	166
3.2. Determination of soil properties.....	170
3.2.1. Typical issues of soil investigations	170
3.2.2. General concepts for practical evaluation of soil properties.....	174
3.2.3. Determination of principle soil strength properties	179
3.2.4. Determination of soil stiffness moduli.....	205
3.2.5. Determination of other soil parameters.....	222
CHAPTER 4. «DIRECT» METHODS OF CPT DATA APPLICATION.....	251
4.1. Specific features of «direct» and «indirect» methods	251

4.2. Evaluation of shallow footings resistance	253
4.3. Pile bearing capacity evaluation	264
4.3.1. General information	264
4.3.2. CPT research and practical application for pile engineering in former USSR and in CIS states	268
4.3.3. Application CPT for pile bearing capacity evaluation in foreign countries.....	292
4.4. Solutions of technological problems	311
4.4.1. Evaluation of available equipment capacity for pile driving.....	311
4.4.2. Earth excavation, soil compaction and stabilization technology aspects.....	324
4.5. Sand liquifaction risk assessment.....	334

CHAPTER 5. CPT APPLICATIONS IN SPECIFIC SOIL ENVIRONMENT

5.1. Permafrost soils	345
5.1.1. General information, historical background, equipment and test methods	345
5.1.2. Effects of technological factors on frozen soil CPT resistance.....	355
5.1.3. Effects of geocryological factors on frozen soil CPT resistance.....	360
5.1.4. Thermophysical interaction of penetrometer with thawed and frozen soils, soil temperature measurement with penetrometer	362
5.1.5. Thawed and frozen soil state identification.....	364
5.1.6. Frozen soil mechanical properties determination.....	366
5.1.7. CPT application for analysis of footings on permafrost.....	369
5.2. Collapsible soils.....	375
5.3. Soils with large boulder and block inclusions (moraine, eluvial, etc.).....	391
5.4. CPT applications in outer space. Lunar soils.....	406

CHAPTER 6. CPT AND OTHER SOIL TESTS

JOINT APPLICATIONS	413
6.1. Joint tests application issues	413
6.2. CPT data updating	419
6.3. CPT application with other independent soil investigation tests	435

CONCLUSION

ANNEX 1. GLOSSARY OF CPT TERMINOLOGY

ANNEX 2. ENGLISH ABBREVIATIONS IN INTERNATIONAL

PUBLICATIONS ON CPT

ANNEX 3. LIST OF MAIN SYMBOLS.....

ANNEX 4. THE APPLICABILITY AND USEFULNESS

OF IN SITU TESTS

ANNEX 5. MORE SENSORS AND DEVICES USED

IN PENETRATION TESTING.....

REFERNCES.....

ВВЕДЕНИЕ

Статическое зондирование является в настоящее время одним из основных методов изучения грунтовых условий, который в истекшем XX веке претерпел сложную эволюцию от простейших щупов, вдавливаемых вручную, до мощных мобильных установок с высококомеханизированным управлением и автоматизированной системой измерений. С помощью зондирования удается оценивать грунт в состоянии его естественного залегания (*in situ*) с максимальной эффективностью. При этом главными достоинствами статического зондирования являются его быстрота и простота, т.е. возможность проведения большого числа измерений в кратчайшие сроки. Необходимость в этом связана с двумя обстоятельствами.

Во-первых, изучаемый грунт всегда неоднороден, его свойства различны в каждой точке обследуемой площадки. Малочисленные полевые и лабораторные испытания грунта не гарантируют необходимой полноты получаемой информации, как бы точны они ни были. Всегда остаются опасения, что между буровыми скважинами или точками полевых испытаний остались незамеченными «слабые» или «прочные» линзы грунта, что фактические границы между пластами (слоями грунта) отличаются от принятых, т.е. указываемых на литологическом разрезе, и т.д. Просчеты такого типа нередко становятся причинами повреждений или даже обрушения построенных объектов. Естественно, что для предотвращения подобных ситуаций необходимо оценивать грунтовые условия площадки по возможно большему числу точек, что требует быстрых и дешевых методов, таких как статическое зондирование.

Во-вторых, рациональное использование быстрых и дешевых методов изучения грунта («экспресс-методов»), к каким относится статическое зондирование, – наиболее реальный способ сокращения продолжительности инженерных изысканий. Частичная замена буровых скважин и дорогостоящих испытаний грунта на статическое зондирование, как правило, обеспечивает сокращение сроков изыскательских работ даже при значительном увеличении числа точек зондирования.

Повышение внимания к темпам изысканий в определенной мере связано с осознанием их экономической роли в строительном инвестиционном цикле в целом (т.е. в цикле «изыскания – проектирование – строительно-монтажные работы – пусконаладочные работы»). Изыскания и проектирование представляют этапы, которые, не требуя больших материальных затрат, связаны со значительными затра-

тами времени. По этой причине продолжительность изысканий и проектирования в ряде случаев может иметь даже большее экономическое значение, чем их стоимость. Для инвестора увеличение продолжительности инвестиционного цикла лишь на 1 месяц равносильно удорожанию строительства примерно на 1...2% (за счет дополнительных платежей по кредитам и снижения темпов оборачиваемости капиталовложений). Напротив, сокращение продолжительности этого цикла эквивалентно такому же удешевлению строительства. Если учесть, что стоимость инженерно-геологических изысканий в большинстве случаев составляет лишь 0,5...1% от общей сметной стоимости строительства, становится очевидным исключительное значение темпов изыскательских работ.

Практика подтвердила, что при наличии высокопроизводительных зондировочных установок можно выполнять такое количество измерений на изучаемой площадке, которое практически недостижимо при дорогостоящих традиционных способах оценки грунта. «Густота» расположения точек (пунктов) зондирования на площадке может без особых проблем доводиться до уровня, когда можно не опасаться пропуска линз слабых грунтов или значительных искажений границ между различными пластами. Кроме того, статическое зондирование обеспечивает оценку несущей способности свай во всех характерных участках площадки, на всех интересующих проектировщика глубинах, уступая по точности оценок только статическим испытаниям натуральных свай.

Последние десятилетия во всех развитых странах проводились обширные исследования статического зондирования. Этому методу посвящено большое число публикаций, систематически проводятся международные симпозиумы по вопросам его применения. Разработаны национальные и международные стандарты, регламентирующие применение статического зондирования. Ряд фирм специализируется на изготовлении, продаже и использовании оборудования для статического зондирования. Специалисты таких фирм уже длительное время работают во многих странах, а в последние годы и в России.

В бывшем СССР статическому зондированию также уделялось большое внимание. В 60...80-е годы интерес к зондированию в значительной мере был связан с широким применением фундаментов из забивных свай, проектирование которых оказывалось наиболее эффективным при использовании именно статического зондирования. В районах страны, где этот метод применялся наиболее широко и квалифицированно, наблюдалось более высокое качество возведения

свайных фундаментов, т.е. повышалась их экономичность, значительно реже возникали ошибки в выборе длин свай и соответственно уменьшался объем их срубки и недобивки.

В СССР функционировала специальная Межведомственная комиссия по статическому зондированию, координировавшая исследования и практическое применение этого метода в научных, проектно-изыскательских и производственных организациях, а промышленность выпускала малыми сериями различные зондировочные установки, которые успешно использовались проектно-изыскательскими, а в ряде районов и строительными организациями страны. В целом до 90-х годов в СССР развитие статического зондирования шло очень интенсивно. Снижение его темпов в 90-е годы не было связано с изменением отношения к этому методу, а представляло лишь следствие общего спада научно-технической деятельности в стране в этот период. В настоящее время ситуация во многом нормализовалась.

За рубежом к наиболее известным обобщающим работам по статическому зондированию во второй половине XX века можно отнести вышедшую в 60-е годы монографию Г. Санглера [81], появившуюся в 1997 году (переизданную в 2001, 2002, 2004 годах) монографию Т. Лунна, П.К. Робертсона и Д.Д.М. Пауэлла [151], монографию 1988 года С.Е. Бернс и П.У. Мейна [129]. К сожалению, на русский язык последние две монографии не переведены. В нашей стране к таким работам можно отнести вышедшую в 60-х годах книгу Г.К. Бондарика [11], а в последующие годы работы Ю.Г. Трофименкова и Л.Н. Воробкова [97], В.И. Ферронского [105], В.Ф. Разоренова [64] и др. Подробное обобщение зарубежного опыта было выполнено в 90-е годы Ю.Г. Трофименковым [96], а в первое десятилетие XXI века М.С. Захаровым [36].

Тем не менее накопленный до настоящего времени опыт, теоретические представления и практические приемы использования зондирования все еще не сформировались в единую систему и нуждаются в дополнительной систематизации и обобщении. Публикуемые сведения нередко носят разрозненный, а иногда и противоречивый характер. Работ, в которых бы делались попытки анализа мирового опыта применения статического зондирования, систематизации и обобщения накопленных данных, довольно мало. Значительное число публикаций, особенно зарубежных, сводится к иллюстрации различных, зачастую плохо согласующихся друг с другом эмпирических зависимостей без каких-либо попыток объяснения их физической сущности. В настоящее время даже трудно назвать какую-либо

другую область механики грунтов, где бы эмпиризм играл такую господствующую роль, как в области использования статического зондирования. При этом в наиболее значительных зарубежных монографиях [81, 151, 129] почти полностью игнорируются достижения российских (советских) специалистов по статическому зондированию.

До настоящего времени на практике возможности статического зондирования используются недостаточно. Несмотря на множество публикаций и указаний нормативных документов по вопросам применения зондирования, специалисты многих организаций недооценивают этот метод. Нередки ситуации, когда статическое зондирование не используется там, где оно было бы очень полезным, или используется неэффективно, как средство подстраховки, дублирующее более «привычные» испытания. В значительной мере это связано со сложностью интерпретации получаемых данных, с недостаточной осведомленностью в этих вопросах персонала, ведущего изыскания, иногда с отсутствием необходимого оборудования. Эффективность применения зондирования в немалой степени определяется опытом и теоретическими знаниями специалиста, его применяющего, так как решение многих геотехнических задач невозможно полностью схематизировать, сводя их к выполнению готовых инструкций и рекомендаций.

В данной монографии делается попытка обобщения результатов исследований и практического применения статического зондирования, которая, по мнению авторов, должна показать, что статическое зондирование нельзя сводить к использованию эмпирических зависимостей, достоверность которых не всегда поддается прогнозу, а результаты нередко корректируются интуитивными методами. Наибольшее внимание уделяется использованию высокопроизводительных установок с зондами, снабженными муфтой трения (II тип стандартных зондов), а также исследованиям, в которых делаются попытки объяснения многообразия и противоречивости эмпирических зависимостей, связывающих результаты зондирования со стандартными характеристиками грунтов или сопротивлениями свай в различных по виду и происхождению грунтах. Рассматриваются вопросы использования зондирования в специфических грунтах (многолетнемерзлых, просадочных, грунтах с валунами и проч.), а также принципы совместного использования зондирования с другими методами изучения грунтов. Приводятся краткие сведения об исследованиях в области применения зондирования для изучения поверхности космических тел (на примере Луны).

В книге не рассматриваются подробно вопросы применения зондирования для проектирования объектов в особых условиях: на шельфе, глубоко под землей и проч., так как актуальность таких вопросов в нашей стране пока не очень велика и затрагивает лишь узкий круг специалистов. Вопросы оснащения зондов дополнительными датчиками и оборудованием для проведения других видов испытаний: лопастного среза, прессиометрии, экологических измерений (например, наличия в грунте углеводородов) и проч. – рассматриваются лишь в общих чертах.

Авторы благодарны сотрудникам БашНИИСтрой (особенно к.т.н. Г.С. Колеснику), НИИОСП и других организаций, предоставивших полезные для подготовки книги материалы.

Авторы искренне признательны рецензентам д.т.н., проф. Л.С. Амаряну, д.т.н., проф. Б.В. Бахолдину, а также д.т.н., проф. В.П. Петрухину, д.т.н., проф. В.В. Швареву, д.г.-м.н., проф. М.А. Минкину и к.т.н. И.В. Колыбину за ценные замечания и предложения, позволившие улучшить содержание книги.

Все замечания и пожелания по содержанию монографии будут с благодарностью приняты авторами. Просьба направлять их по одному из адресов: 450001, Уфа, ул. 50 лет Октября, 34, БГАУ, д.т.н. И.Б. Рыжкову, E-mail: ig-ryzhk@yandex.ru; 109428, Москва, ул. 2-я Институтская, д. 6, НИИОСП им. Н.М. Герсегова, к.т.н. О.Н. Исаеву, E-mail: geotechnika2008@gmail.com.

ГЛАВА 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ, ПРИМЕНЯЕМОЕ ОБОРУДОВАНИЕ, КРАТКАЯ ИСТОРИЯ ЗОНДИРОВАНИЯ

1.1. Основные понятия

Под **зондированием** понимается процесс погружения в грунт специального устройства – зонда – с измерением показателей сопротивления грунта такому погружению. Это способ быстрого изучения грунта в состоянии его естественного залегания, чаще всего производимого на глубину до 10...20 м. Согласно Межгосударственному стандарту стран СНГ ГОСТ 19912-2001 [25] зондирование называется **статическим**, если погружение происходит под действием статической вдавливающей нагрузки, и **динамическим**, если такая нагрузка является ударной или ударно-вибрационной.

Зонд представляет устройство, включающее «штангу» (металлический стержень) и специальный конический наконечник («конус»), который закреплен на конце этой штанги. Вдавливающее усилие (статическое или динамическое) передается на конический наконечник через штангу, которая может состоять из отдельных звеньев, наращиваемых в процессе погружения, или из единого звена. Размеры и форма конических наконечников показаны на рис. 1.1.

В данной работе рассматривается только статическое зондирование, по динамическому зондированию рекомендуются монографии [97, 70а].

В зависимости от конструкции наконечника ГОСТ 19912-2001 разделяет зонды для статического зондирования (рис. 1.1, а) на два типа:

I тип – зонды с наконечником из конуса и кожуха,

II тип – зонды с наконечником из конуса и муфты трения.

Часть наконечника, расположенную над конусом, называют у зонда I типа **кожухом**, у зонда II типа – **муфтой трения**. Кожух жестко соединен с конусом, муфта трения с конусом не связана.

При статическом зондировании обычно измеряются следующие величины:

– **удельное сопротивление грунта под конусом зонда q_c** (МПа или кПа) в виде силы сопротивления этого грунта прониканию в него конуса, отнесенной к площади основания конуса (иногда используется термин «лобовое сопротивление зонда»);

– *удельное сопротивление грунта на муфте трения f_s* (МПа или кПа) измеряется только у зонда II типа и представляет сопротивление грунта на коротком участке боковой поверхности – муфте трения, отнесенное к площади боковой поверхности этой муфты трения;

– *общее сопротивление грунта на боковой поверхности зонда Q_s* (кН) измеряется только у зонда I типа и представляет сопротивление грунта на боковой поверхности всей заглубленной части штанги.

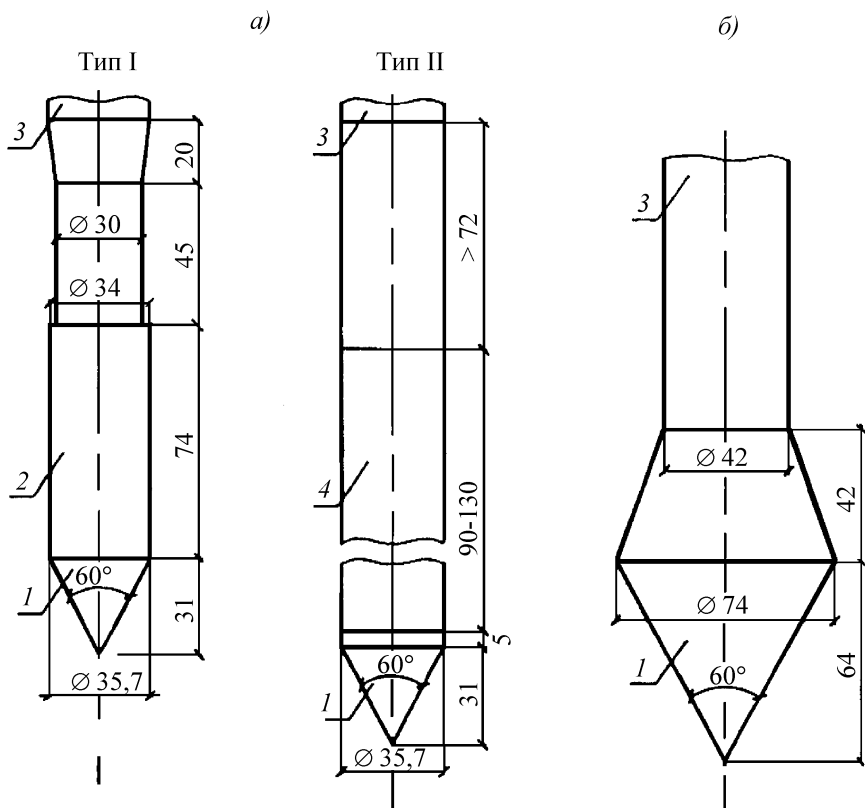


Рис. 1.1. Схемы конструкций зондов по ГОСТ 19912–2001 [25]:

а – для статического зондирования; *б* – для динамического зондирования (ударного); *1* – конус, *2* – кожух, *3* – штанга, *4* – муфта трения

На практике для величин f_s и Q_s иногда используется один и тот же термин – «боковое сопротивление зонда», или «сопротивление грунта на боковой поверхности зонда».

Следует отметить, что сопротивление грунта, приходящееся на кожух зонда I типа, отдельно не измеряется, а рассматривается как часть величины q_c , т.е. удельного сопротивления грунта под конусом зонда. Таким образом, показатели, измеряемые зондами I и II типа, различаются не только при определении сопротивлений грунта по боковой поверхности зонда, но и сопротивлений под конусом, которые у зонда I типа всегда несколько выше, чем у II типа (подробнее см. раздел 1.2).

При динамическом зондировании измеряемым показателем служит чаще всего «*залог*» n – число ударов молота, после которого производят измерение глубины погружения зонда. В ряде случаев используется также «*динамическое сопротивление грунта*» p_d , представляющее удельную энергию погружения зонда, отнесенную к единице глубины погружения (м).

Работы по стандартизации оборудования и методов выполнения статического зондирования многие годы ведутся во всем мире. Содержание вводимых за рубежом стандартов в основном не отличается от упомянутого стандарта СНГ [25], так как основные размеры зондов, методика их погружения в большинстве стран одинаковы. В 1977 году исполкомом Международной организации по механике грунтов и фундаментостроению (ISSMGE) утвердил первый Международный стандарт по статическому зондированию (принятое в зарубежной литературе обозначение статического зондирования – ***Cone Penetration Test – CPT***) [121]. В 1988 году были приняты Международные рекомендации по технике испытаний статическим зондированием – International reference test procedure for CPT [139] (см. также в [151]), содержание которых представляет доработку и уточнение упомянутого выше Международного стандарта [121] без принципиальных его изменений.

В 1997 году Европейский комитет по стандартизации (CEN) принял для стран ЕС временный нормативный документ («престандарт») по геотехническому проектированию ENV-1997-3, входящий в систему Eurocode 7 [136]. ENV-1997-3 содержал требования к оборудованию и технологии зондирования практически такие же, как и в упомянутых выше нормативных документах [121, 139]. По сравнению с нормативными документами [121, 139] ENV-1997-3 значительно полнее и подробнее трактовал вопросы применения статического зондирования. Наряду с требованиями к оборудованию и технологии зондирования в ENV-1997-3 [136] рассматривались вопросы интерпретации получаемых данных, приводились таблицы и формулы для определения различных характеристик грунтов, расчетов не-

сущей способности свай и проч., чего не было в [121, 139]. В 2006 году СЕН с небольшими изменениями «конвертировал» ENV-1997-3 в Европейский стандарт EN 1997-2.

В отечественных нормативных документах интерпретации результатов зондирования уделяется большое внимание. В федеральном нормативном документе по инженерным изысканиям СП 11-195-97 [92] приводятся необходимые для этого таблицы, в СНиП 2.02.03-85* [85] и СП 50-102-2003 [93] излагаются методы расчетов несущей способности свай по данным зондирования. Подробнее эти вопросы рассматриваются в последующих главах.

Погружение зондов осуществляется **зондировочными установками**, включающими кроме самого зонда устройство для его погружения (вдавливание и извлечение – при статическом зондировании, ударное устройство – при динамическом), опорно-анкерные устройства и измерительные устройства. Зондировочные установки могут быть самоходными, т.е. смонтированными на базе автомобиля или трактора, могут быть передвижными прицепными, т.е. смонтированными на базе автомобильного прицепа, переносными сборно-разборными или в виде приставок к буровым установкам.

В зависимости от усилий, необходимых для вдавливания зонда, и диапазонов значений измеряемых показателей сопротивления грунта Межгосударственный стандарт СНГ [25] разделяет зондировочные установки на легкие, средние и тяжелые (табл. 1.1).

Таблица 1.1

Классификация зондировочных установок по ГОСТ 19912–2001 [25]

Тип установки	Предельное усилие вдавливания и извлечения зонда	Диапазоны показателей сопротивления грунта		
		q_c , МПа	f_s , кПа	Q_s , кН
Легкая	До 50 кН включительно	0,5...10	2...100	0,5...10
Средняя	Свыше 50 до 100 кН включительно	1...30	5...200	1...30
Тяжелая	Свыше 100 кН	1...50	10...500	2...60

Кроме механизированных установок для зондирования на практике, особенно за рубежом, нередко используются простейшие портативные устройства, реализующие принцип зондирования, т.е. предполагающие изучение грунта путем ручного вдавливания (или забивки) в него специального стержня с наконечником. Такие устройства обычно именуются «ручными пенетрометрами», «ручными

зондами», «щупами», «зондами-щупами» и проч. Чаще всего они используются для технологического контроля плотности насыпей при производстве земляных работ, исследовании грунтов в шурфах при обследовании зданий или в инженерных изысканиях на территориях со слабыми грунтами. Глубина погружения таких зондов обычно невелика. При контроле плотности насыпей она может составлять 0,3...0,7 м (соответственно толщине отсыпаемого слоя), но в слабых грунтах типа илов, сапропелей она может достигать 7...10 м.

Параметры таких зондов (формы и диаметры наконечников, методика погружения и проч.) стандартам [25, 121, 139] в должной мере не соответствуют, в связи с чем некоторые специалисты рассматривают применение зондов-щупов как самостоятельный метод испытаний, не отождествляя его с зондированием. Приводимые в нормах эмпирические зависимости для определения свойств грунта или несущей способности свай по данным зондирования для ручных зондов-щупов, как правило, не годятся. Расшифровка результатов подобного упрощенного зондирования (т.е. вдавливания зондов-щупов с замером сопротивлений грунта) требует использования своих зависимостей, отражающих специфику подобных испытаний, особенности конструкции применяемых зондов, особенности местных условий. По этой причине количественная оценка грунтовых условий на основе вдавливания зондов-щупов оказывается достаточно эффективной, когда ей предшествует тарировка (калибровка) получаемых результатов применительно к изучаемой разновидности грунта. Такая тарировка предполагает установление локальных эмпирических зависимостей между стандартными характеристиками изучаемого грунта и показателями его сопротивляемости прониканию данного зонда-щупа.

Благодаря простоте и дешевизне применение зондов-щупов в ряде случаев может быть полезным дополнением к стандартным испытаниям, однако в целом объем применения ручных зондов очень мал.

1.2. Основные задачи, решаемые с помощью статического зондирования

ГОСТ 19912–2001 [25] выделяет следующие задачи, решаемые с помощью статического зондирования (в комплексе с другими видами инженерно-геологических работ или отдельно):

- выделение инженерно-геологических элементов (толщины слоев и линз, границ распространения грунтов различных видов и разновидностей);

- оценка пространственной изменчивости состава и свойств грунтов;
- определение глубины залегания кровли скальных и крупнообломочных грунтов;
- количественная оценка характеристик физико-механических свойств грунтов (плотности, модуля деформации, угла внутреннего трения и сцепления грунтов и др.);
- определение степени уплотнения и упрочнения грунтов во времени и пространстве;
- оценка возможности забивки свай и определения глубины их погружения;
- определение данных для расчета свайных фундаментов;
- выбор мест расположения опытных площадок и глубины проведения полевых испытаний, а также мест отбора образцов грунтов для лабораторных испытаний;
- контроль качества геотехнических работ.

Примерно так же, хотя и в несколько более общей форме, понимается использование статического зондирования в Международных стандартах [121, 139].

Фактически в настоящее время как в нашей стране, так и за рубежом круг задач, решаемых с помощью статического зондирования, шире, чем указывают упомянутые стандарты. Например, в российских публикациях имеются работы по использованию зондирования для оценки просадочности грунтов, определению состояния грунта (мерзлое или талое), определению «степени валунности», т.е. доли валунов в моренных отложениях, определению коэффициента постели при использовании модели «плита (или балка) на упругом основании», выбору опытных площадок с наиболее «прочными» или наиболее «слабыми» грунтами и т.д.

В техническом докладе Т. Лунна и Й. Кеавени [149] на симпозиуме СРТ-95 в Линкопине (1995) приведен анализ тематики представленных докладов 32 стран-участниц и выделено 8 направлений в использовании статического зондирования:

- общая интерпретация данных зондирования, изучение характера напластований грунтов, характеристик грунтов – в докладах практически всех 32 стран – участниц СРТ-95;
- земляные работы, обнаружение подземных выработок, насыпи – в докладах 53% стран-участниц;
- расчеты фундаментов на естественном основании, их несущая способность и осадки – 75%;
- несущая способность свай – 75%;

- оценка работы свай на горизонтальную нагрузку, осадки свайных фундаментов – 12%;
- контроль за закреплением грунтов основания – 3,4%;
- оценка опасности разжижения грунтов – 2,8%;
- экологические вопросы (оценка загрязнения окружающей среды) – 25%.

Таким образом, круг задач, решаемых с помощью статического зондирования, расширился, и, возможно, он будет расширяться и в дальнейшем. Тем не менее такие задачи, как изучение характера напластования грунтов, определение свойств грунтов, определение несущей способности свай, по-видимому, будут всегда оставаться на первом месте.

Задачи, решаемые с помощью статического зондирования, могут быть условно разделены на две группы:

- *инженерно-геологические задачи*, связанные с выявлением литологического строения изучаемой площадки (литологического разреза), т.е. определение границ распространения различных пластов, оценки их вида, состояния, пространственной изменчивости и проч.;
- *строительные задачи*, связанные с получением количественных данных для расчета конкретных фундаментов (особенно свайных), оценки качества насыпей, устойчивости склонов и т.д.

Естественно, что указанное разделение весьма условно, так как инженерно-геологические и строительные вопросы могут так тесно переплетаться, что их разделение теряет смысл.

Рассматривая строительные задачи, т.е. методы использования результатов статического зондирования в строительном проектировании, можно выделить два принципиально различных подхода, которые М. Джамииолковски (один из президентов ISSMGE) назвал «прямым» (direct) и «косвенным» (indirect) [141].

При *прямом подходе* используется корреляция данных зондирования непосредственно с поведением основания фундамента (foundation system) без определения стандартных характеристик грунта (угла внутреннего трения ϕ , удельного сцепления c , модуля деформации E и проч.). Таким методом обычно определяется несущая способность свай, давление под обычным (shallow) фундаментом, соответствующее исчерпанию несущей способности или другому условию, и проч. В формулы, которые при этом используются, как правило, входят не стандартные характеристики грунта (ϕ , c , E), а более конкретные показатели сопротивляемости основания. Например, сопротивление грунта под нижним концом сваи и на каких-либо участках ее боковой поверхности, которые определяются непосредственно по данным зондирования (q_c , f_s , Q_s).

Косвенный подход подразумевает предварительное определение характеристик грунта (ϕ , c , E), а уже затем проведение расчетов оснований по формулам и моделям, в которые входят эти характеристики. Таким способом производятся более сложные расчеты, особенно связанные с моделированием изменения напряженно-деформированного состояния грунтового массива.

Прямой подход, эмпирический по своей природе, в ограниченном диапазоне условий может давать наиболее точные результаты. Однако он требует большой осторожности применения за пределами этого диапазона. Обычно для этого требуется его дополнительная корректировка.

Косвенный подход больше учитывает физическую сущность рассматриваемых процессов, лучше приспособлен к использованию в различных математических моделях (расчетных схемах), т.е. диапазон применения получаемых закономерностей шире, чем при прямом подходе, но его точность обычно ниже.

Как уже отмечалось, согласно ГОСТ 19912-2001 [25] зондирование может применяться как в комплексе с другими видами инженерно-геологических исследований, так и самостоятельно. Наибольший эффект достигается при использовании статического зондирования совместно с другими методами изучения грунта. В значительной мере это метод *относительной* оценки, результаты которого желательно «привязывать» к надежному «эталону», в качестве которого могут выступать наиболее достоверные традиционные методы изучения грунта. Так, при оценке литологического строения площадки «эталонном» могут служить буровые скважины, при оценке несущей способности свай – статические испытания свай, при оценке характеристик грунта – результаты стандартных полевых или лабораторных испытаний и т.д. Естественно, что эту особенность зондирования не следует понимать упрощенно, как требование обязательного сопровождения зондирования параллельными работами по бурению, статическим испытаниям свай и т.д. Расчеты по данным зондирования вполне могут «привязываться» к результатам ранее проводимых изысканий на соседних площадках, если их можно считать аналогичными изучаемым условиям. При отсутствии возможностей какой-либо привязки в результаты расчетов следует вводить соответствующие коэффициенты надежности, компенсирующие ожидаемые неточности. В таких случаях коэффициенты надежности должны быть ориентированы на ситуации, наименее благоприятные для проектируемой конструкции. Подробнее принципы корректировки рассматриваются в разделе 6.2.

Научное издание

Игорь Борисович **Рыжков**
Олег Николаевич **Исаев**

СТАТИЧЕСКОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ГРУНТОВ

Компьютерная верстка: *Е.В. Орлов*
Редактор: *Г.М. Мубаракишина*
Дизайн обложки: *Н.С. Романова*

Лицензия ЛР № 0716188 от 01.04.98.
Подписано к печати 12.07.10. Формат 60х90/16.
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.

Усл. 31 п.л. Тираж 500 экз. Заказ №

Издательство Ассоциации строительных вузов (АСВ)
129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, отдел реализации – оф. 511
тел., факс: (499)183-56-83, e-mail: iasv@mgsu.ru, <http://www.iasv.ru/>