

Т.А.ГРЯЗНОВ

**ОЦЕНКА
ПОКАЗАТЕЛЕЙ
СВОЙСТВ
ПОРОД
ПОЛЕВЫМИ
МЕТОДАМИ**

Грязнов Т. А. Оценка показателей свойств пород полевыми методами. — М.: Недра, 1984, 197 с.

Рассмотрено применение полевых методов для оценки основных свойств пород. Приведена классификация основных показателей свойств пород в зависимости от состава, сложения, состояния. Рассмотрены особенности определения этих показателей различными методами; освещены вопросы машинной обработки отдельных комплексов методов, интерпретации результатов исследований. Прогнозируется развитие полевых методов; уделено внимание их экономической эффективности.

Для инженеров-геологов производственных организаций.

Табл. 24, ил. 76, список лит. — 27 назв.

Рецензент — д-р геол.-минер. наук Г. К. Бондарик (МГРИ).

ПРЕДИСЛОВИЕ

Развитие геологических наук в Советском Союзе тесно связано с проблемами, стоящими перед народным хозяйством и сформулированными Основных направлениях экономического и социального развития СССР на 1981—1985 годы и на период до 1990 года.

Добыча и транспортировка нефти и газа в условиях Крайнего Севера, освоение территорий вдоль трассы Байкало-Амурской магистрали, проведение меллоративных работ, переброска части стока северных и сибирских рек в бассейны Каспийского и Аральского морей, освоение минеральных ресурсов суши и Мирового океана и в первую очередь шельфа — все это требует получения и обработки в минимальные сроки огромного объема комплексной информации о составе, строении, состоянии и свойствах пород, обеспечивающей расчет проектов и, что очень важно, обоснование краткосрочных и долгосрочных прогнозов.

Эти задачи должны решаться на базе ускорения технического перевооружения производства и широкого внедрения прогрессивной технологии, что обеспечит экономию материальных ресурсов и улучшение условий труда.

Е. М. Сергеев [18] отмечает, что «... при оценке инженерно-геологических свойств пород должен рассматриваться чрезвычайно широкий круг вопросов — от характеристики образца до характеристики массива. Сейчас мы еще плохо умеем изучать прочность массивов. Эта проблема находится в начальной стадии разработки и только поэтому при характеристике пород как грунтов основное внимание уделяется изучению их по образцам».

Этим объясняется развитие в последнее время полевых методов исследования, позволяющих изучать состав, строение, состояние и свойства пород в массиве. Работ, посвященных вопросам применения указанных методов для оценки свойств пород, а также интерпретации полученных результатов, опубликовано довольно много. Однако еще недостаточно таких, где обобщен опыт создания технических средств и рассмотрены вопросы применения полевых методов в общем комплексе инженерно-геологических исследований. Важное значение в разработке этой проблемы имеют труды Е. М. Сергеева, В. А. Дуранте, Г. К. Бондарика, В. И. Ферронского, И. С. Комарова, Л. С. Амаряна, Л. Д. Белого, Ю. Г. Трофименкова, И. В. Дудлера и др. Но и в них не полностью освещены вопросы применения технических средств в различных геологических условиях, интерпретации результатов полевых исследований и обработки их на ЭВМ. Особенно это относится к работам по изучению шельфа, направленным на получение комплексной информации о составе, состоянии и свойствах донных отложений.

В процессе работы над книгой ценные замечания были сделаны Е. М. Сергеевым, В. И. Ферронским, С. С. Бондаренко, Л. С. Амаряном. Большую помощь в выполнении полевых экспериментов и написании гл. 5 оказали А. А. Воронин, Л. В. Селиванов, Ю. И. Зернов, В. И. Демченко, В. Н. Балышев, Ю. А. Юркштович. В обработку, интерпретацию материалов и подготовку рукописи к печати значительный вклад внесли Н. В. Федоринова, Г. А. Каргина, А. С. Царицына, Н. Н. Ветрова, А. А. Салахова.

Большая часть средств, расходуемых на инженерно-геологические исследования, идет на проведение горно-буровых и лабораторных работ. В связи с этим поиски путей совершенствования технологии изысканий и ускорения процесса получения комплексной стандартной информации являются важнейшей задачей, от решения которой во многом зависят успехи хозяйственного освоения территории Советского Союза.

Одним из этих путей является широкое использование полевых методов оценки состава, состояния и свойств пород. В настоящее время они применяются для прогнозирования и проектирования как на суше, так и на акваториях морей и океанов. Все шире используются такие полевые методы, как опытные нагрузки на штампы, сдвиги целиков породы, стандартная пенетрация, статическое и динамическое зондирование, прессиометрия, дилатометрия, искиметрия, вращательный срез пород крыльчаткой, геофизические исследования в скважинах, пенетрационный каротаж.

Научно-исследовательскими и проектно-изыскательскими организациями создаются и применяются разнообразные технические средства для проведения полевых исследований. Однако отсутствие единства в составе комплексов полевых методов, применяемых для решения тех или иных задач в различных отраслях, большое число модификаций полевых приборов одного и того же назначения часто не позволяют унифицировать оборудование и, таким образом, подойти к стандартизации получаемых показателей. Это, в свою очередь, снижает возможность многократного и многопланового использования данных.

В то же время широкое применение электронно-вычислительной техники (ЭВТ) для обработки, хранения и выдачи данных требует стандартизации технологии получения первичной инженерно-геологической информации, что является простой задачей. Достаточно заметить, что до настоящего времени нет общепринятой классификации пород по инженерно-геологическим свойствам, которая должна служить основанием для разработки стандартной технологии исследований и создания технических средств.

Высокий уровень развития приборостроения, электроники и физических методов позволяет конструировать высокопроизводительные системы для получения комплексной информации о породах в массиве с заранее заданной точностью.

Однако для того чтобы технические средства были эффективны, требуется решение целого ряда задач, в число которых входят определение состава информации, способов ее получения, обработки, хранения, формы выдачи потребителю и многое другое.

В связи с этим ниже рассмотрены некоторые вопросы, касающиеся выбора показателей состава, состояния и свойств пород, используемых для построения моделей изучаемых объектов, при-

мов сочетания полевых методов для исследования пород (в том числе и на шельфе), технических средств, применяемых для реализации различных методик, совершенствования некоторых методов с целью повышения их чувствительности и информативности, анализа процессов, происходящих в породах при зондировании, а также развития методов интерпретации результатов полевых исследований и обработки получаемых материалов.

Опыт разработки и применения [6, 22] пенетрационно-каротажных станций показывает, что возникло новое направление в технологии получения сведений о показателях свойств пород в массиве с заранее заданной точностью. Оно зарекомендовало себя как перспективное не только для оценки инженерно-геологических свойств пород, но и для более детального определения состава, вплоть до качественной оценки имеющихся в разрезе нерудных полезных ископаемых.

Такой комплексный подход к решению геологических задач дает, на наш взгляд, ценный материал для дальнейшей разработки теории инженерной геологии и, в частности, для решения проблемы охраны окружающей среды. Кроме того, создание технических средств с полной механизацией и автоматизацией процесса получения и обработки геологической информации не только позволяет исключить из технологии ручной труд, но и способствует значительному повышению квалификации персонала, обслуживающего новые установки.

ПОКАЗАТЕЛИ СВОЙСТВ ПОРОД

Вопрос о показателях, характеризующих свойства пород, является узловым в грунтоведении и инженерной геологии, так как от правильности его решения (определения перечня показателей и их классификации) во многом зависит качество как прогнозов поведения объектов, так и разработки проектов различных народнохозяйственных мероприятий. Кроме того, его решение необходимо для разработки методик и создания технических средств, применяемых для получения этих показателей, особенно в части комплексования методов. Следует сразу же отметить, что этот вопрос довольно сложен, что вытекает из определения самого объекта.

По Е. М. Сергееву [18], «...грунты — это любые горные породы и почвы, которые изучаются как многокомпонентные, изменяющиеся во времени системы с целью познания их как объекта инженерной деятельности человека». В этом определении подчеркивается, что при исследовании горных пород как грунтов изучают все их компоненты: твердые минеральные, органо-минеральные и органические образования (твердый компонент), поровый раствор (жидкий компонент), воздух (газообразный компонент), а также микро- и макроорганизмы в грунтах (живой компонент). Все они рассматриваются как взаимосвязанные и взаимообусловленные, а количественное содержание и качественный состав их определяют все свойства пород.

Н. А. Огильви [14] отмечает: «Каждая горная порода характеризуется некоторой вероятной совокупностью качественных или количественных признаков, по которым имеющий геологические знания человек может выделить горную породу, называя ее своим собственным именем, и проводить границу между горной породой различного наименования. С формальной точки зрения, горная порода является объектом нашего изучения или собственного моделирования: для нее определяются свойства объектов и множества объектов. Объект — горная порода может принадлежать к любому числу множеств (осадочные, изверженные, метаморфические породы или другие множества), и, кроме того, сам объект может вмещать в себя любое число множеств (минералов, флюидов и т. д.)».

Как известно, конечной целью инженерно-геологических исследований является создание модели исследуемого геологического объекта, наложение на него различных физических полей, если необходимо, построение прогноза его поведения, разработка проектов народнохозяйственных объектов или мероприятий.

Однако создание модели является очень сложной задачей.

Большие трудности, как отмечает Н. А. Огильви [14], заключаются в том, что наряду с количественной информацией, получаемой в результате тех или иных измерений, геология, гидрогеология или любая другая наука, изучающая Землю, связана с необходимостью анализировать большое число качественных признаков, описывающих те или иные геологические объекты. Логическая недоработанность большинства физико-географических, геологических, гидрогеологических и других классификаций в определенной степени ограничивает их применение при кодировании геологической информации.

Этим собственно и объясняется наличие множества классификаций показателей свойств пород, существующих в настоящее время в практике инженерно-геологических исследований, а отсюда большое число методик, методов и технических средств, применяемых для получения часто одних и тех же показателей. В качестве примера приведем классификации В. А. Приклонского, Н. Н. Иванова, В. В. Охотина, М. М. Филатова.

Показатели свойств пород могут подразделяться на классификационные, косвенные и прямые расчетные. К классификационным показателям относятся: минеральный состав, структура, гранулометрический состав, форма зерен, засоленность и т. д. К показателям основных физических свойств отнесены: плотность, пористость, размокаемость, уплотняемость, водопроницаемость, набухаемость, пластичность, выветрелость, влажность, степень заполнения пор водой, консистенция, степень плотности, степень уплотненности.

К косвенным расчетным показателям относятся: плотность, естественная объемная масса, объемная масса сухого грунта, естественные влажность и пористость, гранулометрический состав, максимальная молекулярная влагоемкость, пределы и число пластичности, максимальная и минимальная объемная масса, максимальная и минимальная пористость, максимальная высота капиллярной воды. Прямые расчетные показатели включают: естественную объемную массу, объемную массу под водой, параметры кривой сжатия, модули полной деформации и упругости, коэффициент бокового давления, временное сопротивление сжатию, коэффициент и угол сдвига, коэффициент и угол внутреннего трения, сцепление, угол естественного откоса, гранулометрический состав (содержание фракций), содержание растворенных составляющих (засоленность), коэффициент фильтрации, водоотдача, высота капиллярного поднятия.

Кроме того, для суждения о свойствах пород нужно принимать во внимание их гранулометрический и минеральный составы, химизм, состав раствора в грунте, количество и качество растворенных солей, состав поглощенных оснований, содержание воды. Выделяются физико-механические свойства грунтов, к которым отнесены гранулометрический состав, объемная масса скелета грунта, пористость, пластичность, прилипание, усадка, набухание, связность; водные свойства — водопроницаемость, водоподъемная

способность, влагоемкость, размокание, испаряющая способность; тепловые свойства — нагреваемость, теплоемкость, теплопроводность; сжимаемость.

Основные физические свойства грунтов включают в себя: плотность, объемную массу, пористость, пластичность, клейкость, связность, разрыхляемость, естественный угол откоса, гранулометрический состав. Выделяются функциональные физические свойства грунтов: водные, воздушные, тепловые, электрические. Вода в грунтах определяется показателями: влагоемкостью, влажностью, максимальной гигроскопической водой, капиллярной влагоемкостью, водопроницаемостью, а механические свойства — модулем деформации, несущей способностью, сцеплением и углом внутреннего трения.

По Е. М. Сергееву [18], свойства пород подразделяются на физические (плотность, объемная масса, теплофизические, электрические, магнитные, водопроницаемость); физико-механические (деформационные, сдвиговые, реологические); физико-химические (растворимость, коррозионные, электрокинетические и осмотические, адсорбционные свойства дисперсных грунтов, теплота смачивания, набухание и усадка, липкость, пластичность, водопрочность и размягчаемость, тиксотропные и пльвунные).

В. Д. Ломтадзе [12] классифицирует свойства пород следующим образом: физические (главнейшие свойства) — плотность, объемная масса, пористость, влажность; дополнительные — консистенция, относительная плотность; водные — водоустойчивость, влагоемкость, капиллярность, водопроницаемость; механические — деформируемость, прочность, реологические свойства.

К. Терцаги, Р. Пек [20] разделяют свойства на индексационные — вид породы (основные типы грунтов), размеры и форма грунтовых частиц, поверхностная активность, адсорбционные силы, относительная плотность, консистенция, пористость, влажность, плотность, гидрогеологические и механические — водопроницаемость, сжимаемость, сопротивление сдвигу.

Н. Н. Маслов, М. Ф. Котов [13] подразделяют показатели свойств на показатели: I класса — физико-технические (сжимаемость, деформируемость, объемная масса на монолитах); II класса, определяемые, как правило, на образцах нарушенной структуры (петрографический, минералогический, химический и гранулометрический составы, плотность, показатели пластичности, влажность, плотность, консистенция). В этой же работе указано, что свойства грунтов определяются их составом, состоянием, а также структурными и текстурными особенностями.

Р. С. Зиангиров [8] отмечает, что более чем в 20 главах СНиПов, а также стандартных и ведомственных инструкциях содержится большое число показателей, используемых в расчетных схемах для решения инженерно-геологических задач. Их общее число достигает 500, а число показателей, терминов и понятий,

используемых в отрасли гидрогеологии и инженерной геологии, по данным ВСЕГИНГЕО, близко к 1200. Наличие такого множества показателей объясняется еще и тем, что единой общепринятой классификации самих пород в инженерной геологии пока еще нет.

В связи с высокими требованиями к инженерно-геологической информации и широким применением ЭВМ такое положение в определенной степени сдерживает развитие научно-технической революции. Так, в СССР ежегодно выполняются работы, связанные с инженерно-геологическим обоснованием строительства на общую сумму, превышающую сотни миллионов рублей. Естественно, что к получаемой геологической информации, ее качеству и количеству предъявляются более высокие требования, чем в недалеком прошлом.

Во-первых, эти требования касаются метрологического обеспечения; унификации и стандартизации методик и технических средств; объема и состава получаемой информации с регламентом допусков, погрешностей как методов, так и технических средств. Во-вторых, это — требования к технологии изысканий, появляющиеся как в Советском Союзе, так и за рубежом и заключающиеся в унификации бурового оборудования, использовании каждой горно-буровой выработки для получения максимума информации из нее путем применения экспресс-методов; в применении значительных объемов полевых исследований (зондирования, пенетрационного каротажа и других методов); в широком применении ЭВМ при обработке материалов, создании специализированных информационно-поисковых систем. Эти требования и, в частности, создание современной высокопроизводительной техники требуют прежде всего упорядочения терминологии и классификации показателей.

В связи с этим, прежде чем подходить к рассмотрению перечня основных показателей свойств пород и их классификации, необходимо уточнить определение понятия свойств пород. В Геологическом словаре говорится, что под свойствами физических веществ, пород понимают их характерные качества, обусловленные составом и строением, являющиеся постоянными при определенных внешних условиях и меняющиеся с изменением последних. Эта формулировка понятия свойств в полной мере относится к горным породам. Очевидно, что определяющими показателями в данном случае являются состав и строение, которые в зависимости от внешних условий могут в значительной степени влиять на свойства горных пород.

Поскольку в данной формулировке не особенно ясны различия между понятиями качество и свойство, приведем формулировку Б. М. Кедрова: «Качество и свойство — это не одно и то же. Качество неотъемлемо от вещи: его изменение означает изменение самой вещи; свойство же, напротив, связано с отношением вещи к другим вещам и процессам природы. Значит, оно относительно. При изменившихся условиях вещь может потерять свое свойство, но так, что сама остается той же качественно определенной вещью».

Для количественного выражения состава, состояния и свойств пород используются показатели, которые в большинстве случаев можно отнести к одному из трех упоминавшихся классов: составу, состоянию и свойствам. Для определения принадлежности каждого показателя к тому или иному классу были использованы в качестве критериев основные законы формальной логики: наличие возможности нахождения различия и сходства между показателями; однозначную констатацию; участие всех показателей делимой совокупности в классификации; отнесение каждого показателя только в один класс; возможность распределения показателей, включенных в один из классов, не менее чем два подкласса в случае дальнейшего деления.

Для классификации было отобрано около 40 наиболее употребимых показателей состава, состояния и свойств пород из строительных норм, указаний и методик. Сюда же введены показатели, характеризующие естественные геофизические поля: гравитационное, температурное, магнитное, электрическое, сейсмодинамическое, радиоактивное. Все эти показатели приведены в табл. 1 и распределены по трем классам. Они, как правило, используются в большинстве случаев при решении задач по исследованию массивов при геологоразведочных работах, строительстве, мелиорации, гидротехническом строительстве и др. Кроме того, при исследовании свойств пород в городских условиях очень важно оценивать количественные значения показателей естественных геофизических полей и динамику их изменения во времени. К ним в первую очередь относятся: температура, напряжение в породе, давление в поровом растворе, электропроводность, магнитная восприимчивость, радиоактивность и другие показатели, характеризующие фазы или природу в целом. Они нужны еще и для того, чтобы подойти к более полной характеристике отдельных фаз пород.

Как известно, подход к оценке твердой составляющей грунтов при инженерно-геологических исследованиях чаще всего сводится к оценке гранулометрического состава и определения по нему названия грунта. В то же время жидкая фаза исследуется чаще на ионном уровне. Поскольку состав пород играет определяющую роль для показателей свойств пород, желательно его исследовать наиболее детально. Поэтому в дальнейшем целесообразно для породы приводить комплекс показателей, характеризующих состав каждой фазы отдельно, для всех трех уровней.

В первый класс показателей состава включены шесть показателей, без которых практически невозможно рассматривать вопросы, связанные с решением геологоразведочных, гидрогеологических и инженерно-геологических задач. Характерной чертой показателей этого класса вообще, и приведенных в табл. 1 в частности, во всяком случае для твердой фазы, является их относительная неизменность (в одной и той же точке массива) во времени. Здесь уместно привести высказывание Н. А. Огильви [14]: «Само понятие состава горных пород может включать целый ряд составляющих, характеризующих химический, минеральный, грану-

Показатели состава, состояния и свойств пород

Показатели	Определение	Фаза*			Область** применения
		твердая	жидкая	газообразная	
<i>Состава пород</i>					
Гранулометрический состав d	Содержание в породе частиц различной крупности, выраженное в процентах по отношению к массе сухой навески	+	-	-	СИП
Степень неоднородности U	Отношение диаметра частиц, меньше которого в данной породе содержится соответственно 60 и 10% частиц по массе	+	-	-	СП
Число пластичности I_p	Разность между влажностью породы на верхнем и нижнем пределах пластичности	+	-	-	СИП
Содержание растительных остатков	Отношение массы сухих растительных остатков в пробе к массе сухого грунта	+	-	-	СИП
Содержание органического углерода (гумуса) $C_{орг}$	Отношение содержания органического углерода в пробе к массе пробы	+	-	-	СИП
Засоленность грунтов	Суммарное содержание легко- и среднерастворимых солей в процентах от массы воздушно-сухого грунта	+	+	-	СИПР
<i>Состояния пород</i>					
Коэффициент выветрелости $K_{вк}$	Отношение изменения за счет истирания масс частиц менее и более 2 мм к отношению их масс до истирания	+	-	-	СИЛ
Естественная влажность W	Отношение массы воды в пробе к массе твердых частиц породы, выраженное в долях единицы	-	+	-	СПР
Оптимальная влажность $W_{опт}$	Влажность, при которой плотность скелета пород достигает максимального значения	+	+	-	П
Степень влажности G	Заполнение объема пор породы водой, выраженное в долях единицы	-	+	-	СПР
<i>Уплотнения породы</i>					
Объемная масса $\gamma_{об}$	Масса единицы объема породы при естественной влажности и пористости	+	-	-	СИПР
Максимальная плотность $\gamma_{мах}$	Наибольшая плотность породы (характеризующаяся объемной массой скелета), полученная при затрате стандартной или рациональной работы на ее уплотнение	+	-	-	П
Сопротивление погружению конуса при статическом зондировании P_q	Сопротивление породы вдавливанию наконечника конуса, отнесенное к поперечному сечению конуса	+	+	-	СП

Показатели	Определение	Фаза*			Область** применения
		твёрдая	жидкая	газообразная	
Консистенция I_i	Показатель податливости пород при данной влажности	-	+	-	П
Естественное напряжение породы в массиве σ	Напряжение в массиве, возникающее в результате действия веса вышележащих пород	+	+	-	ПР
Поровое давление U_{II}	Давление, возникающее в жидкой и газообразной фазах грунта при приложении к нему внешней нагрузки	-	+	+	ПР
Тепловое состояние t	Температура породы в точке массива в определенный момент времени	+	+	+	СИПР
Естественный электрический потенциал $U_{эл}$	Потенциал, создаваемый движением жидкости, биоэлектрической активностью растений, различиями концентраций электролитов в грунтах и водах и другими геохимическими процессами	+	+	-	ИПР
<i>Свойств пород</i>					
Прочность	Способность пород сопротивляться разрушению	+	+	-	
Сопротивление сдвигу τ	Минимальная величина касательных напряжений, вызывающая сдвиг	+	+	-	П
Угол внутреннего трения φ	Показатель трения в грунте, соответствующий углу наклона прямолинейного графика зависимости сопротивления грунта срезу (ордината) от нормального давления (абсцисса) к оси абсцисс	+	+	-	П
Удельное сцепление c	Взаимное притяжение частиц слагающих горные породы, вызываемое действием сил структурных связей—молекулярных, цементированных, кристаллических и др.	+	+	-	П
Временное сопротивление грунта при одноосном сжатии R	Отношение максимальной величины нагрузки, при которой происходит разрушение образца грунта к площади его поперечного сечения	+	+	-	СП
Показатель структурной прочности грунта при срезе $P_{стр}$	Показатель характера структурных связей в грунте, численно равный отношению величин максимального и установившегося сопротивления грунта	+	+	-	СП
Сжимаемость	Способность породы к уменьшению объема под воздействием нагрузки	+	+	+	П

Показатели	Определение	Фаза*			Область** применения
		твердая	жидкая	газообразная	
Коэффициент уплотнения a	Отношение изменения коэффициента пористости к разности давлений, вызвавшей это изменение	+	+	-	П
Модуль деформации E	Коэффициент пропорциональности между относительной деформацией и вертикальным давлением	+	+	-	П
Проницаемость	Свойство (способность) грунта пропускать жидкость или газ под действием перепада давления или напора				
Коэффициент водопроницаемости (фильтрации) k_{Φ}	Скорость фильтрации воды при градиенте напора, равном единице	+	-	-	СП
Просадочность	Способность пород резко уменьшать свой объем при замачивании их водой при определенном давлении				
Относительная просадочность грунта $\delta_{\text{пр}}$	Отношение дополнительного уменьшения высоты образца грунта в результате его замачивания при определенном вертикальном давлении к высоте образца с природной влажностью при природном давлении на глубине отбора образца	+	-	-	СП
Начальное просадочное давление $P_{\text{пр}}$	Минимальное давление, при котором проявляются просадочные свойства грунта при его полном водонасыщении	+	-	-	П
Набухаемость	Способность породы увеличивать объем при увлажнении	+	-	-	П
Упругие свойства породы					
Пластовая скорость упругой волны $v_{\text{п}}$	Скорость распространения упругих волн в одном пласте	+	+	+	СИП
Интервальное время упругой волны Δt	Время распространения упругой волны в среде на расстоянии 1 м	+	+	+	СИП
Поглощение упругой волны	Ослабление интенсивности распространения упругой волны вследствие неидеальной упругости среды	+	+	+	СИП
<i>Электрических свойств</i>					
Удельное электрическое сопротивление пласта горной породы O	Удельное электрическое сопротивление части пласта, не затронутый проникновением промывочной жидкости	+	+	+	СИП
Удельное электрическое сопротивление пластовой воды $O_{\text{пв}}$	Возникновение вторичного электрического поля в горной породе под действием постоянного электрического тока	+	+	-	СИП
Вызванная поляризация в скважине $\eta_{\text{к}}$					

Показатели	Определение	Фаза*			Область** применения
		твердая	жидкая	газооб- разная	
Потенциал вызванной поляризации	Потенциал электрического поля, возникающего в результате поляризации горных пород	+	+	-	СИП
Кажущаяся диэлектрическая проницаемость	Величина диэлектрической проницаемости горных пород, рассчитанная по результатам измерения магнитными зондами по формуле, соответствующей однородной среде	+	+	-	СИП
<i>Магнитных свойства</i>					
Магнитная восприимчивость горных пород χ	Свойство горных пород намагничиваться в геомагнитном поле	+	+	-	СИП
Магнитная проницаемость μ	Способность горных пород концентрировать силовые линии магнитного поля	+	+	-	СИ
<i>Термических свойства</i>					
Коэффициент теплопроводности λ	Физический параметр, характеризующий интенсивность процесса теплопроводности в веществе, численно равный плотности теплового потока q при градиенте температуры $\text{grad } T$, равном единице	+	+	+	ИП
Коэффициент теплоемкости C	Теплоемкость тела, имеющего массу и повышающего температуру на один градус при подведении к нему количества теплоты Q при постоянном давлении	+	+	+	ИП
Коэффициент температуропроводности K	Физический параметр, характеризующий скорость выравнивания температуры в веществе при нестационарной теплопроводности	+	+	+	ИП
<i>Радиоактивность</i>	Вызывается содержанием радиоактивных элементов в породе	+	+	+	СИПР

* Знаком + отмечены фазы, которые характеризуют данный параметр.

** Исследования: гидрогеологическая и инженерно-геологическая съемки С; режимные наблюдения Р; проектирование П; поиски полезных ископаемых И.

лометрический составы: генезис, литогенез, состав флюидов. Совокупность названных составляющих и структура характеризуют обобщенное понятие породы, обладающей определенными свойствами, которые могут закономерно меняться под воздействием внешних условий. При неизменных внешних условиях порода находится в определенном стабильном состоянии и характеризуется определенными показателями состояния. При изменении условий показатели, характеризующие состояние, изменяются».

В конечном счете показатели этого класса должны определять индивидуальный образ исследуемой породы. Поэтому в этот класс включены: показатели гранулометрического состава, степени неоднородности и числа пластичности, характеризующего глинистость; содержание органических веществ и органических остатков; засоленность грунтов. Неотъемлемой характеристикой состава пород является их сложение, отражающее процессы генезиса и литогенеза (если речь идет о естественных геологических процессах) или способы укладки, уплотнения или закрепления (если речь идет об искусственной укладке пород). Показатели сложения существенно влияют на достоверность прогноза поведения пород. Однако до настоящего времени разработке строгих нормативных количественных показателей этого вида уделялось недостаточно внимания.

Второй класс показателей характеризует состояние, в котором находится порода в момент исследования: выветрелость породы, водонасыщенность, уплотненность, консистенцию, температуру, поровое давление, общее напряжение в породе, естественный электропотенциал.

В отличие от показателей первого класса, относительно мало меняющихся во времени, показатели этого класса могут меняться в значительных пределах в зависимости от момента исследования (особенно в зоне аэрации). Это объясняется тем, что жидкая и газообразная фазы являются наиболее подвижными составляющими в данном случае и в силу специфических свойств оказывают значительное влияние на систему в целом.

Третий класс — показатели свойств пород, характеризующие прогнозную оценку поведения пород применительно к изменению условий (состоянию). Показатели класса свойств пород, как правило, определяются путем лабораторных стендовых или других экспериментальных исследований, проводимых во времени. Масштабы моделирования и степени приближения модели к оригиналу обычно разнообразны и зависят от уровня теоретических и экспериментальных достижений. Показатели свойств могут также оцениваться для конкретных пород по показателям состава и состояния.

К показателям свойств относятся показатели сжимаемости, прочности, водопроницаемости, просадочности, набухаемости, несущей способности свай, электропроводности, теплопроводности, теплоемкости, магнитной восприимчивости, газопроницаемости.

Все перечисленные показатели, с разных сторон характеризующие исследуемую породу, зависят от состояния, в котором она находится, и позволяют прогнозировать ее поведение при изменении этого состояния. Выражение показателей состояния и свойств в числовых значениях колеблется для пород различного генезиса и состава.

Для получения количественных значений показателей состава, строения, состояния и свойств пород можно использовать целый

ряд методов и технических средств как в лабораторном, так и в полевом варианте. Поэтому получение комплекса показателей для воссоздания модели (образа) породы регламентируется рядом взаимосвязанных между собой условий.

Этот ряд условий в первом приближении выражается следующим образом: 1) специфика геолого-географических условий изучаемого объекта; 2) цель прогнозирования или проектирования; 3) нормируемые показатели, необходимые для прогноза и проекта; 4) методы, используемые для получения показателей, и способы их комплексирования; 5) требования к техническим средствам, реализующим комплексы методов.

Каждое звено определенными условиями связано со смежными, такими, например, как глубина исследования, объем опробуемой породы, уровень чувствительности методов, сочетание этих методов в комплексе или последовательность их применения (если они реализованы в различных технических средствах), проходимость транспортной базы и др. Каждый из этих вопросов очень важен и требует пристального внимания. Цель прогнозирования или проектирования, как правило, связана с отраслевой ориентацией.

При изысканиях под строительство в первую очередь необходимы нормированные показатели, характеризующие механические свойства пород; при геологоразведочных работах более важны показатели, характеризующие вещественный, минеральный составы исследуемых пород; при мелиоративных исследованиях большое внимание обращается на распределение, состав и передвижение жидкой составляющей породы и т. д.

В то же время, говоря о практическом использовании геологических знаний о Земле, Е. М. Сергеев отмечает, что чаще всего они сводятся к проблемам изучения, залегания полезных ископаемых и использования их для развития промышленности или к инженерно-геологическим исследованиям для различного рода строительства [19]. «...Это главное, чем занимаются геологи. В то же время в меньшей степени земная кора исследуется как среда, с которой связана жизнь и деятельность человека. Эту задачу взяла на себя инженерная геология. Это значит, что каждое инженерное мероприятие должно оцениваться не только с точки зрения возможности его осуществления, но и с позиций того, какое влияние оно окажет на окружающую среду; возможность и рентабельность строительства или другого инженерного мероприятия определяется не только прочностными или деформационными свойствами, но и тем, как то или иное инженерное сооружение «вживается» в природную обстановку. Эффективность любого инженерного мероприятия, его экономичность необходимо учитывать, имея в виду изменение не только геологической, но и всей окружающей среды» [19].

Следует добавить, и это сейчас стало очевидным, что каждая горно-буровая выработка должна давать максимум стандартной инженерно-геологической информации многоцелевого многоразового пользования.

Особенно показательно это для шельфа, где стоимость опробования донных отложений в одном пункте практически исчисляется стоимостью амортизации судов и прямо пропорциональна времени нахождения судна на точке. Естественно, что в таких условиях основной задачей является получение максимума комплексной, стандартной информации об исследуемой породе, введение информации в банк данных, а также многократное использование ее.

Практика многократного исследования одних и тех же геологических объектов различными организациями для определения целей приводит к растрате материальных средств и не дает достаточной информации для создания достоверного макета, пригодного для многоразового использования.

Наглядным примером в этом отношении являются инженерно-геологические исследования на территории Москвы и Московской области. Выходом из создавшегося положения является, на наш взгляд, создание и внедрение в производство изысканий новых технических средств типа пенетрационно-каротажных станций, [6, 22], обеспечивающих получение комплексной информации с точностью показателей на уровне стандартов. Анализ показателей состава, состояния и свойств пород, приведенных в табл. 1, показывает, что большинство из них широко используется и может быть принято за типовой набор показателей, позволяющий строить модель геологического объекта.

4256 При этом в общем случае показатели состава, характеризующие каждую из фаз породы, в сочетании с информацией о строении породы и ее генетических особенностях должны определять полное наименование породы. Кроме того, показатели электрических, магнитных, термических, гравитационных, радиометрических и других свойств пород, получаемые при геофизических исследованиях для оценки инженерно-геологических и гидрогеологических свойств пород в массиве [9], широко используются для поисков и разведки ряда полезных ископаемых [3]. Показатели электрических и магнитных свойств являются ведущими для поисков углей, титана, хрома, никеля, кобальта, железа, магния, талька и дополнительными — для золота, платины, тория, лития, фосфоритов. Радиометрические показатели являются ведущими для урана, тория, редкоземельных элементов, солей натрия и калия и дополнительными — для фосфоритов и циркония. Показатели сейсмичности и гравитации являются ведущими для гипсов, ангидритов, магния железа и дополнительными — для апатитов и нефелинов.

Поскольку состав пород практически определяет их свойства, то и показатели свойств пород должны использоваться для дополнительной оценки их состава, т. е. показатели магнитных, сейсмических, электрических, радиометрических и гравитационных свойств должны использоваться для дополнения прямых показателей состава пород. Такая информация, полученная для пород в массиве, должна характеризовать не только состав, состояние и свойства



пород в естественных условиях, но и регистрировать наличие полезных ископаемых. Особенно важен такой подход при исследовании морских донных отложений.

Как известно, каждому виду породы соответствует определенный диапазон изменения показателей свойств пород. В естественном состоянии каждый вид породы может находиться в любом интервале диапазона. В зависимости от этого при изменении воздействующих на него геофизических полей его поведение будет изменяться в определенных пределах, допускаемых общими возможными границами свойств пород. Эти данные в конечном счете должны обеспечивать представление о свойствах пород всего изучаемого массива, с акцентом на состав слагающих его пород и прогноз их поведения.

МЕТОДЫ И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СВОЙСТВ ПОРОД

Развитие и внедрение полевых методов в практику инженерно-геологических исследований связаны с необходимостью получения информации непосредственно в массиве, в естественных условиях залегания пород. Вызвано это тем, что лабораторные методы наряду с неоспоримыми достоинствами имеют недостатки, к которым относятся: сложность отбора образцов с ненарушенной текстурой и структурой, трудность восстановления их природного состояния, которое необходимо для создания исходных условий при моделировании в лаборатории, изменения, происходящие в образцах в процессе их транспортировки и хранения и др. При исследовании донных отложений шельфа сложность получения геологической информации о породах, слагающих разрез, возрастает во много раз.

Оценивая применяемые в настоящее время способы получения инженерно-геологической информации, можно выделить два технологических варианта: 1) исследование свойств пород путем отбора образцов ненарушенного или нарушенного сложения из горных выработок и исследование их в лабораторных условиях (сюда же относится исследование образцов на месте отбора пород с помощью лабораторных приборов, размещенных на передвижной транспортной базе); 2) оценка показателей свойств пород непосредственно в массиве. В последнем случае возможны две технологические схемы исследования свойств пород: а) в стенках скважин или горных выработках; б) при внедрении в массив специальных зондов, обеспечивающих в процессе их погружения непрерывное получение комплексной информации о свойствах пород. Каждый из перечисленных вариантов получения информации имеет сильные и слабые стороны. В связи с этим они в большинстве случаев применяются совместно в различных сочетаниях и комбинациях.

Исследование свойств пород в выработках

Не останавливаясь подробно на этом способе получения информации, отметим лишь тенденции его развития. Технология этого процесса состоит из четырех стадий и сводится к созданию горной выработки (скважины), отбору образцов породы по мере проходки выработки и описанию ее, консервации и доставке образцов в лабораторию для последующего исследования.

Каждая из трех операций представляет собой вполне самостоятельное звено, которое имеет свою историю развития, определен-

ные функции, а также возможности, ограниченные постановкой задачи, геологическими условиями или применяемыми техническими средствами. Конечной целью этой технологической цепочки является получение определенного объема информации о составе и свойствах пород. Чаще всего объем и виды этой информации определяются отраслевыми нормативно-методическими документами.

Так, говоря о проходке горно-буровых выработок, отметим, что это вполне самостоятельное направление, основными функциями которого являются проходка горных пород, вскрытие исследуемых пластов и отбор образцов пород. В последнее время в этой области достигнут значительный прогресс, выразившийся в совершенствовании технологии проходки скважин (разработке новых способов проходки), создании новых конструкций буровых станков и универсализации станочного парка. Как известно, наиболее широко при инженерно-геологических исследованиях используются буровые установки: Д-5-25, ДУКС-ЛГТ, УБП-15М, БУЛИЗ-15АП, АВБ-2М, АВБ-3, УГБ-1, УРБ-2, УГБ-50М, ЛБУ-50.

Эти станки успешно используются для бурения скважин глубиной до 50 м. Однако следует отметить, что транспортные базы их при использовании в тяжелых дорожных условиях (на заболоченной территории, на мерзлых породах, крутых склонах и оползнях) не обеспечивают функциональных требований.

Что касается главной цели — получения геологической информации, то в части совершенствования технологии отбора проб, особенно для взятия ненарушенных образцов слабых пород (илов, старичных отложений, водонасыщенных песков и т. д.), значительного прогресса не наблюдается.

Наибольшие трудности в этом вопросе проявляются при инженерно-геологических исследованиях донных отложений на шельфе. Так, для обоснования проектов сооружаемых буровых платформ требуется детальное исследование состава и свойств пород до глубин 100—150 м по грунту (при глубине воды до 200 м).

Сейчас в СССР, как правило, для работы на шельфе используется то же буровое оборудование, что и на суше, установленное на специальных плавсредствах или судах. Проблема получения образца с ненарушенной структурой в этих условиях по сравнению с сухопутными усложняется во много раз из-за необходимости стабилизации судна на точке.

Состав исследований, выполняемых в грунтовых лабораториях для оценки состава и свойств пород, а также технические средства, применяемые при этом, давно стабилизировались. Однако для замены традиционных трудоемких процессов определения показателей и свойств пород (влажности, плотности, дисперсности, пластичности, тепловых, электрических и др.) требуется разработка новых методов и конструирование принципиально новых технических средств, обеспечивающих получение высококачественной информации.

В практике лабораторных исследований относительно мало

применяются радиоизотопные методы. Слабо развиваются методы изучения пород при заданных объемно-напряженных состояниях ее, недостаточно используется электронное оборудование для программирования и проведения эксперимента. Кроме того, совершенствование лабораторных приборов и техники зачастую не координируется в различных научных и производственных организациях. Поэтому наблюдается большое число модификаций лабораторных приборов и других технических средств, что ведет к несопоставимости получаемой информации.

Поскольку наша основная цель — рассмотреть и проанализировать полевые методы и технические средства оценки свойств пород, мы не будем останавливаться на оценке лабораторных методов. Отметим только, что они в большинстве случаев остаются основой для получения стандартной информации о составе, состоянии и свойствах пород, использующейся кроме прямого назначения в качестве основы для количественной интерпретации информации, получаемой полевыми методами.

В последние годы значительно возрос интерес к шельфу (и прежде всего к его верхней части) как к объекту строительства.

Основным подготовительным этапом при строительстве, разведке и добыче полезных ископаемых на море являются исследования геологического строения и физико-механических свойств морского дна. Сложность проведения таких исследований и жесткие требования к достоверности и представительности получаемых данных обусловлены особенностями возведения и эксплуатации сооружений на морском дне.

Накопленный отечественный и зарубежный опыт инженерно-геологического изучения шельфа показывает, что в морских условиях изменяются организация и сложившийся комплекс методов, обычно применяющихся на суше. Немаловажным фактором при этом являются значительно более сложные условия получения необходимой информации. Важно также обеспечить одновременное получение целого ряда количественных характеристик. Успешное освоение минеральных ресурсов шельфа и возведение морских гидротехнических и подводных сооружений и установок, морских портов, связано прежде всего с созданием и использованием новой техники для проведения инженерно-геологических изысканий.

Основной целью инженерно-геологических исследований является получение наиболее полной информации о грунтах при помощи широкого комплекса современных методов, включающих геофизические исследования, бурение неглубоких скважин, отбор проб, прессиометрию, пенетрационный картаж и др. Выбор технических средств и технологии исследований зависит также от ряда специфических свойств донных отложений, связанных с условиями их формирования и залегания, а именно: 1) сложности и трудоемкости отбора образцов (особенно в илистых и песчаных отложениях); 2) неизбежного нарушения структуры образцов вследствие разгрузки от природного гидростатического давления; 3) насыщения донных грунтов электролитами определенных со-

ставов; 4) наличия в пылевато-глинистых грунтах скоплений газов, заполняющих часть пор и др.

Наиболее перспективны и совершенны взаимно дополняющие друг друга методы при совместной интерпретации получаемой информации. И прежде всего подводные пенетрационно-каротажные методы, позволяющие получать физико-механические характеристики грунтов в условиях их естественного залегания.

БУРЕНИЕ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СКВАЖИН. В настоящее время как в СССР, так и за рубежом накоплен определенный опыт проведения морских инженерно-геологических исследований, объем которых постоянно увеличивается благодаря инженерной разведке и освоению морских месторождений полезных ископаемых.

Инженерно-геологические исследования производятся по двум направлениям: а) бурение инженерно-геологических скважин с отбором образцов грунтов и изучением последних в лабораториях; б) проведение инженерно-геологических работ с помощью специальной аппаратуры в естественных условиях.

Морскому бурению присущи свои специфические черты: 1) относительно небольшая глубина скважин, определяемая видом проектируемого сооружения, характером добычных или строительных работ и геологическими условиями; 2) чрезвычайное разнообразие геологических и гидрометеорологических условий; 3) непрерывный отбор кернa из всех разновидностей грунтов с сохранением структурных и текстурных особенностей; 4) отбор из скважин образцов с ненарушенным природным сложением; 5) проведение различных опытных и геофизических работ в скважинах.

Успешное и эффективное выполнение буровых работ возможно только при наличии специальных плавсредств, оборудованных буровыми и пенетрационными установками, приборами для отбора проб грунта со дна моря, приспособленными к работе в условиях качки.

Несмотря на то, что неглубокое морское бурение не достигло того уровня технического прогресса, который наблюдается в морском бурении на нефть и газ, и здесь имеются существенные достижения.

Технология и способы бурения. Выбор способа бурения зависит главным образом от геолого-литологического строения участка, глубины моря, гидрометеорологического режима района работ и поставленной инженерно-геологической задачи.

Для бурения в рыхлых и слабосцементированных отложениях наиболее широко применяют станки ударно-забивного и вибрационного действия, для проходки скважин в плотносцементированных породах — колонкового бурения. Рыхлые осадки успешно опробуют буровыми гидравлически всасывающими устройствами, работающими по принципу эрлифта или засасывания пульпы вакуумными насосами. Применяют также бурение: медленновращательное, шнековое и другие способы. Эффективность использования в различ-

ных условиях и устройство технических средств бурения рассматриваются в специальных работах.

Основным освоенным способом бурения рыхлых отложений в прибрежной зоне шельфа является ударно-забивной (и частично вибрационный) с поинтервальным опробованием забивными стаканами и желонками. Такое бурение проводится с опережающей или одновременной обсадкой скважин трубами. Обсадные трубы забивают ударным инструментом, состоящим из ударной штанги с дополнительными грузами. Масса этого инструмента зависит от диаметра и глубины бурения и колеблется от 300 до 550 кг, высота сбрасывания составляет 2,0—2,5 м. Желонированием проходят водонасыщенные илы и мелкозернистые пески, которые плохо удерживаются в забивных стаканах. Забивают стакан в породе ударной штангой длиной 2,5—3,0 и массой 120—200 кг, высота подъема ударной штанги до 7 м. Средняя производительность при бурении составляет около 20 м в смену.

Ударно-забивной и вибрационный способы позволяют осуществлять бурение скважин без жесткой связи между буровой колонной и плавучей буровой установкой, в результате чего качка плавучего основания не оказывает существенного влияния на процесс бурения.

Однако, ударно-забивной способ не обеспечивает качественной проходки скважин в валунных осадках и россыпях. Для сложных горно-геологических условий наиболее перспективны установки комбинированного, в частности, ударно-вращательного бурения.

Колонковое бурение имеет гораздо меньшую область применения в сложных гидрометеорологических условиях по сравнению с ударно-забивным. Преимущество этого способа заключается в том, что он используется при бурении всех разновидностей грунтов.

В 1975 г. Тихоокеанской экспедицией объединения «Южморгео» проводились опытные исследования по выработке методики и технологии механического вращательного колонкового бурения с научно-исследовательских судов на шельфе в районах с различными гидрометеорологическими и гидродинамическими условиями.

Бурение велось со сложным отбором керна и с промывкой морской водой. Существенным недостатком метода была малая механическая скорость бурения вследствие незначительной нагрузки на забой, связанная с невозможностью использования большого числа утяжеленных бурильных труб при сравнительно небольших глубинах моря.

Эти работы показали возможность бурения скважины методом механического вращательного бурения с малотоннажных судов в районах со сложными гидрометеорологическими условиями.

Наш и зарубежный опыт свидетельствует о перспективности гидромеханического способа бурения, при котором порода на забое скважин разрушается механическим и гидравлическим воздействием и выдается на палубу плавучего основания по шлангу в виде смеси с водой. Обсадные трубы при этом погружаются под действием собственного веса или вибратора. Внедрение этого способа

позволит существенно удешевить бурение морских скважин, повысить производительность при бурении скважин в песках с примесью гальки и возможностью работы без жесткой постановки плавучего основания в точке бурения. Значительным недостатком является невозможность бурения глинистых, валунистых и коренных пород, а также нарушение литологической колонки разреза и невозможность оценки показателей состояния пород.

Характеристики используемых судов. В прибрежной зоне моря широко применяют самоходные и несамоходные плавучие буровые установки.

Специфической особенностью выполнения плавучих буровых установок является то, что любая морская установка имеет две органически связанные основные части — плавучее основание и буровой агрегат, выбор конструктивных параметров которых определяется эксплуатационно-техническими требованиями изучения объектов в конкретной геологической (и гидродинамической) обстановке.

Понтонные буровые установки обычно монтируются из стандартных понтонов. Эти установки могут состоять из двух или трех понтонов, соединенных поперечными связями. Площадь плавучего основания достаточна для установки легких буровых станков типа УПБ-25, УБР-2 и др. При бурении в районах с частым волнением и в приливно-отливных зонах с неровным дном применяют понтоны с выдвинутыми опорами.

Установки ударно-канатного бурения представляют собой легкие буровые средства типа БУКС-ЛГТ, УБР-2, размещенные на понтонах или баржах. Глубина скважин не превышает 100 м при глубине моря до 80 м. Для периодического подъема и сбрасывания ударного инструмента при бурении или забивке обсадных труб используют лебедки станков вращательного бурения. После установки понтона на якоря опускают и заглубляют в грунт обсадные трубы и ведут проходку скважины с помощью ударно-забивного снаряда или долота, желонки.

При организации бурения легкими буровыми установками, смонтированными на малотоннажных судах исследователи сталкиваются со значительными трудностями.

Инженерно-геологическое бурение на шельфах проводится с помощью серийно выпускаемых буровых установок сухопутного исполнения (ЗИФ-650 и СБА-150), смонтированных на среднетоннажных судах или баржах. Такие варианты обеспечивают проходку скважин при глубинах моря, не превышающих 45 м.

Глубина бурения в значительной степени ограничивается возможностью извлечения обсадных труб из рыхлых отложений. Проходка последних осуществляется главным образом ударным бурением с погружением обсадных труб при помощи забивного патрона. Такой способ вызывает деформацию керна, часто возникает свайный эффект.

Попытки применения сухопутных станков вращательного бурения на морских плавучих буровых установках свидетельствуют об

их низкой эффективности из-за качки плавучего основания и частых поломок буровой колонны. Поэтому плавучая буровая установка (МПБУ) «Днепр-1» была переоборудована для бурения скважин в рыхлых отложениях ударно-забивным способом.

Комбинированное бурение предусмотрено с несамходной плавучей буровой установкой типа УБМУ-1, которая оборудована стабилизированным вращателем с гидромотором, обеспечивающим медленное вращение буровой колонны при крене плавучего основания до 7° и амплитуде колебаний его до 0,8 м. Кроме того, установка позволяет бурить скважины ударно-забивным, гидромеханическим и вибрационным (в сочетании) способами. Начальный диаметр бурения 219 мм, максимальная глубина скважин 30 м, моря — 50 м.

Используются также переоборудованные рыболовные и транспортные суда. Примерами могут служить катамаран «Амур-1» и самоходное плавучее буровое основание «Геофизик», представляющее собой переоборудованное судно СРТ-300; плавучая буровая установка «Амур-1» применяется для проходки ударно-забивным способом скважин глубиной до 25 м при глубине моря до 30 м. Работы по бурению на шельфе с судна «Геофизик» проводились при глубине моря 8—21,5 м, высоте волн до 1,5 м, скорости ветра до 11 м/с. Проходка скважин велась методом механического вращательного колонкового бурения, глубиной до 25 м.

Для детального изучения геологии и успешной интерпретации геофизических данных потребуются бурение скважин глубиной до 200 м при глубинах моря до 200 м.

Учитывая сравнительно большую массу бурового и пенетрационно-каротажного оборудования, а также необходимость продолжительного автономного плавания и выполнения на борту судна основных объемов лабораторных исследований, следует ориентироваться на создание судов большого (около 2000 т) водоизмещения.

Специально для проведения инженерно-геологических работ создана плавучая установка «Геолог-1», представляющая собой двухвинтовое дизельное судно-катамаран. Каждый корпус катамарана — это понтон с подрезами. Понтоны соединены мостом, имеющим прорезь для спуска обсадных и бурильных труб и подводной аппаратуры. В случае необходимости конструкция плавучего основания предусматривает быстрый отвод установки со скважины без извлечения обсадных труб.

На катамаране смонтированы буровая установка УГБ-50М с электроприводом, подводная пенетрационно-каротажная станция ПСПК-60 и сейсмоакустическая станция «Грунт».

В подавляющем большинстве случаев при установке сухопутного бурового оборудования серийные суда или понтоны не оснащали приспособлениями для ведения работ в сложных гидрометеорологических условиях (в том числе и компенсаторами качки). Поэтому плавучие буровые установки такого рода обладают рядом недостатков.

Проведение работ по бурению и отбору проб при инженерно-геологических исследованиях в СССР регламентируется требованиями ГОСТ 1271—72.

Пробоотборники. Опыт морских геологоразведочных работ, проводившихся с целью инженерно-геологических исследований подводных грунтов, показал высокую эффективность и целесообразность использования на начальных стадиях легких технических средств (ЛТС), в частности, колонковых пробоотборников, позволяющих оперативно, без применения буровой техники, изучать литологический разрез верхних слоев морских отложений.

Длительное применение пробоотборников в морских геологических исследованиях привело к созданию множества конструкций. Но при более пристальном изучении работы этих устройств становится понятно, что, несмотря на конструктивное разнообразие, пробоотборники имеют ряд общих черт, которые определяются не только общностью назначения и области применения, но и условиями взаимодействия прибора с грунтом при отборе пробы.

По способу погружения в грунт колонковые пробоотборники подразделяются на гравитационные, ударно-забивные, гидравлические, гидростатические и вакуумно-гидростатические, вращающиеся, выстреливаемые и т. д.

Ударные гравитационные трубки представляют собой трубы из нержавеющей стали разной длины и диаметра. Они вдавливаются в донные осадки под действием собственного веса. В хвостовой части трубки имеется оперение, позволяющее ей при падении сохранять в воде строго вертикальное положение. Отобранный грунт удерживается в трубе при ее поднятии специальной головкой и системой гибких металлических лепестков.

При морских геологоразведочных работах используют ударные трубки диаметром 50—127 мм и длиной 6—7 м. Они удобны в работе, но глубина опробования составляет 3—4 м. При работе с ударными трубками следует учитывать уплотнение осадка при ударе трубки о грунт, возможность подпрыгивания трубки на плотных грунтах с последовательным отбором поверхностных проб в разных местах.

Вибрационные пробоотборники внедряются в грунт под действием направленной вертикальной вибрации и силы собственного веса вибратора. При морских исследованиях широко применяется вибропоршневая грунтовая трубка ВПГТ-59, позволяющая отбирать колонки песчано-глинистых грунтов, не содержащих крупных включений.

В установке ТУВВ-150 взамен электровибратора используется гидровибратор. Морская вода подается в гидровибратор по нагнетательному шлангу насосом, смонтированным на плавсредстве. Гидровибратор работает в виброударном режиме, поэтому внедрение трубки возможно не только в песчано-глинистые, но и в валунно-галечные грунты. К недостаткам вибрационных пробоотборников следует отнести быстрое возникновение свайного эффекта и нару-

шение естественного сложения грунтов вследствие смещения частиц, вызванного вибрацией.

Ударно-забивные пробоотборники приводятся в действие энергией сжатого воздуха в виде ударных импульсов. Пробоотборник погружается не только в мягкие, но и в плотные, грунты, в том числе в отложения с высоким содержанием крупнообломочного материала. Погружение трубки происходит очень быстро и практически не влияет на инерцию керна, находящегося в трубке.

Гидравлические пробоотборники. Погружение происходит за счет размыва грунта струей воды. К приборам данного типа относится пробоотборник ПО-70, предназначенный для отбора проб неконсолидированных водонасыщенных донных пород и представляющий собой модернизированный вариант пробоотборника, разработанного для отбора проб пляжных песков. Достоинством данного типа является хорошая сохранность естественного сложения извлекаемого на поверхность грунта. Его особенность состоит в значительном уменьшении трения о грунт благодаря применению прямой промывки и в снижении трения образца о стенки керноприемной трубы вследствие использования съемного рукава из лавсановой пленки.

Заглубление гидростатических и вакуумно-гидростатических пробоотборных устройств происходит за счет гидростатического давления столба воды, атмосферного давления, а также кинетической энергии падения.

Трубка грунтовая гидростатическая ТГ-1-80 предназначена для отбора проб грунта из верхних слоев донных отложений при проведении региональных инженерно-геологических исследований и картировании верхних слоев донных отложений. Преимущество этого устройства заключается в том, что оно может отбирать пробы донных отложений (от слабых водонасыщенных слоев до плотных моренных глин и суглинков) с минимальным нарушением их естественной структуры, а также в низкой стоимости пробы. Малые габариты и масса трубки позволяют использовать ее с малотоннажных неспециализированных плавсредств без постановки судна на якорь.

Одним из вакуумно-гидростатических пробоотборников является прибор ВГП-6. Необходимо отметить положительный опыт применения в отдельных случаях вибропоршневой трубки ВГПТ-56, вакуумно-гидростатического колонкового пробоотборника ВГП-6, вибронзда конструкции ПТГУ.

Проведены испытания и рекомендованы к серийному производству три основных типа пробоотборников (ВГП-6, ПО-70, ПГУ-72). ВГП-6 (вакуумно-гидростатический пробоотборник) состоит из герметичной колонковой трубы с клапаном на нижнем конце, который срабатывает при ударе о грунт. ПО-70 (гидропробоотборник) представляет собой две концентрично установленные трубы. Внутренняя колонковая труба снабжена клапаном с эластичным рукавом для приемки керна. В межтрубное пространство под рабочим давлением 40—70 Па подается вода, размывающая стенки

скважин. Прибор ПО-70 заглубляется в грунт под действием собственного веса. ПГУ-72 — это колонковая труба, снабженная клапаном для удержания керна и армированная внутри капроновыми втулками, она заглубляется в грунт под действием вибрации, создаваемой гидровибратором.

ЛАБОРАТОРНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ГРУНТОВ ПРИ МОРСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ. Комплекс лабораторных исследований направлен на изучение гранулометрического, минерального и химического состава грунтов, определение их физико-механических характеристик и физико-химических свойств.

Лабораторные исследования проводятся с различной полнотой и подразделяются на стандартный и нестандартный комплексы. Определения выполняются стандартными методами, а предъявляемые к ним требования нормируются государственными стандартами. Пробы и монолиты грунтов для лабораторных исследований оформляются и упаковываются в соответствии с ГОСТ 12071—72 и 20885—75. Часть определений — влажности, естественной объемной массы, пределов пластичности, прочности (конусным методом) — целесообразно выполнять в судовой лаборатории.

По результатам лабораторных исследований выдаются следующие обязательные показатели свойств грунтов: 1) гранулометрический состав (ГОСТ 12536—79); 2) удельная и объемная масса (ГОСТ 5181—78 и ГОСТ 5182—78); 3) естественная влажность (ГОСТ 5180—75); 4) влажность на границах текучести и раскатывания (ГОСТ 5183—77); 5) коэффициент сжимаемости, модуль деформации (ГОСТ 23908—79); 6) угол внутреннего трения, удельное сцепление (ГОСТ 12248—78), предел прочности (временное сопротивление) при одноосном сжатии.

При определении физико-механических характеристик и физико-химических свойств грунтов находят применение и нестандартные методы. Это относится к изучению таких показателей, как величины и изменчивость порового давления грунтов в условиях морской среды, скорость дилатансии, прочность грунта при переменных нагрузках, тиксотропность, липкость, электропроводность и др.

Среди нестандартных методов, сегодня еще недостаточно используемых, особо важное значение при исследовании морских грунтов имеет стабилметрический метод. В стабилметре образец в виде цилиндра диаметром 30—36 мм и высотой 150—200 мм наряду с осевым одновременно подвергается боковому давлению.

МЕХАНИЧЕСКИЙ И ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ КАРОТАЖ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СКВАЖИН. Результаты лабораторного изучения образцов, извлеченных колонковыми пробоотборниками, не всегда точно характеризуют физико-механические свойства грунтов. Объясняется это тем, что в лаборатории испытывается грунт с частично нарушенной структурой. В таких грунтах, как рыхлые пески и глины текучей и текучепластичной консистенции, слагающих обширные участки морского дна, очень трудно (а во многих случаях невозможно) отобрать образцы с ненарушенной

структурой. Поэтому при инженерно-геологических изысканиях в акваториях большое значение приобретают методы исследования свойств грунтов непосредственно в буровых скважинах. К этим методам относится геофизический каротаж.

Механический каротаж. Для исследования свойств грунтов в морских скважинах проводят испытания штампом, прессиометрию, динамическое и статическое зондирование, вращательный срез, искиметрию.

Испытания штампами применяются при инженерно-геологической разведке участков предполагаемого строительства сооружений. Результаты испытаний используются для определения модуля деформации (сжимаемости) крупнообломочных, песчаных и глинистых грунтов. Метод имеет много вариантов, выбор которых зависит от местных условий, характера испытываемых грунтов, проектируемого сооружения. Такие испытания проводят в буровых скважинах диаметром не менее 325 мм. Бурение ведут ударно-канатным, вибрационным, вращательным способами. С глубины 1,0—1,5 м выше отметки испытания скважину бурят с особой осторожностью, чтобы как можно лучше сохранить забой скважины в ненарушенном состоянии. После окончания бурения забой скважины тщательно зачищают и в скважину опускают штамп на трубах диаметром 219 мм. Для измерения осадок штампа применяют прогибомеры или самопишущие устройства.

Испытания статической нагрузкой проводятся плавным приложением ступеней нагрузки. Размеры ступеней нагрузки регламентирует ГОСТ 12374—77. Испытания штампами весьма громоздки и длительны. Использование этого метода на шельфе затруднено.

Опыт применения штампов в подводных условиях показывает, что такие испытания целесообразны при использовании упрощенных устройств погружных установок или корпусов подводных агрегатов для приближенной оценки несущей способности поверхности дна. Представляет интерес использование в качестве штампа корпуса погружной установки подводной станции пенетрационного каротажа (при размещении на илистом дне).

В последние годы широко используется прессиометрический метод определения некоторых физико-механических характеристик грунтов. Прессиометрия весьма перспективна при морских изысканиях благодаря незначительному влиянию внешних воздействий на проведение опыта, простой технологии и малым затратам времени на испытание. Метод основан на обжатии грунтов в буровой скважине с измерением давления обжатия и соответствующих деформаций.

Все отечественные и зарубежные конструкции зондов (пенетрометров) просты и состоят из задавливающего (при статическом зондировании) или ударного (при динамическом зондировании) устройства; штанг, передающих усилие на основной элемент зонда — конус (породоразрушающий инструмент); измерительного блока (измерение давления на конус и деформаций зонда). В СССР применяют зонды конструкций ЦНИИС, ДИИТ, НИИОСП; за

рубежом метод стандартной пенетрации (масса молота и высота его падения стандартизованы) широко используют в США, Франции, Швеции и других странах.

Результаты прессиометрических испытаний дают возможность получить следующую информацию: 1) горизонтальное напряжение грунта; 2) прочность недренированной глины на сдвиг; 3) угол трения песка; 4) модуль деформации.

Нарушение грунта при внедрении в него пенетрационных устройств является одной из важных проблем, хотя самозабуривающийся прессиометр представляет собой значительную модификацию оригинального варианта. Этот прессиометр имеет ряд преимуществ перед традиционным оборудованием: 1) при внедрении не нарушается сложение грунтов; 2) это единственный полевой прибор, позволяющий установить связи напряжения и деформации; 3) он устанавливает фактическое поведение грунта в условиях циклической нагрузки.

Несмотря на ценность получаемых с помощью прессиометра данных, отмечается сложность их интерпретации, несоответствие условий испытаний грунтов горизонтальными нагрузками условиям работы под действием вертикальных нагрузок, что объясняется анизотропией свойств грунтов. Прессиометрии свойственен тот же недостаток, что и лабораторным испытаниям грунтов, данные носят «точечный» дискретный характер.

Методы динамического и статического зондирования позволяют расчленить разрез, оценить степень однородности и выдержанности пород по сопротивлению пенетрации, приблизительно оценить показатели некоторых свойств грунтов, определить несущую способность свай, выбрать места расположения опытных площадок для более детального изучения физико-механических свойств грунтов.

Динамическое зондирование заключается в забивке специального конуса с углом при вершине 60° с определением сопротивления грунта. Такое зондирование, как правило, используется на площадках с заранее изученным геологическим строением. Примером весьма совершенной конструкции может служить установка динамического зондирования, разработанная французской фирмой «Сермэ». Основные отличительные особенности этой установки — автоматизированный пневматический привод ударного механизма и автоматическая запись результатов испытаний, благодаря чему повышается точность и эффективность исследований.

Для проведения статического зондирования применяются несколько конструкций зондов и измерительных устройств. Зондирование, как правило, производится стержневым составным зондом с защитной трубой или сплошным зондом с муфтой в призабойной части зонда. Аналогичные зонды применяются и в ряде стран (США, Нидерланды, Бельгия и др.).

Исследования показали, что при зондировании стандартными стержневыми зондами и измерении с поверхности общего сопротивления внедрению зонда и сопротивления внедрению наконечника представительные данные могут быть получены только до глубины

5 м. При больших глубинах стержневой зонд изгибается вследствие потери устойчивости. В морских условиях целесообразно применять погружные герметичные агрегаты.

Испытание вращательным срезом, позволяющее получать очень важную прочностную характеристику глинистых грунтов — сопротивление сдвигу, заключается в плавном погружении крестообразной лопасти (крыльчатки) в грунт на забое скважины и замера крутящего момента при повороте крыльчатки (ГОСТ 21719—80). Однако из-за жесткой связи зонда с поверхностью, его нельзя применять в условиях волнения, приливов и других колебаний уровня моря.

Искиметрия заключается в непрерывном измерении сопротивления песчано-глинистых грунтов резанию, осуществляемому прибором с режущим профилем. Определение этого сопротивления, характеризующего прочностные свойства грунтов, дает возможность при помощи искиметрии оценить изменение прочности грунтов по разрезу и степень их однородности. Выполняются испытания одновременно с извлечением обсадных труб и поэтому почти не требуют дополнительных затрат времени.

Геофизический каротаж. Для исследования морских инженерно-геологических скважин применяются различные методы геофизического каротажа, в частности радиоактивный. Методы радиоактивного каротажа включают гамма-каротаж (ГК), гамма-гамма-каротаж (ГГК), нейтрон-нейтронный каротаж (ННК), нейтронный гамма-каротаж (НГК).

Гамма-каротаж применяется для определения содержания глинистых частиц в грунте и расчленения литологического разреза. Этот метод позволяет выявить слои и прослои наиболее слабых грунтов — илов, которые нередко остаются незамеченными при бурении скважин. Метод ГГК применяется при определении плотности грунтов в естественном залегании и расчленении литологического разреза. ННК позволяет определить влажность грунтов. НГК применяется для определения влажности грунтов, расчленения литологического разреза и оценки минералогического состава грунтов. Каротаж проводится в трубках диаметром 36—50 мм, погружаемых в грунт задавливанием, забивкой или вибрационным методом.

Опробование пород в выработках

Спецификой применяемой в данном случае технологии является необходимость (как и в предыдущем случае) предварительной проходки горных выработок (шурфы, скважины) и специальной подготовки к геофизическим исследованиям. К этой категории методов, широко используемых в практике геологических исследований, относится большое число каротажей.

Наиболее часто при инженерно-геологических исследованиях применяют разновидности механического каротажа (опытные нагрузки на штампы в шурфах и скважинах, прессиометрию, враща-

тельный срез, дилатометрию, искиметрию), а также акустический сейсмический, магнитный, электрический, радиоактивный, термический и другие каротажи.

В связи со спецификой технологий этих исследований вопросы бурения скважин приобретают первостепенную значимость. При этом возникает целый ряд проблем, связанных с качественной стороной процесса бурения скважин и в первую очередь с вопросом влияния способа проходки скважины на результаты последующих каротажей, выполняемых в скважинах [10].

Механический каротаж

Методы механического каротажа пород отличаются от других геофизических методов тем, что возможность повторения опыта в одном и том же интервале глубин или с одним и тем же образцом породы невозможна. Опыт можно повторить только с аналогичным образцом. Вторым существенным отличием является влияние масштаба эксперимента на его результаты. Этот эффект имеет место не только при механических испытаниях, но и при испытаниях пород другими геофизическими методами, однако в первом случае он проявляется четко даже в однородных породах.

Механические способы испытаний пород, как правило, используют для получения количественных деформационных, прочностных или других (комбинированных) показателей свойств пород на уровне стандартов.

СЖИМАЕМОСТЬ ПОРОД. В качестве показателя сжимаемости пород в большинстве случаев используется модуль общей деформации породы. Под действием нагрузок грунт деформируется. Характер и величина деформации зависят от природы грунта, способа нагружения и граничных условий деформирования грунта.

Основными природными факторами, определяющими деформационные свойства грунтов, являются его структура и текстура, состав и концентрация порового раствора, химико-минеральный состав грунта, температура окружающей среды. Деформируемость грунтов зависит главным образом от структуры грунта, т. е. дисперсности, плотности и расположения частиц в пространстве и связей между ними. Так, плотные коренные глины под действием внешнего давления деформируются значительно меньше, чем молодые илистые грунты, а рыхлые мелкозернистые пески будут деформироваться в значительно большей степени, чем плотные разнородные пески. Изменение температуры проведения опыта, а также состава и концентрации порового раствора будет оказывать существенное влияние на деформируемость дисперсных глин и практически не будет влиять на деформируемость песков и т. д.

В зависимости от способа нагружения грунта различают деформации грунта при статическом (ступенчатом), ударном и динамическом способах приложения давления. Наиболее часто определение деформационных свойств грунтов оснований сооруже-

ний производится при ступенчатом нагружении. В особых случаях гидротехнического, дорожного и антисейсмического строительства производится изучение деформационных свойств грунтов при действии ударной нагрузки (трамбование, взрыв и т. д.), вибрации, а также гидростатического, главным образом отрицательного (капиллярного), давления, возникающего при водопонижении в дисперсных грунтах.

В зависимости от граничных условий выделяют деформацию грунта: 1) без возможности бокового расширения (при ступенчатом изменении нагрузки — компрессия, а при действии постоянной нагрузки — консолидация); 2) при свободном боковом расширении (одноосное сжатие); 3) при регулируемом боковом расширении или давлении (испытание в приборах на трехосное сжатие).

Полевые методы испытания пород по сравнению с лабораторными позволяют более правильно отразить влияние структурно-текстурных особенностей грунта на его деформируемость, однако в силу сложности проведения опытов они, как правило, используются в небольших объемах.

В полевых условиях обычно изучают деформационные свойства грунтов в условиях, допускающих частичное боковое расширение при ступенчатом изменении нагрузки (метод пробных нагрузок). При помощи этого метода исследуют деформационные свойства главным образом несвязных и трещиноватых скальных грунтов, так как отбор характерных образцов из них затруднен, а иногда и невозможен.

Достоверный прогноз поведения грунта под нагрузкой может быть дан только при условии определенного сочетания результатов полевых и лабораторных методов исследования. Сжимаемость грунтов в полевых условиях в большинстве случаев определяют статическими нагрузками на грунт посредством штампов (площадь 2500—10 000 см²), устанавливаемых в шурфах, или с помощью штампов в форме круга (площадь 600 см²), устанавливаемых в скважинах. Использование последних ведет к сокращению общей нагрузки на штамп, что облегчает проведение опытов.

Исследования, проведенные в Советском Союзе и за рубежом, свидетельствуют о значительном влиянии размера штампа на деформацию исследуемого грунта.

Графическая зависимость осадки штампов от их размеров приведена на рис. 1. Здесь же указаны границы, позволяющие установить существование трех специфических зон. В зоне I, ограниченной размерами штампа 18×18 см, отмечается обратно пропорциональная связь между площадью штампа и его осадкой. В зоне II, ограниченной размерами штампа от 18×18 до 30×30 см, осадка штампа не зависит от площади. В зоне III, включающей штампы размером 30×30 см и больше, осадка штампа прямо пропорциональна площади. Примерно такая же картина была получена для пылеватых суглинков, однако границы зон несколько смещены. Очень важным вопросом является надежность зачистки забоя скважины при установке штампа ниже уровня грунтовых вод.

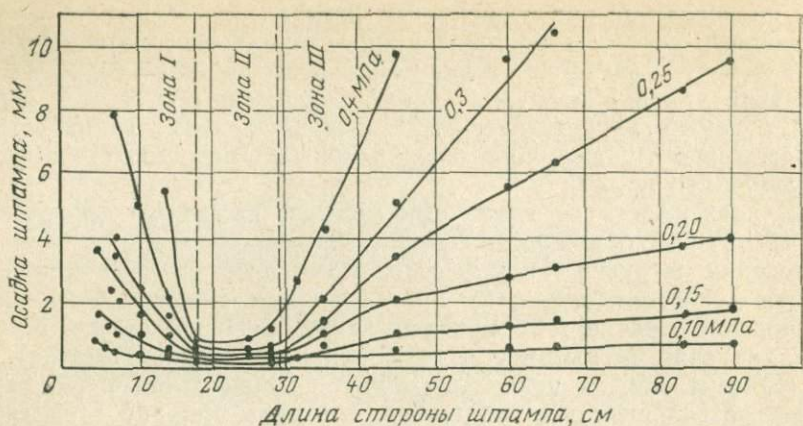


Рис. 1. Графики зависимости осадки штампа от его площади (по Прессу)

В процессе нагружения грунта посредством штампа наблюдаются три стадии развития деформации: а) уплотнение, характеризующее сжатием скелета определенного объема грунта при относительной неподвижности грунта, окружающего эпицентр давления; б) сдвиги, соответствующие предельному равновесию грунта в боковых стенках; в) разрушение, характеризующее полным разрушением грунта боковых стенок, конусообразный уплотненный объем грунта на этой стадии перемещается вместе со штампом вниз, почти не встречая сопротивления, а боковой выпор происходит совершенно свободно, так как сопротивление боковых стенок отсутствует.

Последняя стадия характеризуется нарушением предельного равновесия внутри массива и подчиняется его уравнению

$$\sigma_{\max} = Ah + Bb + Dc, \quad (1)$$

где σ_{\max} — нагрузка на грунт на пределе его несущей способности; h — высота слоя грунта, составляющего «пригрузку» за пределами штампа (глубина заложения фундамента); b — ширина штампа; c — сцепление грунта; A, B, D — постоянные для исследуемого грунта коэффициенты, зависящие от угла внутреннего трения φ и объемной массы $\gamma_{\text{об}}$.

ОПЫТНЫЕ НАГРУЗКИ НА ШТАМПЫ. Характерные образцы оборудования, используемого в настоящее время для испытания грунтов опытными нагрузками на штампы в шурфах и скважинах, приведены на рис. 2, 3, 4. Схема нагрузочной установки фирмы «Борро» (см. рис. 4) примечательна тем, что нагрузочная плита погружается в грунт путем завинчивания (без проходки шурфа или скважины). После окончания испытания на первом интервале глубины она завинчивается на следующий, находящийся на более

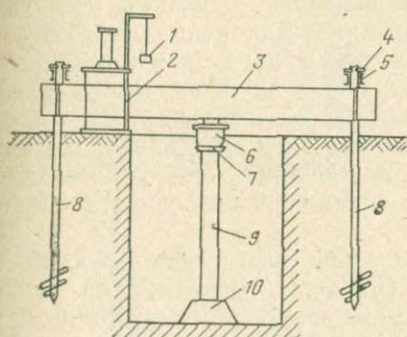


Рис. 2. Общая схема установки для испытания грунтов пробными нагрузками в шурфах.

1 — гири; 2 — стабилизатор; 3 — продольная упругая балка; 4 — вкладыш; 5 — поперечные балки; 6 — домкрат; 7 — плита; 8 — анкерные сваи; 9 — стойка; 10 — штамп

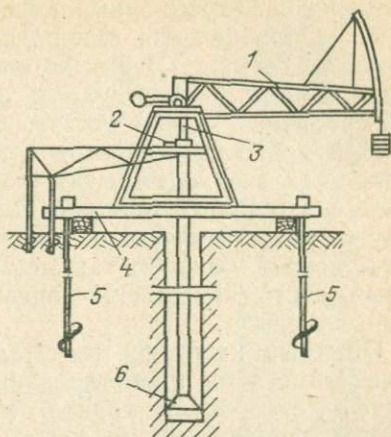
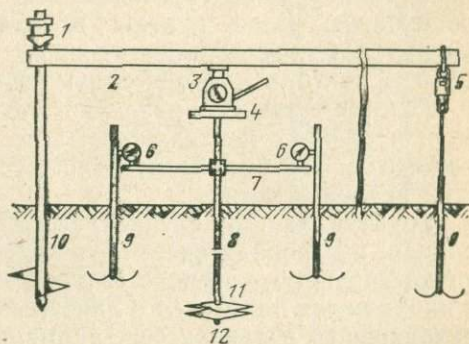


Рис. 3. Схема установки КРУ-600 для испытаний опытными нагрузками в скважине.

1 — нагрузочное устройство; 2 — самопи-сец с часовым механизмом; 3 — штанга; 4 — опорные балки; 5 — анкерные сваи; 6 — штамп

Рис. 4. Схема нагрузочной установки фирмы «Борро».

1 — верхнее крепление; 2 — балка; 3 — домкрат; 4 — опора; 5 — динамометр; 6 — индикаторы; 7 — полка; 8 — буровая штанга; 9 — анкеры фирмы «Борро»; 10 — анкерная свая; 11 — нагрузочная плита; 12 — маконечник



низкой отметке и т. д. После окончания испытаний плита не извлекается. Оригиналы и анкерные устройства.

Площади отечественных штампов колеблются от 600 до 10 000 см². При выборе штампа обычно руководствуются правилом: чем слабее испытуемый грунт, тем больше должна быть площадь штампа (и наоборот), чем больше площадь штампа, тем больше глубина активной зоны (ГОСТ 12374—77).

Перед заложением шурфа рядом с ним проходят скважины с целью уточнения геологического разреза и положения грунтовых вод. Глубина скважины должна превышать глубину установки штампа не меньше чем на 2 м.

Желательно, чтобы до проходки шурфа в трех его углах был

выполнен пенетрационный каротаж или статическое зондирование с целью определения однородности физико-механических свойств пород по глубине. В случае совпадения результатов статического зондирования в исследуемом интервале под отметкой установки штампа пункт можно считать пригодным для испытания.

При испытании грунтов статическими нагрузками в буровых скважинах необходимо, так же как и для шурфов, иметь точные данные о геологии опытной выработки. Желательно также иметь результаты статического зондирования, произведенного в непосредственной близости от места опробования. Эти данные дают возможность качественно оценить механические свойства пород разреза.

Опытные нагрузки на штампы чаще всего используются на конечной стадии проектирования (рабочие чертежи) для оценки несущей способности грунта непосредственно под каким-либо элементом фундамента и реже для общей оценки строительных свойств отдельных литологических разностей грунта в районе проектируемого строительства, и поэтому положение пунктов опробования пород на исследуемом разрезе или участке полностью зависит от врезки проектируемого сооружения, конфигурации фундамента и проектного удельного давления на основание.

Во всех случаях рассматривается вопрос о положении пунктов опробования грунта по отношению к существующему в момент испытания уровню грунтовых вод, так как этот фактор является решающим. Если пункты испытания грунта находятся выше уровня воды, испытания проводят в шурфах, если ниже, то для опытов, как правило, используются скважины.

Принципиального различия между оборудованием, используемым в шурфах и скважинах, нет. Оно состоит из трех основных элементов: штампа, нагрузочного устройства и приборов, измеряющих осадку штампа.

Грунт в данном случае рассматривается как сплошная, однородная, изотропная система, в которой деформации являются частично упругими, частично остаточными, причем общие деформации и напряжения находятся в линейной зависимости. Для такой среды, находящейся в равновесии, применяются уравнения и методы теории упругости. При этом модуль упругости заменяется модулем общей деформации, коэффициент Пуассона — коэффициентом бокового расширения. Для этого используется формула Шлехера:

$$S = (1 - \mu^2) (\alpha P \sqrt{F} / E), \quad (2)$$

где μ — коэффициент Пуассона (для песков 0,30, суглинков 0,35, глин 0,42); α — безразмерный коэффициент, зависящий от формы площадки и жесткости плиты штампа; P — интенсивность нагрузки; F — площадь загрузки; E — модуль деформации массива грунта.

Для квадратного штампа формула принимает вид

$$E_{m-n} = (1 - \mu^2) \frac{P_n - P_m}{(S_n - S_m) d}, \quad (3)$$

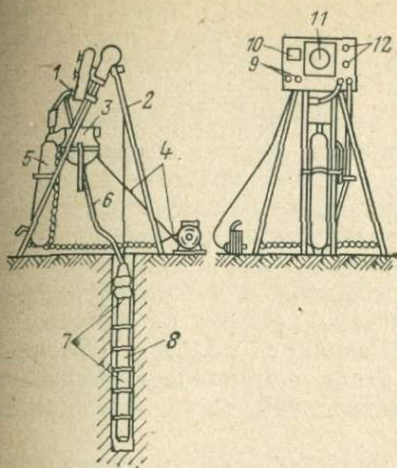


Рис. 5. Схема прессометра ИГПИ-21.

1 — электрический разъем; 2 — штатив; 3 — ручная лебедка; 4 — электрокабель; 5 — баллон со сжатым воздухом; 6 — высоконапорные шланги; 7 — предохранитель гильзы; 8 — рабочий снаряд с резиновой оболочкой; 9 — ручки настройки схемы; 10 — микроамперметр; 11 — манометр; 12 — вентили подачи воздуха

где E_{m-n} — модуль сжимаемости в интервале от P_m до P_n ; S_m, S_n — осадки штампа при нагрузках P_m и P_n ; d — диаметр круга, равновеликого площади штампов.

Прессиометрия. В настоящее время для исследования сжимаемости и прочности пород довольно широко применяются прессиометры. Приборы состоят из наземного пульта управления и регистрации и цилиндрического зонда, погружаемого в скважину (рис. 5). Скважина может быть пробурена заранее или буриться в процессе погружения прессиометра с помощью специально приспособления, встроенного в него (самопогружающиеся прессиометры). На заданной глубине в прессиометры нагнетают газ или жидкость. В результате измерения деформации стенок скважины получают зависимость в виде диаграмм напряжение — деформация, которые интерпретируются относительно показателей сжимаемости пород.

Идея изучения свойств пород методом расширения скважин была предложена в 1930 г. русским инженером А. А. Ктаторо-

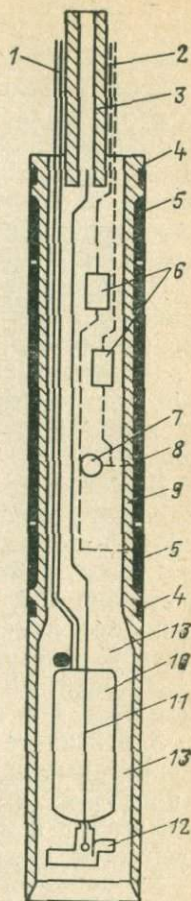


Рис. 6. Схема самопогружающегося прессиометра.

1 — гидравлические шланги; 2 — электрические кабели; 3 — буровые штанги; 4 — крепление рабочей камеры; 5 — предохранительные камеры; 6 — управляемые клапаны; 7 — датчик порового давления; 8 — рабочая камера; 9 — корпус; 10 — гидромотор; 11 — напорный шланг; 12 — вращающийся буровой наконечник; 13 — полость

вым. Затем в 40-х годах прессиометр был предложен Кеглером. В середине 50-х годов Луи Менар изобрел прессиометр, который в дальнейшем был подвергнут экспериментальной проверке в Иллинойском университете.

Дальнейшее совершенствование приборов шло по линии разработки конструкции собственно приборов, систем измерения давления в прессиометрах и деформации стенок, отработки технологии погружения приборов в породы с минимальным нарушением стенок скважины в интервалах прессиометрических испытаний и т. д.

Наиболее интересным направлением в совершенствовании этих приборов является создание приспособлений для самозабуривания, представляющих собой цилиндрические насадки на прессиометр с расположенным внутри них вращающимся долотом. Разрушаемый долотом грунт удаляется с забоя промывочной жидкостью по полости, расположенной в центральной части прессиометра (рис. 6).

В настоящее время в СССР используется более 20 модификаций гидравлических и пневматических прессиометров. Для песчано-глинистых грунтов применяют прессиометры с диаметром от 76 до 128 мм, длиной опробуемого интервала 200—1700 мм (преимущественно 400—500 м), максимальным давлением 0,5—10 МПа и точностью измерения деформации 0,006—1,0 мм [24]. Наиболее удачной конструкцией прессиометров является ИГП-21.

В последнее время предпринимаются попытки применить прессиометры для исследования донных отложений шельфа.

Зарубежные фирмы, в том числе «Луи Менар», выпускают специальные прессиометры, приспособленные для работы на море, и проводят с их помощью исследования на шельфе. Работа с прессиометрами в морских условиях довольно сложна и, как правило, сочетается с другими инженерно-геологическими работами.

За рубежом интерпретация, как правило, ведется по уравнениям, полученным эмпирическим или полуэмпирическим способом, предлагаемыми различными авторами. При этом прессиометр рассматривается не как универсальный прибор для испытания пород, а просто как еще одно полезное приспособление, доступное инженеру.

Технология испытания пород отечественными прессиометрами и интерпретация результатов регламентируются ГОСТ 20276—74. Модуль деформации определяется по формуле

$$E = kr_0(\Delta P/\Delta r), \quad (4)$$

где k — корректирующий коэффициент, величина которого определяется по результатам сопоставительных параллельных испытаний данной разности грунта штампом и прессиометром; r_0 — начальный радиус скважины; ΔP — приращение величины давления на стенку скважины между двумя точками, взятыми на усредненной прямой; Δr — приращение перемещения стенки скважины (по радиусу), соответствующее ΔP . Более подробно прессиометрия и вращательный срез рассмотрены в работе [11]. При подготовке

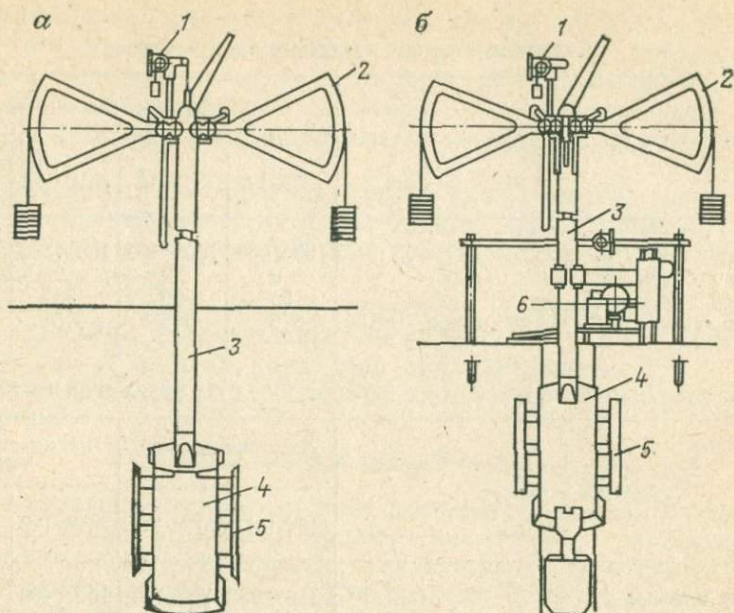


Рис. 7. Лопастные прессиометры ЛПМ-15 (а) и ЛПМ-15С (б):

1 — прогибомер; 2 — нагрузочное устройство; 3 — упорная рейка; 4 — корпус; 5 — распорные штампы (ребра для сдвига); 6 — домкрат

скважины к испытанию прессиометром запрещается применять ударно-канатное или шнековое бурение на расстоянии меньше 1 м испытуемого интервала. Минимальная толщина слоя грунта, сжимаемость которого определяется при помощи прессиометра, должна составлять не менее 1,5 длины камеры зонда.

Условная стабилизация деформации каждой ступени определяется деформацией 0,1 мм за время от 3 до 6 мин при быстром режиме испытаний и от 15 до 60 мин при медленном.

Лопастные прессиометры, прессиометры-сдвигомеры, дилатометры.

Этот относительно новый метод исследования свойств пород требует более подробного описания. Идея создания прибора в СССР принадлежит Л. С. Амаряну [17]. Прибор может иметь несколько модификаций, но в принципе состоит из жестких плоских элементов, способных расширяться в процессе испытания породы. Чаще он имеет вид двутавровой балки. Рабочие элементы соединены с силовым и измерительно-регистрационным оборудованием, находящимся на поверхности.

Среди отечественных приборов следует прежде всего отметить ЛПМ-15, ЛПМ-14С, ЛПМ-15С (лопастные прессиометры, лопастные прессиометры-сдвигомеры), используемые для исследования грунтов на сжимаемость в массиве или в предварительно пробу-

Технические данные лопастных прессиометров

Основные параметры	Лопастные прессиометры			
	ЛПМ-14	ЛПМ-15	ЛПМ-15А	ЛПМ-17
Размер штампа, мм	150×400	100×300	100×300	62×160
Число штампов, шт.	2	2	2	2
Рабочий ход штампа, мм	50	30	30	18
Максимальное давление на штамп, МПа	0,5	0,5	0,5	0,8

Продолжение табл. 2

Основные параметры	Лопастные прессиометры		Прессиометры-сдвигометры	
	ЛПМ-16/1	ЛПМ-17/1	ЛПМ-14С	ЛПМ-22С
Размер штампа, мм	348×86	70×140	150×400	80×112
Число штампов, шт.	1	1	2	1
Рабочий ход штампа, мм	38	20	50	16
Максимальное давление на штамп, МПа	0,5	0,8	0,5	0,5

Примечание. Точность измерения хода штампа, мм.

ренной скважине, а также на сдвиг (рис. 7). Погружение рабочего наконечника лопастного прессиометра в породу производят путем его вдавливания при одновременном срезании стенок и профилирования предварительно пробуренной скважины с целью внедрения штампов в минимально нарушенную породу.

Начиная с 1963 г., было создано около 15 модификаций лопастных прессиометров. Были опробованы варианты пневматического, механического и гидравлического действия.

В конечном счете авторы остановились на механическом варианте, который как показала практика, оказался оптимальным. Он прост в исполнении и надежен в работе, имеет широкую перспективу дальнейшего совершенствования применительно к различным геологическим условиям, в том числе и к условиям работы на море. В настоящее время разработано и эксплуатируется несколько наиболее перспективных модификаций лопастных прессиометров. Их технические характеристики приведены в табл. 2.

Основными достоинствами лопастных прессиометров являются простота конструкции и удобство в работе, а также их надежность. Последние варианты лопастных прессиометров сконструированы таким образом, что могут быть вдавлены в массив породы без предварительной проходки скважины. Это обстоятельство значи-

тельно расширяет область применения лопастных прессиометров. Кроме того, разработаны приборы, в которых предусмотрена возможность выполнения сдвига определенного объема породы при фиксированном нормальном давлении. Это значительный шаг вперед на пути исследования сдвиговых процессов непосредственно в массиве.

Что касается интерпретации результатов опытов, ниже приведены рекомендуемые авторами связи между показателями полученными с помощью лопастных прессиометров, и показателями сжимаемости пород.

Испытания пород ведутся ступенями давлений 0,025 МПа. Время условной стабилизации колеблется от 3 до 6 мин при быстром сдвиге и от 15 до 60 мин при медленном.

Модуль деформации вычисляется для прямого участка графика по формуле

$$E = k(1 - \mu^2) \omega b [\Delta P / \Delta S - \Delta \lambda L], \quad (5)$$

где k — коэффициент анизотропии деформации пород, определяемый по результатам компрессионных испытаний в вертикальном и горизонтальном направлениях для каждого характерного вида породы данного региона; ω — коэффициент формы штампа; ΔP — приращение давления на штамп; ΔS — приращение осадки для ΔP ; $\Delta \lambda$ — приращение относительной деформации внутренних стержней по результатам градуировок; L — длина колонны внутренних стержней и труб при испытании.

Сопротивление грунта срезу τ_i при каждом нормальном давлении P_i вычисляют по формуле

$$\tau_i = \frac{\left[Q_i \left(Q_{i0} - \frac{F}{F_{\text{пл}}} Q_0 \right) \right] Q_{06}}{2F}, \quad (6)$$

где Q_i — максимальное сопротивление грунта вертикальному срезу при i -й ступени нормального давления P_i ; Q_{i0} — максимальное сопротивление грунта вертикальному срезу после снятия i -й ступени нормального давления P_i ; F — площадь штампа; $F_{\text{пл}}$ — общая площадь внешней поверхности плиты рабочего наконечника; Q_0 — максимальное сопротивление грунта вертикальному срезу перед началом испытания; Q_{06} — вес оборудования (рабочего наконечника, наружных труб, стержней, нагрузочного устройства, гирь) при i -й ступени нормального давления P_i .

При испытании грунтов на срез с помощью приборов ЛПМ-14С или ЛПМ-15С отношение $F/F_{\text{пл}}$ равно 0,75.

По значениям τ для различных давлений строят график зависимости $\tau = f(P)$.

За рубежом в последнее время применяют так называемые дилатометры — приборы, состоящие из жесткого плоского элемента, на одной или на обеих сторонах которого имеются мембраны, способные расширяться в процессе испытания породы

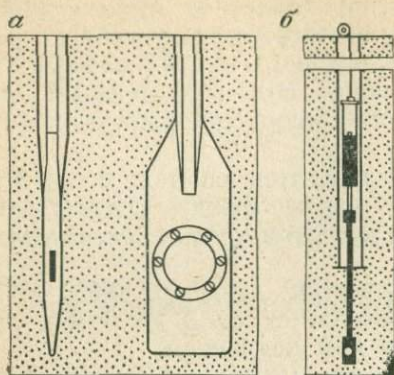


Рис. 8. Плоский дилатометр С. Марчетти.

a — наконечник (вид сбоку и спереди);
б — дилатометр в скважине

ной фиксируется дважды: в момент начала движения мембраны и в конечный момент, т. е. когда мембрана переместилась на 1 мм.

Скорость увеличения давления поддерживается такой, чтобы расширение мембраны начиналось через 15—30 с. Время для получения информации с интервала 30 м достигает двух часов. Специальных исследований по изучению влияния скорости погружения дилатометра на значения давлений в мембране не проводилось.

Процесс вдавливания дилатометра в грунт может рассматриваться как своеобразная пенетрация породы и перемещение ее в направлении, перпендикулярном к лопасти на 7 мм от нее.

В результате испытаний пород дилатометром получают значения начального отсчета давления в мембране P_0 и отсчета давления в мембране после деформации мембраны на 1 мм P_1 (в значения должны быть введены поправки жесткости самой мембраны, полученные при ее свободном расширении). По полученным значениям P_0 и P_1 определяют $\Delta P = P_1 - P_0$.

Для дилатометров с диаметром мембраны 60 мм и деформацией породы 1 мм модуль деформации в конечном виде выражается в виде:

$$E/(1 - \mu^2) = 38,2\Delta P. \quad (7)$$

Выражение $E/(1 - \mu^2)$ называют модулем дилатометров E_D .

Для каждого испытания дилатометрии (ДТМ) результаты представляются в виде графиков P_0 и P_1 по глубине внедрения дилатометра, а также расчетных значений:

$$I_D = \Delta P/(P_0 - U_0) — \text{индекс грунтового материала}; \quad (8)$$

(рис. 8). Отличием дилатометра от прессиометров является то, что он часто не требует проходки скважины, а сам процесс исследования пород по времени близок к зондированию [27].

Дилатометр вдавливают в породу или забивают в нее с поверхности или с забоя скважины. Скорость погружения лимитируется в пределах от 1,2 до 2,4 м/мин. Через каждые 20 см работы погружение дилатометра приостанавливается и сразу же под мембрану нагнетается газ. При этом давление под мембраной

$$K_D = (P_0 - U_0) / \bar{\sigma}_V - \text{индекс горизонтального напряжения}; \quad (9)$$

$$E_D = 39,2\Delta P - \text{модуль дилатометра}; \quad (10)$$

U_0 и $\bar{\sigma}_V$ — поровое давление воды и вертикальное эффективное напряжение на глубине испытания.

Значения I_D довольно хорошо коррелируют с видом породы. Они быстро возрастают с уменьшением числа глинистых частиц и увеличением песчаной фракции в пределах от 0,23 до 7,5. Величина K_D помимо радиального напряжения σ_n отражает дополнительную прочность грунта. Что касается модуля дилатометра E_D , он прежде всего характеризует жесткость породы.

В общем же, оценивая этот метод, следует отметить, что он, по нашему мнению, ближе к методам зондирования и по скорости, и по объему опробуемой породы.

Что касается приоритета применения перечисленных методов для оценки сжимаемости, представляется, что главной задачей является определение факторов, влияющих на количественные значения одних и тех же показателей, полученных различными методами. В связи с этим вопрос о применении того или иного метода для оценки сжимаемости пород должен решаться на фоне детального исследования состава и состояния пород в разрезе, цели исследований, конструкции сооружений.

При этом всегда надо иметь в виду два основных обстоятельства: 1) количественное соотношение показателей сжимаемости пород, полученных лабораторными или полевыми методами; 2) следует учитывать возможную анизотропию пород при испытании их прессиометрами, дилатометрами и другими приборами, сжимающими или деформирующими породу в горизонтальной плоскости, в то время как рабочие нагрузки от сооружения в основном действуют по вертикали.

В качестве примера на рис. 9 и 10 приведены зависимость между значениями модулей деформации, полученных с помощью штампов и компрессионных приборов, а также зависимости значений модуля деформации от вида породы и коэффициента пористости (по данным СНИП II-15-74). Очевидно влияние состава и состояния породы на величину показателей сжимаемости. На рис. 11 приведен график деформации грунтов основания бетонной плотины, а в табл. 3 — некоторые данные по ее полной осадке. На рис. 12 приведены данные зависимости осадок от площади основания фундамента сооружения и площади штампа, использованного для испытания.

Приведенные материалы свидетельствуют о сложности вопроса получения достаточного количества достоверных показателей сжимаемости и указывают на необходимость детального изучения состава и состояния пород в массиве по глубине.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ ПОРОД СДВИГОВЫМИ ПРИБОРАМИ. Прочность пород определяют как в лаборатории,

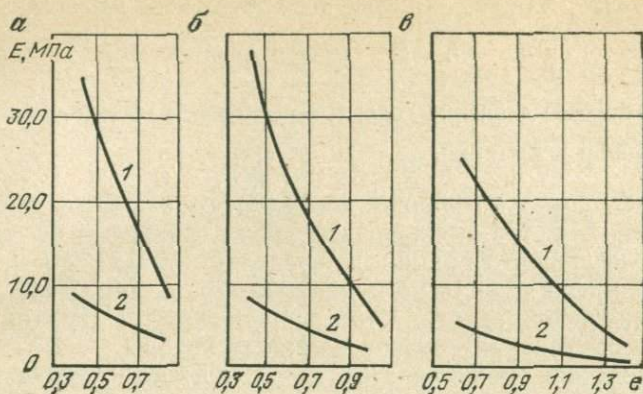


Рис. 9. Графики зависимости модулей деформации, полученных с помощью штампов (1) и компрессионных испытаний (2) для:
 а — песка; б — супесей; в — глин

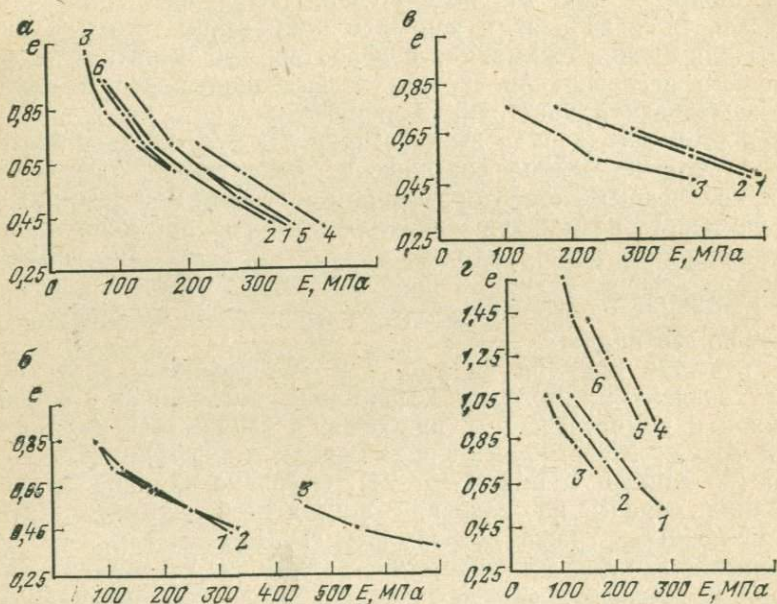


Рис. 10. Графики зависимости модуля деформации от вида породы и коэффициента пористости для:

а — суглинков аллювиальных, делювиальных, озерных, озерно-аллювиальных (1 — полутвердых, 2 — тугопластичных, 3 — мягкопластичных) и флювиогляциальных (4 — полутвердых, 5 — тугопластичных, 6 — мягкопластичных); б — супесей аллювиальных, делювиальных, озерных, озерно-аллювиальных (1 — пластичных), флювиогляциальных (2 — пластичных), морских (3 — тугопластичных); в — песков (1 — гравелистых, крупных и средней крупности, 2 — мелких, 3 — пылеватых); г — глин аллювиальных, делювиальных, озерных, озерно-аллювиальных (1 — полутвердых, 2 — тугопластичных, 3 — мягкопластичных), юрских отложений оксфордского яруса (4 — твердых, 5 — полутвердых, 6 — тугопластичных)

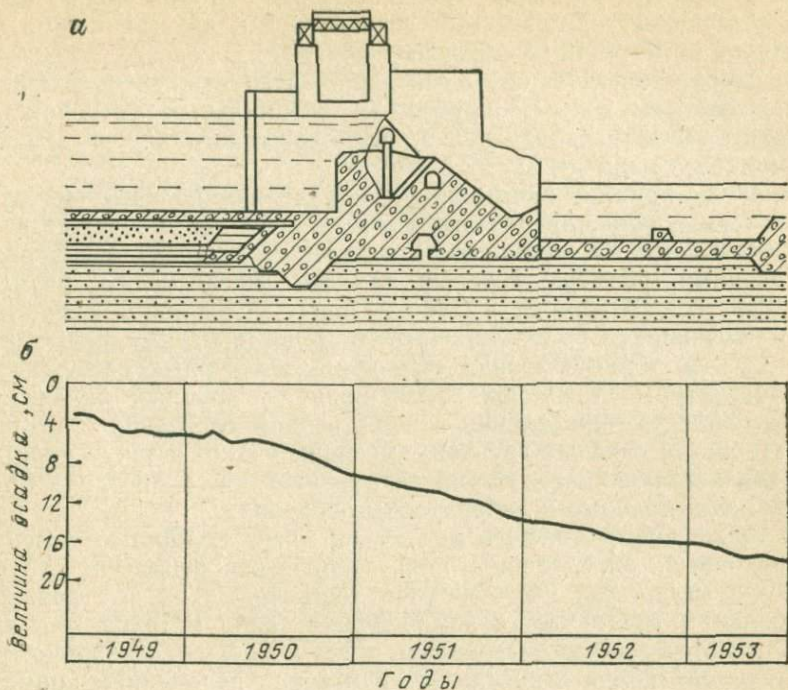


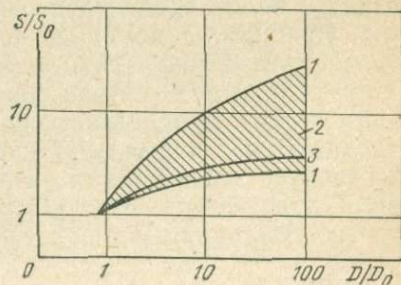
Рис. 11. Осадка бетонной плотины.
а — разрез плотины; б — график осадки

Таблица 3

Осадка элементов гидроузла

Сооружение	Размер основания, м	Давление на основание, МПа		Полная осадка сооружения, см	
		строительное	эксплуатационное	расчетная	фактическая
Здание ГЭС Бетонная плотина	65,7×118	0,45	0,37	24,0	26,0
	52,5×118	0,36	0,30	22,0	21,5

Рис. 12. Графики соотношения нагрузок штампов и сооружений и их осадок в зависимости от площади основания:
1 — кривые крайних значений; 2 — поле значений; 3 — теоретическая кривая Терцаги — Пека; D_0 — диаметр штампа площадью 1000 см²; D — диаметр фундамента; S_0 — осадка штампа; S — осадка фундамента



так и в полевых условиях. Среди полевых методов можно выделить следующие: а) сдвиг монолита грунта большого объема, отделенного от массива (в сдвиговых приборах), непосредственно на месте отбора монолита; б) сдвиг целиков грунта, расположенных на поверхности или в шурфах (в специальных устройствах); в) сдвиг части массива грунта, расположенного внутри массива (с помощью крыльчатки).

К числу причин, приведших к появлению полевых методов, используемых для определения показателей сдвига, прежде всего следует отнести: 1) возможность в полевых условиях оперировать с образцами, размеры которых намного превосходят размеры образцов, испытываемых в лабораторных условиях и вследствие этого являющихся более типичными представителями испытываемого грунта с точки зрения структурно-текстурных особенностей макроструктуры, трещиноватости, наличия крупных включений; 2) возможность определения в естественном состоянии сдвиговых характеристик связных грунтов, имеющих мягко- и текучепластичную консистенцию, что весьма затруднительно, а иногда и практически невыполнимо в лабораторных условиях.

В то же время полевые методы не могут полностью заменить лабораторные определения показателей сопротивления грунта сдвигу в силу того, что наиболее достоверные из них довольно громоздки и трудоемки, с помощью же таких методов, как вращательный срез (хотя он довольно прост и мобилен), не полностью удастся моделировать поведение грунта при переменном нормальном давлении.

Рациональное сочетание полевых и лабораторных методов применительно к конкретным инженерно-геологическим ситуациям является важнейшим условием для правильного определения прочностных характеристик исследуемых пород.

В зависимости от условий, применительно к которым моделируется сдвиг грунта, используются приборы различной конструкции. В зависимости от размера и степени нарушения структуры исследуемого грунта их можно разделить на три группы.

1. Приборы, принципиально не отличающиеся от лабораторных, за исключением размеров. В данном случае размеры образца грунта во много раз больше, чем для лабораторных сдвиговых приборов, и при испытании его возможен учет текстурных особенностей грунта. Кроме того, проведение испытания на месте отбора образца исключает возможность изменения свойств образца во время транспортировки.

2. Приборы, с помощью которых в полевых условиях производят сдвиг целиков грунта без отделения испытываемого образца от массива. В этом случае определенный объем грунта сдвигается в намеченном направлении, причем он может находиться или не находиться под нормальной нагрузкой. Проведение подобных опытов требует значительных затрат времени и средств, но в то же время полученные результаты являются наиболее достоверными и легко поддаются интерпретации.

3. Приборы, с помощью которых можно проводить сдвиг определенного объема грунта, находящегося на значительной глубине независимо от положения уровня грунтовых вод (крыльчатка и др.). Технология проведения этих опытов довольно проста, однако в результате может быть получена величина сдвигового усилия только при одном нормальном давлении, величина которого обычно определяется бытовым давлением или давлением, создаваемым специальным приспособлением, вмонтированным в крыльчатку.

Испытания монолитов грунта больших размеров. Для определения сдвиговых характеристик грунта в особо ответственных случаях испытывают большие монолиты грунта (в см): $40 \times 20 \times 20$, $34 \times 34 \times 30$, $75 \times 75 \times 75$ и т. д. При этом применяются установки: РПС-1 (прибор рычажной сдвиговой) с двумя модификациями РПС-1М; гидравлическая ГПС и прибор конструкции Гидропроекта; стендовая конструкция В. П. Вихарева и т. д.

Несмотря на различия в большинстве установок, принципы схем испытания грунта практически очень близки. В большинстве установок, за исключением РПС, нормальное сдвигающее усилие на грунт создается гидравлическими или винтовыми домкратами. Это обстоятельство в значительной степени влияет на равномерность приложения нагрузки на образец, специфику пиковых нагрузок в момент сдвига, а отсюда на результаты опытов. Кроме того, в процессе сдвига грунта при наличии в нем обломочного материала могут происходить вертикальные перемещения обойм, отчего давление в гидродомкратах может резко меняться. Этим же обстоятельством может быть объяснено отклонение фактической плоскости сдвига от горизонтали. Перечисленные недостатки исключены в установке РПС-1. В то же время с помощью гидродомкратов можно создать значительные давления, необходимые для исследования пород, находящихся в массиве на больших глубинах, что практически исключается в приборах РПС, максимальное нормальное давление в которых не превышает 0,5 МПа.

В качестве примера рассмотрим установку РПС-1, которая может быть использована для определения сдвиговых характеристик

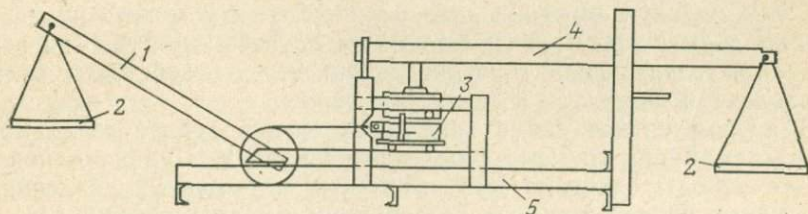


Рис. 13. Схема прибора РПС-1.

1 — рычаг горизонтального давления; 2 — грузовые платформы; 3 — сдвиговой ящик; 4 — рычаг вертикального давления; 5 — рама установки

грунта, отобранного в виде монолитов или уложенного с нарушенной структурой, причем размер включений может достигать 80 мм. На рис. 13 приведена принципиальная схема конструкции установки.

Образец грунта помещают в нижнюю обойму, точнее, обойму надевают на образец и вместе с ним устанавливают в прибор, причем пустоты между стенками обоймы и образца тщательно заполняют утрамбованной глиной. После этого производят подгонку верхней обоймы и установку образца в прибор.

Для обеспечения равномерного давления торец монолита покрывают слоем песка толщиной 1,5—2,0 см, на который помещают штамп и подставку рычага вертикальной нагрузки.

Для расчета общего давления на образец грунта используют зависимость

$$m_1 = \frac{\sigma S l}{L} - m_2 - \frac{m_3}{2}, \quad (11)$$

где m_1 — вес груза на платформе; σ — давление на образец; S — площадь среза образца; l — малое плечо рычага; L — большое плечо рычага; m_2 — вес пустой платформы; m_3 — вес рычага.

Как и при лабораторных исследованиях сдвиговых характеристик грунта, в данном случае определяют величину сдвигающего напряжения τ при различных вертикальных давлениях на образец.

Значения τ вычисляют по формуле

$$\tau = \frac{(L/l) N \cos \alpha}{S}, \quad (12)$$

где L — большое плечо рычага горизонтальной нагрузки; N — нагрузка, создающая горизонтальное усилие; α — угол наклона рычага; S — площадь среза образца.

Значения N принимаются равными последней или предпоследней ступени нагрузки перед срезом. Первая берется при медленном (5 мин и более), вторая — при быстром срезе образца.

Полученные сдвиговые характеристики грунта используют для построения зависимости сдвигового усилия от нормального давления и определения по ней значений угла внутреннего трения и сцепления грунта.

Сдвиг целиков грунта. Сдвиг целиков грунта можно производить по двум схемам: 1) при действии на него двух сил — вертикальной и сдвигающей горизонтальной; 2) под действием силы, направленной под углом к плоскости сдвига.

В первом случае схема испытания грунта сходна со схемой, используемой при лабораторных исследованиях. Целики одной и той же породы сдвигают при различных нормальных давлениях; разница заключается лишь в конструкции и размерах прибора.

В настоящее время наиболее распространены установки для проведения испытаний на сдвиг: 1) обоймы с грунтом в заданной плоскости; 2) трех обойм с грунтом в заданной плоскости.

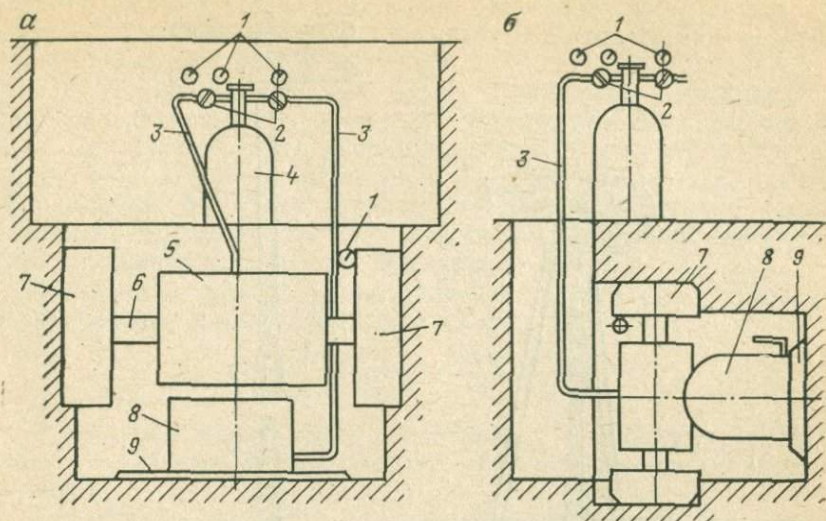


Рис. 14. Схема сдвиговой установки УС-1М:

Сдвиг грунта: а — в вертикальной плоскости; б — в горизонтальной плоскости. 1 — манометры; 2 — редукторы; 3 — магистрали высокого давления; 4 — баллон; 5 — пневмоцилиндр двойного действия; 6 — штоки; 7 — обойма; 8 — пневмоцилиндр; 9 — опорная плита

Схема проведения опытов при помощи этих установок практически одна и та же. На целик породы путем вдавливания плотно надевают обойму с помощью домкрата и создают на него определенное вертикальное давление. Сдвиг обоймы с целиком производят с помощью домкрата. Для получения значений c и φ проводят как минимум два испытания одного и того же грунта (с одной и той же влажностью и плотностью) при различных нормальных давлениях (рис. 14).

Установка конструкции института Фундаментпроект отличается тем, что имеет три совмещенные сдвиговые секции. Опыт на сдвиг производят на целиках, плоскость среза которых расположена на одном уровне. Все три секции расположены под одной опорной балкой, в которую упираются домкраты, создающие вертикальную нагрузку на целики. Горизонтальное усилие на целики создают гидравлическим домкратом, упирающимся в стенку шурфа.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПОРОД В МАССИВЕ. В практике инженерно-геологических исследований довольно часто используют различные типы приборов вращательного среза грунта в скважинах (рис. 15 и 16). Рабочей частью этих приборов является крыльчатка или специальные наконечники, вдавливаемые в грунт.

В настоящее время для проведения вращательного среза применяют довольно много конструкций этих приборов как в легком ручном варианте, так и в более сложных модификациях, обеспечивающих внедрение крыльчатки в породы без проходки скважин.

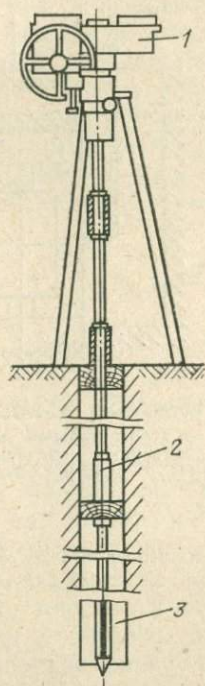


Рис. 15. Прибор СП-52 (конструкции
Фундаментпроекта).

1 — головка прибора (операторский столик); 2 — штанги поворотные с центрирующими кольцами; 3 — рабочий наконечник (крыльчатка)

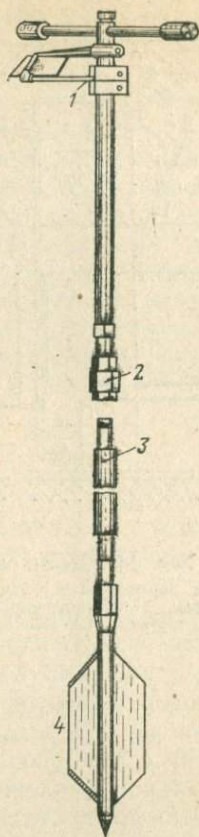


Рис. 16. Ручная крыльчатка «Борро».

1 — измерительная головка; 2 — муфта;
3 — штанга; 4 — крыльчатка

Имеются крыльчатки и лопастные прессиометры-сдвигомеры, позволяющие создавать на исследуемый грунт в процессе сдвига нормальное давление. На крыльчатках используются сменные лопасти различного размера (ГОСТ 21719—80) (высотой 60—200 мм, диаметром 50—110 мм). Максимальный крутящий момент 3—25 кН·м. На этот метод испытания грунтов ГОСТ 21719—80 также предусматривает испытания пород в скважинах по схеме кольцевого или поступательного среза. Диаметр распорного штампа колеблется от 87 до 146 мм, по высоте (длине) лопасти колеблются в интервале 200—300, 20—146 мм, по ширине 10,5—10 мм.

В результате испытаний с помощью крыльчатки измеряют значения τ , $p_{стр}$, s , а по кольцевому и поступательному срезу значения s и ϕ . В том же стандарте оговаривается и то, что эти пока-

затели должны устанавливаться по значениям нормального давления P и сопротивления грунта срезам τ , относящимся к одному инженерно-геологическому элементу.

ИСКИМЕТРИЯ. Впервые метод искиметрии, основанный на принципе измерения сопротивления породы резанию, был опробован и предложен для исследования рыхлых отложений В. Къелманом в 1943 г. Позже в работах А. Н. Зеленина процесс резания пород вообще был рассмотрен очень подробно. Однако заслуга разработки теории метода и внедрения его в практику инженерной геологии принадлежит Г. К. Бондарнику.

Зависимость между сопротивлением сдвигу τ_f и удельным сопротивлением резанию выражается формулой

$$\tau_f = \frac{0,092P}{(1-2L)} + \frac{0,06\gamma h(1-L)}{(1-2L)}, \quad (13)$$

где P — сопротивление породы резанию; γ — объемная масса породы; h — глубина от поверхности; L — показатель структурной прочности.

Показатель τ_f является комплексным, на его величину влияют многие факторы (влажность, плотность, размеры ножей и др.).

В настоящее время в практике инженерно-геологических исследований используются ручной и скважинный искиметры конструкции ВСЕГИНГЕО; для примера приведем техническую характеристику последнего: диаметр скважины 68 мм; поперечное сечение ножа 8,46 см²; максимальное усилие на динамометре 35 МПа; максимальная глубина испытаний 25 м; масштаб записи глубины 1:20; масса собранного прибора 60 кг. На рис. 17 приведена схема головки скважинного искиметра.

НОРМАЛЬНОЕ ДАВЛЕНИЕ ПОРОД. При вдавливании зонда в грунт на его стенки в горизонтальной плоскости действуют силы так называемого нормального давления σ_n . Измерение этого давления желательно для многих видов испытаний пород (прессиметрии, дилатометрии, зондирования, опытного вдавливания свай, пенетрационного каротажа и др.).

Приспособление для проведения такого измерения и его методика были разработаны и опробованы во ВСЕГИНГЕО. Измерительный прибор состоял из тонкостенного металлического цилиндра диаметром 62 мм, расположенного на зонде, вдавливаемом в породу. Цилиндр размещался непосредственно за наконечником зонда. Нормальное давление, т. е. давление пород в направлении, нормальном к стенке датчика, вызывалось упругой реакцией породы после ее деформации наконечником зонда.

Регистрация изменения диаметра цилиндра, происходившего под действием сил нормального давления, осуществлялась с помощью электрических тензометров, наклеенных на внутреннюю поверхность тонкостенного цилиндра поперек образующей.

Для температурной компенсации на той же внутренней поверхности цилиндра вдоль образующей были наклеены такие же тензометры. На рис. 18 и 19 приведены общая схема установки и

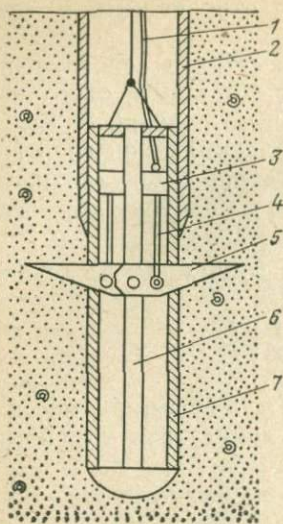


Рис. 17. Искиметр.

1 — кабель к регистратору;
2 — обсадная труба; 3 —
первичный преобразователь;
4 — тяги ножей; 5 —
ножи; 6 — стержень; 7 —
предохранительная труба

ПОРОВОЕ ДАВЛЕНИЕ. Под поровым давлением обычно понимается давление в жидкой и газообразной фазах породы, возникающее в результате действия естественных геофизических полей или их искусственного возмущения. В настоящее время интерес к этому показателю состояния породы значительно возрос в связи с тем, что он может быть использован для прогноза поведения породы. Особенно это относится к глинистым породам при оценке их показателей прочности. По К. Терцаги, в соответствии с принципом эффективных напряжений оно входит в уравнение прочности:

$$\tau = (\sigma - U) \operatorname{tg} \varphi^1 + c^1, \quad (14)$$

где τ — сдвигающее усилие; σ — нормальное давление; U — поровое давление; $\operatorname{tg} \varphi^1$ — эффективный коэффициент внутреннего трения; c^1 — эффективное сцепление.

Натурные измерения порового давления регистрируют и измеряют с помощью специальных первичных преобразователей пьезометрического, пьезоманометрического, электродинамического и других типов.

В отечественной практике довольно широко распространены приборы Гидропроекта со струнным тензометром. Фильтром в нем служит кварцевый песок, закрепленный бокситовым лаком на

результаты измерения нормального давления и трения пород. В ходе испытаний датчика выяснилось, что в процессе погружения зонда в результате нормального давления вносится определенная погрешность за счет деформации тонкостенного цилиндра под действием сил трения, действующих на боковые поверхности датчика, особенно в верхней его части. Поэтому в дальнейшем измерение нормального давления производилось только при остановках зонда.

Выяснилось, что в этом случае является возможность получить кривую спада напряжения в породе во времени. Совместные результаты измерения удельного трения и удельного нормального давления были использованы для получения коэффициентов трения металлов по грунту.

Градуировка нормального давления производилась с помощью специально сконструированного приспособления (рис. 20), которое позволяло не только отградуировать датчик, но проверить его герметичность.

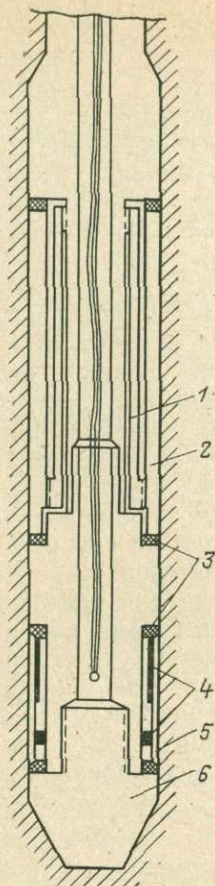


Рис. 18. Тензометрический зонд СПК с датчиком нормального давления.

1 — чувствительный элемент, фиксирующий трение; 2 — цилиндр трения; 3 — уплотнители; 4 — тензодатчики; 5 — тонкостенный цилиндр датчика нормального давления; 6 — наконечник

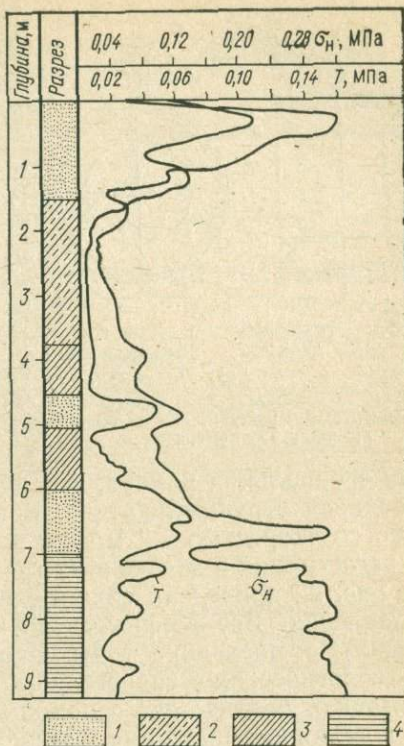


Рис. 19. Диаграмма трения T и нормального давления σ_n , полученные в процессе зондирования.

1 — песок; 2 — супесь; 3 — суглинок; 4 — глины юрские

латунной сетке (рис. 21). Наземное регистрирующее устройство и пьезодинамометры, как правило, связаны кабелем. Диапазон измерения датчиков 0,03—1,0 МПа. Надежность работы пьезодинамометров этой конструкции очень высока.

В последнее время этим же институтом разработана конструкция зонда, позволяющего измерить поровое давление при вдавли-

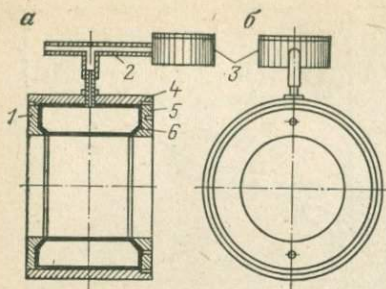


Рис. 20. Приспособление для градуирования датчика нормального давления: *а* — разрез; *б* — план.

1 — задняя крышка; 2 — переходник; 3 — манометр; 4 — кожух; 5 — съемная крышка; 6 — камера

ложена специальная камера, заканчивающаяся мембраной, с которой соединен струнный датчик. В процессе зондирования, выполняемого со скоростью 1,2 м/мин, непрерывно по глубине производится регистрация и запись этих трех показателей.

На рис. 22 приведена общая схема зонда для измерения порового давления. Все геофизические методы (кроме механического каротажа) в последние годы широко используются при инженерно-геологических и гидрогеологических работах. Они дополняют информацию, получаемую с помощью традиционных методов, особенно в целях интерполяции и экстраполяции.

Разнообразие геофизических методов исследования пород в

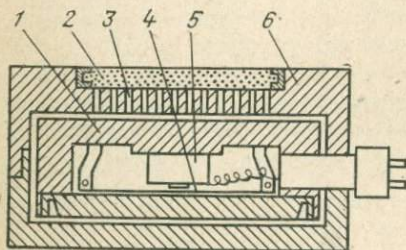


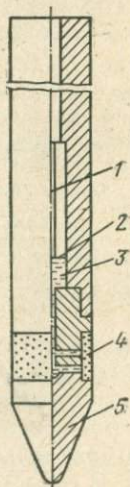
Рис. 21. Пьезодинамометр конструкции Гидропроект.

1 — плоская жесткая мембрана; 2 — пористый фильтр; 3 — поры фильтра; 4 — струна; 5 — съемная крышка; 6 — катушка электромагнита

Рис. 22. Схема зонда для измерения порового давления:

1 — струнный динамометр; 2 — диафрагма; 3 — гидравлический канал; 4 — фильтр; 5 — наконечник из нержавеющей стали

вании в породе. Во ВСЕГИНГЕО [15] разработана конструкция с датчиком для измерения порового давления повышенной чувствительности к малым перепадам, что очень важно при больших глубинах исследования. В Норвегии разработан и применяется зонд для одновременного измерения порового давления, удельного сопротивления наконечнику зонда и бокового трения. Этот зонд используют и для исследования донных отложений. Фильтр датчика порового давления в нем располагается на 1 см выше конуса. Еще выше распо-



скважинах и большое число задач, решаемых с их помощью, позволяют рассматривать это направление как самостоятельное.

Наиболее часто и эффективно при инженерно-геологических и гидрогеологических исследованиях используют комплекс исследований радиоактивных, электрических (сопротивление, боковое зондирование, микрокаротаж, вызванный потенциал), сейсмоакустических (сейсмокаротаж, сейсмическое профилирование, акустический каротаж), а также расходомерию, термометрию и резистивиметрию.

Эти методы рассматриваются здесь вследствие того, что они позволяют полнее оценить показатели состава, состояния и свойств пород непосредственно в массиве, а также те, которые еще недостаточно используются в инженерной геологии.

Имеющиеся стандарты по электрометрическому, сейсмоакустическим исследованиям регламентируют только термины и аппаратуру. Что касается перечня решаемых задач и интерпретации, то эти вопросы отражены, как правило, в многочисленных инструкциях, в частности в РСН 46—79.

Радиоизотопные методы

Развитие радиоизотопных методов и использование их для исследования свойств горных пород в массиве вызвано их спецификой, а также необходимостью быстрого получения качественной информации.

Эти методы значительно отличаются от ряда традиционных, применяемых для получения таких основных показателей, как объемная масса, влажность и др. Они не оказывают механического воздействия на породу*, не нарушают ее текстуру и структуру, вследствие чего в одной и той же точке можно проводить многократные повторные измерения, что очень важно для стационарных наблюдений. Они незаменимы при работе с водонасыщенными породами, в том числе и при исследовании донных морских отложений, при наблюдении за динамикой процессов водонасыщения пород или изменения объемной массы. Но в настоящее время эти методы, к сожалению, еще не нашли широкого применения в практике инженерно-геологических изысканий и область их использования часто сводится лишь к техническому контролю.

Практическое применение радиоизотопных методов основано на измерении гамма-излучения, прошедшего через породу или рассеянного ей, (наличие функциональной зависимости между величинами гамма-излучения, рассеиваемого грунтом и испускаемого источником, позволяет получать количественные значения объемной массы породы, а связи между плотностью потока нейтронов, испускаемого источником, и содержанием водорода в породе дает возможность измерить ее влажность). Регистрация естественного

* Речь идет только о методах, исключая технологию внедрения датчика в массив.

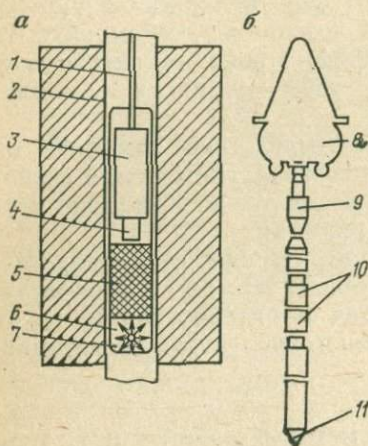


Рис. 23. Схема оборудования, используемого при γ - γ -каротажных измерениях плотности грунтов: а — глубинный снаряд; б — зонд.

1 — кабель-трос; 2 — скважина; 3 — блок аппаратуры; 4 — индикатор γ -излучения; 5 — свинцовый экран; 6 — источник излучения; 7 — корпус зонда; 8 — вибратор; 9 — виброударный патрон; 10 — погружаемая труба; 11 — наконечник

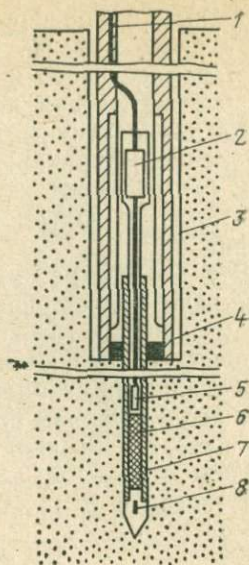


Рис. 24. Штанговый гамма-зонд в скважине.

1 — кабель; 2 — блок входной (радиосхема); 3 — скважина; 4 — корпус; 5 — гамма-счетчик; 6 — свинцовый экран; 7 — стержень зонда; 8 — гамма-источник

гамма-излучения позволяет оценивать количественное содержание радиоактивных составляющих, в спектрометрический анализ — принадлежность их к той или иной группе изотопов. В настоящее время для определения объемной массы пород используется целый ряд скважинных гамма-плотномеров (рис. 23, 24). Диаметры зондов выпускаемых плотномеров изменяются от 60 до 17 мм, а глубина исследований колеблется от 6 до 30 м. Время одного замера 2—600 с, абсолютная погрешность измерения объемной массы $\pm 0,04$ — $0,07$ т/м³.

Оценивая погрешность измерений, следует иметь в виду, что она относится именно к прибору. На точность окончательного значения объемной массы влияют, кроме того, и условия измерения в скважине (наличие обсадных труб, различия в диаметре скважины, толщина обсадных труб, наличие каверн, промывочной жидкости, грунтовой воды, образование глинистой корки на стенках скважины и т. д.).

Эти факторы часто не позволяют в полной мере получать количественную информацию о плотности или влажности пород. Лишь в благоприятных условиях, а также при введении соответствующих

поправок количественная интерпретация оказывается возможной. Впрочем, это характерно почти для всех исследований, выполняемых в заранее пробуренных скважинах.

Кроме многочисленных плотномеров типа УГГК-2, УР-70, ППТР-1, РПГ-69 и т. д. для уточнения литологического разреза скважины, оценки общей трещиноватости и пустотности пород применяют аппаратуру типа РСКМ, РСКУ, а также аппаратуру, входящую в блок ГГК каротажных станций типа АСКС-900, СКВ-69, СК-1. При выполнении измерений объемной массы руководствуются ГОСТ 23061—73.

Не менее, если не более важным является использование этого метода при поисковых работах. При выполнении геологоразведочных работ метод ГГК вводится в ряд комплексов, используемых для поисков сланцев, углей, строительных материалов, подземных вод и т. д.

Для измерения влажности методом нейтрон-нейтронного каротажа используют ряд приборов (НИВ-2, РВГ-36, РВГ-60 и др.). Диаметр зондов влагомеров 35—60 мм, абсолютная погрешность $\pm 0,008—0,02$. Диапазон измерения 0—1. Эффективный радиус исследования влажности при этом методе в диапазоне влажности 0,05—0,3 изменяется от 30 до 15 см. Значительное влияние на результаты ННК оказывают изменение диаметра скважины, плотность скелета породы, материал и толщина обсадных труб, химического состава пород, наличие органических веществ и др. Изменение толщины стальных труб на 3 мм при высоких значениях влажности может вызвать погрешность 0,1, а при малых — 0,3. Погрешность этого рода может быть значительно снижена при использовании дюралюминиевых труб. Работы по измерению влажности методом ННК производятся согласно ГОСТ 24181—80.

Так же как и метод ГГК, метод ННК входит в комплексы методов, используемых при геологоразведочных работах. Особенно он эффективен при разведке на воду, сланцы, уголь, торф, калийные соли, давсонит и др. Метод широко применяется для исследования динамики влагопереноса в зоне аэрации. В последнее время как в СССР, так и за рубежом появился ряд приборов, объединяющих функции влагомера и плотномера. Измерение объемной массы и объемной влажности производится одновременно. Источники гамма- и нейтронного излучения объединяются в одном блоке («Технолог С», УР-70, РПВ, РВЦ-ГН, РИЦ-202 и др.), что очень удобно с точки зрения интерпретации результатов.

В практике инженерно-геологических исследований часто используется метод измерения естественного гамма-фона (ГК). Природная радиоактивность пород зависит главным образом от содержания в них радиоактивных элементов урано-радиевого и ториевого рядов, а также радиоактивного калия. Как известно, наименьшей радиоактивностью обладают такие однородные по химическому составу породы, как каменная соль, ангидриды, известняки, доломиты, каменный уголь, чистые кварцевые пески. Для песчано-глинистых и карбонатных пород характерно повыше-

ние радиоактивности с увеличением степени дисперсности и особенно глинистости пород, которое связано с наличием калия в кристаллической решетке глинистых минералов.

Гамма-каротаж может выполняться комплектом аппаратуры, каротажных станций типа АЭСК-900 (1500), СКВ-69, СК-1, МАК-5Ц, МАК-80 и приборами типа РСКМ, РСКУ.

Наибольшая скорость V перемещения скважинного зонда ГК определяется по формуле

$$V = 3600 (h_{\min} - l) / (bt), \quad (15)$$

где h_{\min} — минимальная мощность пласта; l — длина индикатора; b — 2,5—3,0 — коэффициент точности; τ — постоянная времени.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ. Как известно, одним из свойств горных пород является их способность проводить электрический ток и оказывать сопротивление его прохождению. Величиной, характеризующей способность пород пропускать ток, является удельное электрическое сопротивление ρ . Величина, обратная ей, $\sigma = 1/\rho$ называется удельной электрической проводимостью. Электропроводимость горных пород объясняется главным образом минеральным составом пород, их пористостью и наличием в поровом пространстве водных растворов солей.

Удельное сопротивление, измеренное в горных породах, может изменяться от долей до сотен тысяч ом на метр, что позволяет по этим значениям оценивать некоторые показатели свойств пород. В табл. 4 приведены значения сопротивлений различных пород и вод, по В. В. Гречухину [5].

Таблица 4

Электрическое сопротивление пород и растворов

Горные породы и растворы	Сопротивление, Ом·м	Горные породы и растворы	Сопротивление, Ом·м
Аргиллиты	10—400	Вода морская	0,6
Алевролиты	15—600	Вода буровая	0,1—30,0
Глины	0,8—20,0	Песчаники рыхлые	2,0—50,0
Глины карбонатные	3,0—30,0	Песчаники плотные	20—31 ³
Известняки рыхлые	10—200	Сланцы глинистые	50—10 ³
Известняки плотные	50—5·10 ³	Соль каменная	10 ⁴ —10 ⁶
Нефть	10 ¹²	Сульфиды меди	10 ⁻³ —0,1
Конгломераты	20—4·10 ³	Антрацит	10 ⁻³ —10
Конкреции	0,1—10 ⁵	Угли каменные тощие	10 ² —10 ⁶
Пески, насыщенные пресной водой	10—20	Угли каменные от длинно-пламенных до тощих	10 ³ —10 ⁶
Пески, насыщенные соленой водой	0,2—4,0	Угли бурые	10—200
Вода пресная	10—100		

При инженерно-геологических исследованиях электрическое сопротивление пород определяют, как правило, для литологического расчленения разреза, оценки мощности слоев, выявления трещи-

новатых и ослабленных интервалов, а также оценки водонасыщенности пород.

При наличии специальных зондов с прижимными или вдавливаемыми электродами возможно измерение ρ в сухих скажинах. Для этих работ используются каротажные станции АЭС-900, СКВ-69, а также полевые электроразведочные приборы. На рис. 25 приведена схема измерения кажущегося удельного сопротивления обычными зондами.

При этом для исследования инженерно-геологических скважин применяют кровельный градиент-зонд N 0,1 M 0,95 A и потенциал-зонд с AM , равным 0,2—0,3 м, и MA не менее 2 м. Для каротажа скважины рекомендуются следующие размеры градиент-зондов: в скважинах диаметром больше 200 мм — $M2A0$, $25B$, менее 200 — $M1A0$, $1B$. В этом случае объем опробуемой породы будет колебаться в пределах до 3 м³.

Точность определения электрического сопротивления породы в скважине зависит от многих факторов: удельного сопротивления и мощности пород, в которых находится каротажный зонд, диаметра скважины и удельного сопротивления заполняющей ее промывочной жидкости, характера проникновения фильтрата промывочной жидкости в пласт, типа и размера зонда.

Боковое электрическое зондирование заключается в определении кажущегося сопротивления пород при переменных размерах зондов. Инструкцией РСН 46—79 рекомендуются следующие размеры зондов, применяемых при боковом зондировании (табл. 5).

Микрокаротаж применяется для выявления литологических границ маломощных пропластков (5—10 см), а также водопроницаемых прослоек. Регистрация ρ_k производится с помощью микроустановок, скользящих по стенкам скважин.

Наиболее часто применяют зонды с размерами $A0,025M0,25$ (градиент) $A0,05M$ (потенциал). Скорость погружения микрозонда 2,5—3,3 м/мин. Погрешность измерения микрозондом (по РСН 46—79) не должна превышать 8 % от измеряемой величины (определяется повторяемость в одних и тех же условиях).

Метод вызванной поляризации (ВП). Это разновидность электроразведки, основанная на измерении разности потенциалов,

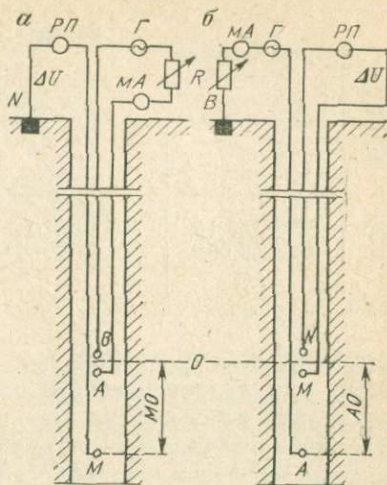


Рис. 25. Схема измерения кажущегося удельного сопротивления градиент-зондами: а — двухполюсным; б — однополюсным.

A и B — токовые электроды; M и N — измерительные электроды; $РП$ — регистрирующий прибор; $Г$ — источник тока; R — сопротивление для установки силы тока в цепи питания; AO , (MO) — длина зонда; O — точки записи кажущегося сопротивления

Размеры электродондов

Диаметр скважины, мм	Размеры зондов КС				
	1	2	3	4	5
>200	M0,25A0,1B	M0,5A0,1B	M1A0,1B	M2A0,25B	M4A0,25B
<200	M0,1A0,05B	M0,25A0,1B	M0,5A0,1B	M1A0,1B	M2A0,25B

вызванных электрической поляризацией горных пород, и применяемая для литологического расчленения пород. Хотя физическая база метода разработана довольно слабо, методика интерпретации вызванной поляризации широко применяется в практике инженерно-геологических и гидрогеологических исследований [24].

Выполнение ВП, как правило, осуществляется с помощью аппаратуры ВПС-63 или аналогичной ей, работающей в режиме однополярных импульсов с записью процесса деполяризации. Измерительный электрод изготавливают из неполяризующихся материалов. Типовые размеры зондов ВП: двухэлектродный с $AM=0,05-0,1$ м трехэлектродный с $MA=0,05-0,1$ м и $MN (AB)=2-5$ м.

Следует различать два вида вызванной поляризации в породах с электронным типом проводимости (при повышенном содержании в них рудных составляющих) и в ионопроводящих породах.

Сейсмоакустические исследования

Этот вид исследований основан на оценке упругих свойств горных пород в процессе распространения в них сейсмической волны.

Акустические исследования пород осуществляются путем возбуждения и регистрации упругих колебаний в диапазоне частот 10—80 кГц, отсюда длина волны в скальных породах 5—30 см, а в песчано-глинистых породах 3—15 см. Зона исследования стенок скважины колеблется от 10 до 60 см.

Очень интересными, на наш взгляд, с точки зрения познания процесса являются работы, проводимые с целью исследования распространения волн разных частот в несвязных породах с различной влажностью. В частности, спектральный анализ импульсов различной частоты дает дополнительную информацию для более качественной интерпретации исследований.

Различают два типа волн: продольные и поперечные. Продольные волны связаны с деформацией породы (характеристики сжатия, растяжения), а поперечные — с деформацией формы породы (сдвиговые характеристики).

Общая зависимость скоростей продольных v_p и поперечных v_s волн выражается в виде

$$v_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\gamma_{об}(1+\nu)}}; \quad (16)$$

$$v_s = \sqrt{\frac{E}{2\gamma_{об}(1+\nu)}}; \quad (17)$$

где E — модуль Юнга; ν — коэффициент Пуассона; $\gamma_{об}$ — объемная масса породы.

При сейсмокаротаже, как правило, изучаются первые вступления прямых волн. В зависимости от схемы проведения сейсмокаротажных работ могут быть использованы прямой и обращенный варианты. При прямом сейсмокаротаже источник упругих колебаний располагается на поверхности, а приемник — в скважине. При обращенном варианте — наоборот. При вертикальном сейсмическом профилировании фиксируются и подлежат интерпретации не только первые вступления, но и все остальные волны.

В качестве источников и приемников для акустических исследований используются пьезопреобразователи. Для проведения акустических исследований пород используют аппаратуру СПАК-2М, СПАК-4, «Звук-2», АКН-1 и др. Эта аппаратура предназначена для работы в комплекте каротажных стаций типа АКС и СКВ. При этом они должны быть обеспечены универсальным источником питания УВК-1 и фоторегистратором (ФР-5, ФР-6).

Термометрия

Измерение температуры в скважинах проводят для решения различных инженерно-геологических задач приборами, позволяющими измерять и регистрировать изменение температуры с точностью 0,1 °С.

Естественный температурный режим пород определяется, как правило, при полной температурной стабилизации скважины (5—15 сут). В сухих скважинах применяют медные и полупроводниковые термометры сопротивления ТСМ, КМТ, ММТ и др. В скважинах, заполненных промывочной жидкостью, используют электротермометры ЭТС-2, ЭСО-2, ТЭТ-2, ТЭГ-36 и др.

При глубине скважины до 6 м рекомендуется установка термометров через 0,5 м, а при глубине более 6 м — через 1 м.

Для сухих скважин перспективно использование малоинерционных микротермотранзисторных датчиков, обладающих высокой разрешающей способностью. Стандартным масштабом глубин термограмм являются 1:200 и 1:50, масштаб записи не более 1 °С на 1 см бумаги.

Изучение свойств пород в процессе проходки

Зондирование

Зондирование в отличие от рассмотренных выше методов получения информации не требует предварительной проходки скважин. Оно совмещает проходку пород с одновременным опробованием их. Развитие методов зондирования для исследования свойств рыхлых пород и интерпретация полученных результатов во многом зависят от применяемых технических средств. Ниже рассмотрены наиболее широко применяемые, серийные установки зондирования. При этом основное внимание уделяется не столько технологии процесса зондирования, сколько влиянию размера и формы наконечника зонда на получаемые результаты.

В Советском Союзе с его многообразием геологических и географических условий исследование свойств рыхлых отложений полевыми методами (особенно зондированием и пенетрационным каротажем) все интенсивнее применяется в практике изыскательских работ. Поэтому мы остановимся подробнее на рассмотрении этих методов.

По способу внедрения зонда методы подразделяются на следующие виды зондирования: стандартное пенетрационное испытание (*SPT*), статическое, динамическое, вибрзондирование и комбинации статического зондирования с динамическим и с бурением и др. По мощности силового оборудования установки статического зондирования выделяются легкие, средние и тяжелые. Легкие установки развивают общее усилие вдавливания (в кН) $P < 40$, средние $40 < P < 100$, тяжелые $P > 100$. Существует и более дробное деление с выделением ручных переносных и других зондировочных установок. Установки могут быть самоходные и прицепные. Аппаратура для измерения и регистрации результатов зондирования может размещаться в забое скважины или на поверхности земли. Для передачи информации на поверхность используют механический, гидравлический или электрический (проводной, беспроводной) каналы связи. По условиям, в которых эксплуатируются установки, они делятся на сухопутные и подводные. Это многообразие объясняется широким кругом целей исследования и задач, решаемых в инженерной геологии, а также разнообразными геологическими условиями нашей страны.

СТАТИЧЕСКОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ. При статическом зондировании в грунт с постоянной скоростью вдавливают специальный зонд и одновременно измеряют сопротивления грунта этому вдавливанию. В результате такого зондирования обычно получают удельное сопротивление грунта зондированию $p_q(R, C_{hd})$, равное общему усилию, приложенному к наконечнику, отнесенному к поперечному сечению наконечника. Кроме удельного сопротивления конструкции зондов различных установок позволяют одновременно получать некоторые показатели статического зондиро-

вания — сопротивление трению грунта о боковую поверхность зонда $p_Q(T, p_f, C_{fr})$ или общее сопротивление породы зонду.

Значительный вклад в развитие отечественной теории и практики методов зондирования внесли В. А. Дуранте, Г. К. Бондарик, Ю. Г. Трофименков, И. В. Дудлер, И. С. Комаров, В. И. Ферронский и др.

В настоящее время наиболее широкое распространение в СССР получили установки С-979, С-832, УСЗК-3, СП-59. В связи с тем, что наиболее распространенными установками статического зондирования в СССР являются С-979 и С-832, рассмотрим их более подробно. Установка С-979 позволяет развивать вдавливающее усилие 100 кН; способ вдавливания гидравлический. Диаметр труб 36 мм, штанг 18 мм. Сопротивление породы наконечнику и общее сопротивление зондированию измеряются соответственно динамометром ДОСМ-5 и манометром гидросистемы. Установка смонтирована на одноосном прицепе.

Установка С-832 также развивает усилие 100 кН; максимальная длина зонда с дополнительной штангой 21 м. Штанга захватывается и вдавливается проходным механическим патроном. Зонд оснащен электрическими тензодатчиками, позволяющими отдельно регистрировать сопротивление породы наконечнику и трение породы по боковой поверхности элемента зонда.

В 1974 г. был выпущен стандарт (ГОСТ 20069—74) на метод пологого испытания статическим зондированием. В нем предусмотрена стандартизация головки зонда в виде конуса с $d=36$ мм и $\alpha=60^\circ$. Длина муфты трения должна быть равна 310 мм, диаметр штанг 36 мм, длина звеньев штанг 1 м, скорость зондирования 0,2—2,0 м/мин. Нет сомнений, что стандартизация оборудования и технологии зондирования является значительным шагом на пути повышения качества получаемой информации.

Кроме перечисленных установок в практике инженерно-геологических исследований применяется множество различных по конструкции установок и приставок к буровым станкам для выполнения динамического и статического зондирования. Большинство из них оснащено наконечниками со стандартными размерами по диаметру. Форма же их часто произвольна и не всегда учитывает влияния различных факторов, в первую очередь трения. На рис. 26 и 27 приведены типичные отечественные и зарубежные зондирующие установки.

ДИНАМИЧЕСКОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ. Наряду со статическим зондированием в практике инженерно-геологических изысканий широко применяется динамическое зондирование. Наибольшее распространение получили следующие установки для динамического зондирования: установка буровая пенетрационная УБП-15М (разработанная Гидропроектом), применяемая для бурения скважин и динамического зондирования до глубины 15 м. Основные технологические данные УБП-15М: масса ударника 600 кг, высота его подъема 0,8 м. Установка имеет приспособление для автоматической фиксации высоты сброса ударника. Диаметр штанг 42 мм,

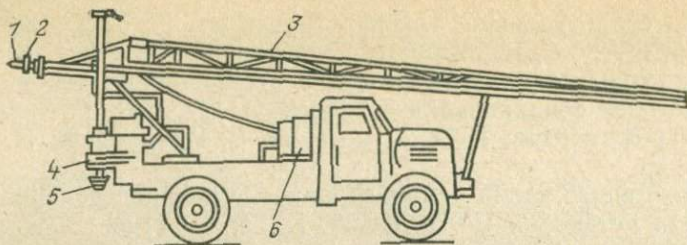


Рис. 26. Установка С-832.

1 — зонд; 2 — зажимное устройство; 3 — стрела; 4 — опорная рама; 5 — анкерная свая; 6 — гидросистема

наконечника 74 мм; калибрующая часть на корпусе отсутствует; угол раскрытия конуса 60° .

В 1974 г. на метод полевого испытания динамическим зондированием выпущен стандарт (ГОСТ 19912—74). В нем предусмотрена возможность применения легкого и тяжелого оборудования, которое при такой же форме и размерах зонда и штанг отличается массой ударника и высотой его подъема (соответственно $P_{уд} = 300$ кг, $h = 0,4$ м и $P_{уд} = 1200$ кг, $h = 1$ м). Установка смонтирована на базе одноосного прицепа.

В результате получают показатели динамического зондирования, выраженные в числе ударов молота на каждые 10 см глубины погружения зонда. Путем пересчета эту величину переводят в силу, отнесенную на 1 см поперечной площади наконечника зонда.

$$P_g = (k\Pi_0\Phi \cdot n)/h, \quad (18)$$

где P_g — условное динамическое сопротивление грунтов; k — коэффициент учета потерь энергии при ударе (0,65—0,49); Π_0 — показатель удельной кинетической энергии; Φ — коэффициент учета трения штанг о грунт (по эксперименту); n — число ударов в залог; h — глубина погружения зонда за залог.

На наш взгляд, такой перевод очень условен и излишен, так как он придает результатам динамического зондирования строго количественный вид, в то время как это скорее качественная характеристика породы, поскольку коэффициенты k и Φ практически неизвестны.

СТАНДАРТНЫЙ МЕТОД ИСПЫТАНИЯ ГРУНТОВ ПЕНЕТРАЦИЕЙ. Этот метод (SPT) очень широко распространен за рубежом и применяется для исследования пород суши и донных отложений. Метод заключается в стандартизации размеров забивного грунтоноса, груза (63,5 кг) и высоты его сбрасывания (76,2 см) (рис. 28). Одновременно с отбором пробы грунта путем забивки грунтоноса регистрируется число ударов, необходимое для забивки грунтоноса на глубину 30,5 см, что позволяет получить обобщенную характеристику механических свойств пород. Вся

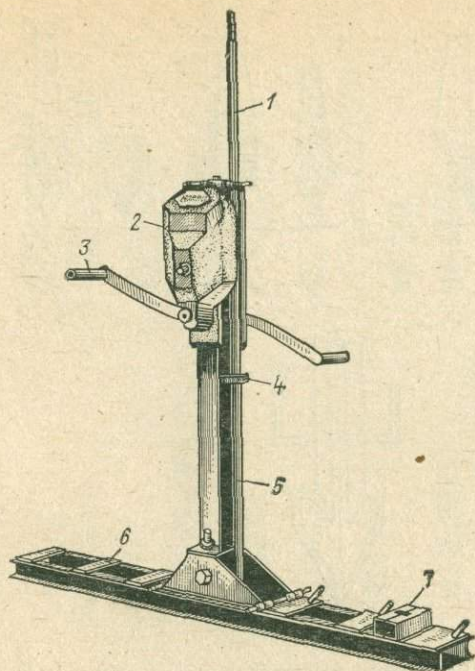


Рис. 27. Зондировочная установка «Боро».

1 — штанга; 2 — редуктор; 3 — рукоятка для вдавливания и извлечения штанг; 4 — захват штанги; 5 — цепь Галле; 6 — основание установки; 7 — крепление анкерной сваи



Рис. 28. Схема пробоотборника, используемого при SPT.

1 — отверстие для выхода воды; 2 — плоский вырез для свинчивания; 3 — центральная часть пробоотборника; 4 — коронка

процедура складывается из следующих операций: очистки забоя от шлама желонкой или струей воды, забивки грунтоноса на глубину 15 см, а затем на глубину 30,5 см (1 фут) с подсчетом затраченных на это стандартных ударов.

ПРИМЕНЕНИЕ ЗОНДИРОВАНИЯ ЗА РУБЕЖОМ. Как статическое, так и динамическое зондирование широко используются во всех странах мира (рис. 29 и 30).

В Болгарии оборудование для динамического зондирования предусматривается стандартом в трех модификациях: легкой ($P_{уд}=200$ кг, $h=0,25$ м), тяжелой ($P_{уд}=500$ кг, $h=0,5$ м) и сверхтяжелой ($P_{уд}=600$ кг, $h=0,8$ м). Легкая и тяжелая установки имеют бескопровую штанговую конструкцию. Статическое зондирование выполняется с помощью установок, подобных бельгийским. Зонд стандартный, скорость погружения 0,2—0,4 м/мин.

В Польше применяется ряд различных установок зондирования, на которые имеются стандарты. Динамическое зондирование осуществляется легкими или тяжелыми зондами. Вес легкого ударника 100 Н, высота его подъема 0,5 м; вес тяжелого 650 Н, а вы-

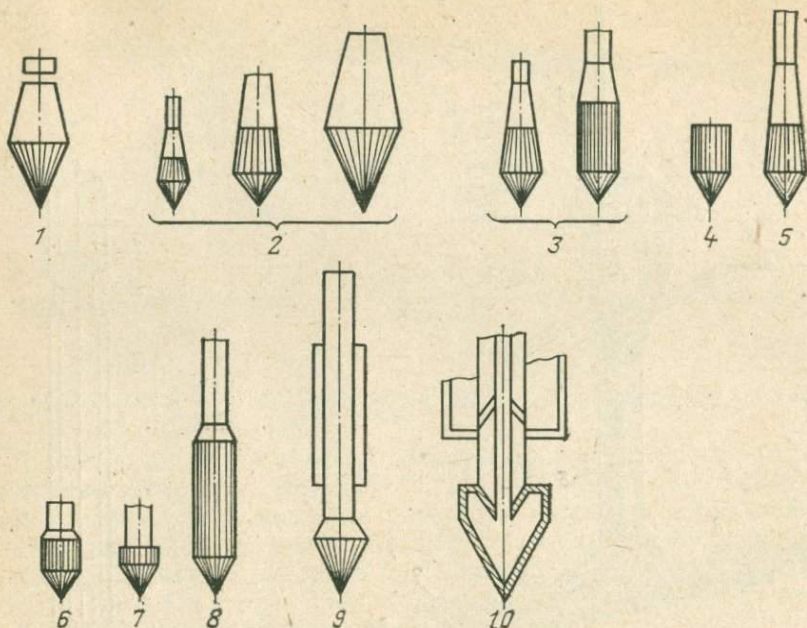


Рис. 29. Наконечники зондов динамического зондирования, применяемые в: 1 — СССР; 2 — Болгарии; 3 — Польше; 4 — Франции; 5 — ФРГ; 6 — Греции; 7 — Италии; 8 — Швеции; 9 — Индии; 10 — Австралии

сота подъема 0,75 м. Испытание грунтов также проводится способом стандартной пенетрации *SPT*. Кроме этого, в практике инженерно-геологических изысканий применяется так называемый шведский бур. Для выполнения статического зондирования применяются как зарубежные, преимущественно голландские, так и собственные установки со стандартным зондом. Скорость зондирования 0,18—0,36 м/мин. Для проведения пенетрационно-каротажных исследований применяется универсальный пенетрометр, сконструированный на базе динамического зонда. Кроме сопротивления породы динамическому зондированию с помощью специальных наконечников определяют кажущееся электрическое сопротивление породы, объемную массу и объемную влажность.

В Бельгии статическое зондирование применяется очень давно и, как правило, производится до начала буровых работ. Динамическое зондирование применяется реже и только в легких вариантах. Установки статического зондирования по мощности (максимальному осевому усилию) делятся на три группы: легкие 25—30 кН, средние 100—140 кН, тяжелые 170—260 кН. Обычно используются голландские стандартные и французские зонды с диаметром 56,4 мм и скоростью погружения 1,2 м/мин. На рис. 30 приведены зонды с диаметрами 35,7 и 56,4 мм, а также зонд с защитной трубой и конус Бегемана с муфтой трения.

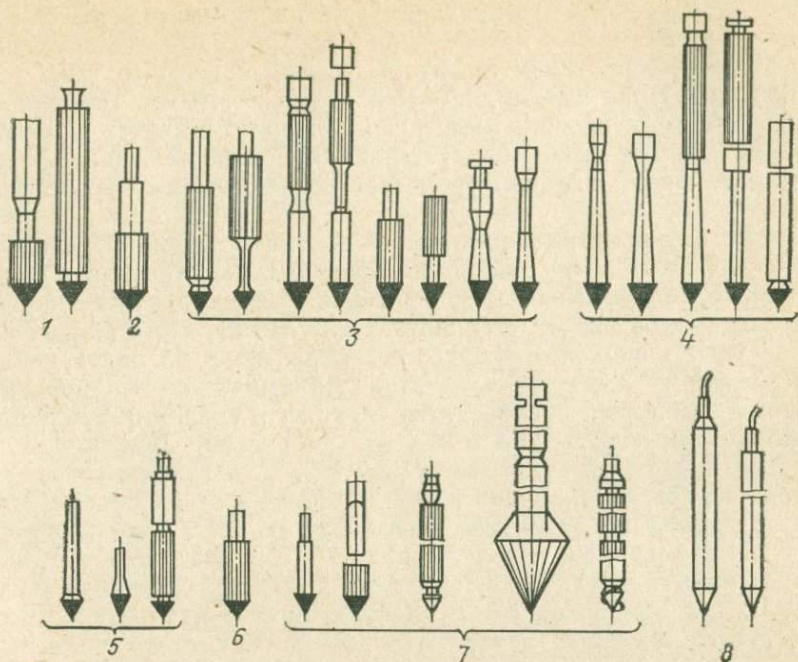


Рис. 30. Наконечники зондов статического зондирования, применяемые в:
 1 — СССР; 2 — Польше; 3 — Бельгии; 4 — Нидерландах; 5 — Франции; 6 — ФРГ; 7 — Швеции; 8 — Австралии

В Нидерландах (см. рис. 30), которые поставляют оборудование для статического зондирования во многие страны, в настоящее время одновременно с традиционными наконечниками, в которых передача сопротивления породы к динамометру или манометру, расположенным на поверхности, осуществляется механически, появились зонды с передачей этой информации электрическим способом. Внешне конструкция зонда фирмы «Фугро» сходна с зондами установки С-832. Скорость вдавливания «электрических» зондов 1,2 м/мин.

Во Франции зондирование применяют многие фирмы. Динамическое зондирование осуществляется различными установками. На рис. 29 приведена типичная форма конуса для динамического зондирования. Соотношения между диаметром наконечника и штанги в зависимости от геологических условий принимаются различными. Вес ударника 50—1500 Н, высота подъема ударника 0,5—1 м. В качестве одной из важнейших характеристик динамического зондирования употребляется так называемая сила начальной пénéтрации P_p :

$$P_p = (P_{уд}h)/F_k \quad (19)$$

где F_k — поперечное сечение наконечника зонда.

Для статического зондирования во Франции применяются различные по диаметру наконечники (см. рис. 30). Наконечники Дельфтской лаборатории имеют стандартный диаметр (36,5 мм), наконечники Паре имеют диаметры 45, 75 и 110 мм. Следует отметить, что в установках конструкции Паре применяется гидравлическая система связи между датчиками, расположенными в наконечнике зонда, и манометром, установленным на пульте регистрации.

В ФРГ зондирование применяется довольно широко. Предназначенное для этого оборудование по степени автоматизации и совершенству технологических приспособлений различно, но на основные элементы зондов введен стандарт. Очень важно, что стандарт введен не только на конструкцию и размеры, но и на приемы обработки и форму выдачи результатов. Динамическое зондирование, по этому стандарту, производится легкими и средними забивными зондами с диаметрами 25,2 и 35,6 мм (см. рис. 29). Тяжелый забивной зонд имеет диаметры 35,6 и 43,7 мм. Для легкого и среднего зондов используют ударники весом 100 Н с высотой подъема 0,5 м. При зондировании тяжелым зондом применяется ударник весом 500 Н, сбрасываемый с той же высоты. Для статического зондирования применяют датские установки, а также установки, в зондах которых для измерения сопротивления породы наконечнику чаще применяется струнный датчик. На рис. 30 приведены размеры и форма наконечников зондов.

В Греции в большинстве случаев применяют установки с наконечником, форма которого показана на рис. 29. Вес ударника 500 Н, высота его поднятия 0,5 м. Для статического зондирования, как правило, применяют голландские пенетрометры.

В Италии для динамического зондирования наряду с другими установками применяется полуавтомат, позволяющий в процессе работы фиксировать число ударов и глубину погружения зонда. Запись результатов осуществляется с помощью самописца. Форма наконечника приведена на рис. 29. Статическое зондирование выполняется установками типа голландских с их же наконечниками.

В Норвегии обычно используют зонд шведской конструкции. В последнее время разработан зонд для одновременного измерения сопротивления породы наконечнику, трения по боковой поверхности и порового давления, вход (фильтр) в который расположен на 1 см выше конуса. За фильтром расположена гидравлическая камера. Внешнее поровое давление передается в эту камеру и измеряется с помощью струнного датчика. В процессе зондирования осуществляется непрерывная запись всех перечисленных характеристик. Скорость зондирования 1,2 м/мин. В Норвежском геотехническом институте разработан зонд для определения коррозионных свойств пород, с помощью которого определяются катодная деполяризация грунта и его электрическое сопротивление. Длина зонда 0,5 м, диаметр 31 мм.

В Швеции методы и технические средства пенетрации при-

меняются очень широко и отличаются большим разнообразием. Повсеместно применяется так называемый «шведский метод зондирования». Динамическое зондирование производится обычно ударником весом 635 Н, сбрасываемым с высоты 0,6 м. Наконечники могут быть съёмными или несъёмными (см. рис. 29); большинство из них имеет значительную боковую поверхность. Для выполнения статического зондирования кроме известных установок фирмы «Борро» с ручным приводом, электрическим измерительным наконечником и записывающим устройством применяются новые установки, в частности с комбинированным способом зондирования (установки *SGI*). В этих установках штанге одновременно дается поступательное и вращательное движение, при этом она имеет развязку с наконечником, благодаря чему последний движется только поступательно. Успешно применяются методика Нильсона и созданная на ее базе установка. На рис. 30 приведен общий вид зондов, в которых наконечник в отличие от предыдущего способа погружения может фиксироваться со штангой и служить для бурения. Такое сочетание осевого вдавливания с одновременным вращением штанг позволяет облегчить установку, увеличить глубину зондирования и получить большую информацию.

В ЮАР и в Израиле, как правило, используется метод *SPT*. В Израиле установка для *SPT* усовершенствована устройством для автоматического сбрасывания грунтов. В ЮАР кроме *SPT* применяется динамическое зондирование конусом с диаметром от 50 до 60 мм. $P=635$ Н и $h=0,75$ м. Кроме того, используется еще ряд динамических зондов различных размеров.

В Индии для динамического зондирования кроме *SPT* применяется комбинированный способ динамического зондирования с промывкой скважины бентонитовым раствором и укреплением стенок скважины специальным приспособлением (см. рис. 29). При этом считается, что разницы между показателем динамического зондирования указанным способом N_c и числом ударов *SPT* практически нет.

В Японии статическое зондирование осуществляется несколькими способами. Применяются голландская установка со стандартными наконечниками, а также ручные статические пенетрометры с площадью наконечника 6,45 см² и углом 30°. Представляет интерес установка, позволяющая производить фозондирование, суть которого состоит в том, что по шуму, возникающему при трении зонда о породу, определяют вид породы.

В Австралии применяется несколько типов динамического оборудования, среди которых можно выделить два основных: легкое — с диаметром 21 мм и специальное — для исследования гравелистых отложений (см. рис. 29). Последний вариант имеет оригинальное устройство для комбинированного зондирования (ударным и вращательным способом с промывкой). Для статического зондирования используется специальная установка с максимальным усилием вдавливания 200 кН. На рис. 30 приведена конструкция зондов с диаметрами 35,7 и 50 мм. Конструкция

зондов аналогична тензометрической части станции СПК. Зонды позволяют одновременно регистрировать сопротивление наконечнику и трение его боковой поверхности. Вдавливающее устройство установлено в месте расположения центра тяжести установки.

В США для исследования связных пород чаще всего используются голландские установки. Широко применяется *SPT*.

Анализируя применяемые технические средства, нельзя не упомянуть о подводном зондировании. Имеется в виду использование зондирования для получения информации о донных отложениях в пределах шельфа. Интенсивное развитие поисковых работ на нефть, газ и другие полезные ископаемые, работа с буровых платформ различных конструкций требуют строгого расчета прочности основания, на котором устанавливается или крепится буровая платформа. Отсюда необходимость детальной оценки свойств донных отложений по глубине и простиранию. Кроме того, есть целый ряд инженерно-геологических задач, требующих изучения пород под водой. В качестве примера можно привести работы, выполнявшиеся на ранних стадиях изысканий на одной из плотин. Статическое зондирование использовалось там для оценки плотности намываемых под воду и уплотняемых виброуплотнителями песков. Для контроля применялась обычная сухопутная установка, размещенная на площадке, прикрепленной к двум баржам и к верхней части тяжелой обсадной трубы; вес ее вместе с балластом, компенсировавшим реакцию зонда, достигал 100 кН. Внутри обсадной находилась труба меньшего диаметра, через которую зонд опускался на поверхность грунта. Такое громоздкое сооружение было необходимо для того, чтобы избежать изгиба пенетрационных штанг, находящихся между установкой и дном. Работы с плавсредств установками статического и динамического зондирования, проведенные в нашей стране, показали малую перспективность использования сухопутных установок статического зондирования для подобных работ.

Что касается динамического зондирования, то оно может успешно применяться без обсадных труб при глубине воды до 4 м и с легкими трубами до 10 м (УБП-15). При этом легкая труба, диаметр которой несколько больше диаметра штанг, подвешенная к наковальне так, что ее нижний конец примерно на метр не доходит до поверхности дна, является кондуктором штанг, препятствует их изгибу в момент удара и предотвращает потерю устойчивости. На базе этих работ возникло принципиально новое направление решения задачи зондирования донных отложений на больших глубинах, реализованное в виде создания подводной пенетрационно-каротажной станции ПСПК.

Резкое увеличение в последнее время объема работ на шельфе и на дне Мирового океана потребовало разработки принципиально новых методов и технических средств для оценки показателей инженерно-геологических свойств донных отложений; причем ведущее место заняли методы группы зондирования и пенетрационного каротажа. Возросли требования к качеству получаемой информа-

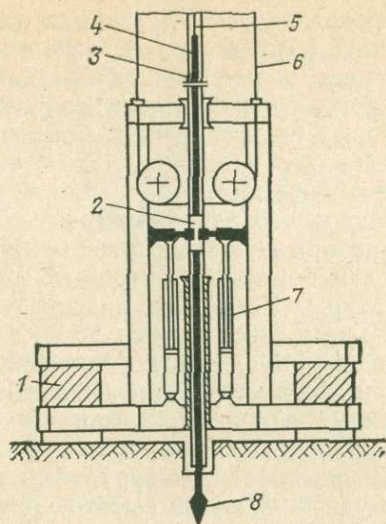


Рис. 31. Установка «Стингрей»:

1 — балласт; 2 — гидравлический патрон; 3 — буровая труба; 4 — штанга; 5 — электромеханический кабель; 6 — трос; 7 — гидроцилиндр; 8 — наконечник

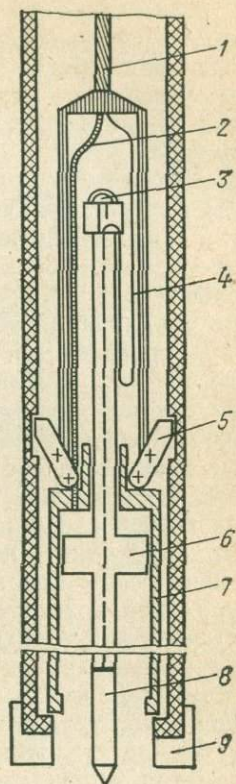


Рис. 32. Установка «Визон»:

1 — подъемный кабель; 2 — электрический кабель; 3 — напорный шланг; 4 — подъемная штанга; 5 — фиксаторы; 6 — гидравлический поршень; 7 — буровая труба; 8 — электрический пенетрометр; 9 — буровая коронка

ции и к технологии ведения работ, что в первую очередь выразилось в создании средств, слабо зависящих от погодных условий (создание донных устройств, не имеющих жесткой связи с обеспечивающим судном, повышение оперативности исследований за счет разработки принципиально новых методов и оборудования и использования машинной обработки, увеличение глубинности исследования по воде и породе, повышение комплексности и чувствительности первичных преобразователей).

В настоящее время зарубежные фирмы перешли к разработке донных зондирующих установок различных типов, подразделяющихся в основном на установки: а) размещаемые на стоянках и используемые на мелководье; б) типа ПСПК, опускаемые на дно, глубина зондирования которых не превышает 30 м; в) опускаемые на дно, глубина зондирования (в комбинации с бурением) достигает 150—200 м (например, «Стингрей», приведенная на рис. 31); г) размещенные на судах с динамической стабилизацией, используемые в комбинации с бурением (например, «Визон», приведенная на рис. 32).

Установки типа «Стингрей» предназначены для работы в комплексе с судовой буровой установкой и позволяет исследовать породы до глубины 200 м, обеспечивая получение информации для проектирования оснований под опоры буровых платформ, забивку свай, а также для оценки некоторых свойств пород. Работы, как правило, ведут с бурового судна водоизмещением 1,5—2 тыс. т, имеющего шахту размером не менее 3×3 м.

Сама установка состоит из подводного вдавливающего устройства с длиной штока около 1 м, набора забойных приспособлений, опускаемых в скважину на тросе, и бортовой контрольно-измерительной и гидравлической аппаратуры. Установка развивает усилие вдавливания около 10^2 кН и имеет в воде массу 20 т.

В процессе проведения исследований установку опускают на дно с помощью лебедки. К верхней части устройства присоединяют два направляющих троса, связанные с судном, которые направляют бурильный инструмент при спуске в скважину. Пенетрационные испытания состоят из нескольких операций: бурильные трубы зажимают плашками домкрата и удерживают на высоте около 1 м над забоем скважины, внутрь бурильных труб на кабеле-тросе вводят скважинный пенетромтр (специальную штангу длиной 6 м с коническим наконечником). Штангу фиксируют в нижней части бурильной колонны с помощью специальных конусных зажимов, которые могут захватывать и освободить штангу пенетромметра при вдавливании и извлечении. Усилие вдавливания, развиваемое установкой через зажимные плашки домкрата, передается на бурильные трубы и далее через конусные зажимы в бурильных трубах на скважинный пенетромтр. Глубина вдавливания пенетромметра определяется длиной штанги (1—3 м). По окончании работы зонд извлекают на борт судна с помощью троса, а скважину разбуривают обычным способом до отметки исследованного интервала. Далее операции повторяют в той же последовательности. Вместо пенетромметра на забой скважины можно вводить пробоотборник или прессиомтр. Пробоотборник имеет длину около 1 м и диаметр 75 мм. При работе по указанной схеме бурильные трубы не имеют жесткой связи с судном, в результате его пробоотборник не подвержен воздействию вертикальных перемещений судна, возникающих при волнении моря.

Для проведения статического зондирования иногда используют специальный водолазный колокол. Он имеет форму цилиндра (высотой около 5 м и с внутренним диаметром 1,8 м) и прикреплен к опорной плите с помощью шарового шарнира, позволяющего при неровностях дна устанавливать колокол вертикально. Балласт, прикрепленный к опорной плите, способствует увеличению устойчивости прибора при зондировании. Колокол оборудован пенетрационной установкой и буровым станком, а также специальным сальниковым устройством. Энергия и воздух подаются в колокол с борта судна по шлангам и кабелям. Передача получаемой информации на борт судна производится по телеметрическому каналу. Колокол может использоваться при глубине воды до 200 м.

Стреляющая пенетрационная система, разработанная в Великобритании, считается достаточно перспективной. Она состоит из салазок, буксируемых над поверхностью дна, на которых расположены магазин со снарядами, трубка, газовый резервуар и приемник телеметрической информации (рис. 33). Кабель-трос включает шланг для подачи газа и кабель для передачи информации на судно.

В процессе проведения исследований установка стреляет снарядами (массой около 10 кг) со скоростью 60 м/мин. В снаряде установлен первичный преобразователь пьезоакселерометр, информация от которого передается по радиоканалу к приемнику и далее по кабель-тросу на борт судна. Вероятная глубина проникновения снаряда в породы около 10 м.

Подводя итог, следует отметить, что в настоящее время для зондирования применяется много технических средств, зонды которых различаются по размерам и форме наконечников (см. рис. 29 и 30), а также по технологии внедрения. Объясняется это спецификой геологических условий и уровнем технического развития. Тем не менее наблюдаются тенденции стандартизации технологии, размеров и формы наконечников зондов, усложнение оборудования и аппаратуры, используемых для получения и регистрации показателей зондирования, повышение чувствительности забойных преобразователей. Повышается автоматизация рабочих операций. Расширяется комплекс измеряемых показателей (кажущееся сопротивление пород, поровое давление и т. д.). Разрабатываются устройства для исследования донных отложений шельфа.

И все же применяемый комплекс зондирования не позволяет однозначно определить ряд показателей свойств пород без бурения и отбора проб.

Исследование пород методами пенетрационного каротажа

СПЕЦИФИКА ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ПЕНЕТРАЦИОННОГО КАРОТАЖА. Появление и внедрение в практику инженерно-геологических исследований целого ряда полевых методов (динамического и статического зондирования, испытаний породы в выработках штампами, прессиометрии, вращательного среза грунта крыльчаткой и др.) было вызвано стремлением оценивать показатели свойств пород непосредственно в естественных условиях, так как традиционные методы отбора проб и испытания

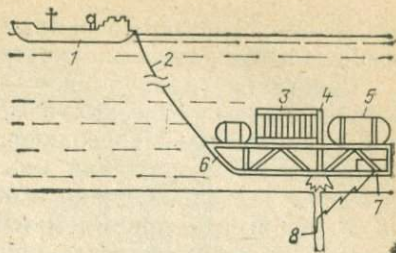


Рис. 33. Стреляющая пенетрационная система

1 — судно; 2 — кабель-трос, связывающий пенетрационную систему с судном; 3 — кассета со снарядами; 4 — направляющая; 5 — баллон со сжатым воздухом; 6 — рама; 7 — регистрирующая аппаратура, расположенная на раме; 8 — снаряд с первичными преобразователями

их в лабораторных условиях не всегда позволяли получать истинные значения данных показателей.

Сочетание традиционных и экспрессных полевых методов при инженерно-геологических изысканиях дает возможность получить набор показателей, позволяющих более уверенно подходить к проектированию сооружений или прогнозированию инженерно-геологических условий. Однако и этот подход к решению поставленных задач не всегда приемлем и оптимален, так как он имеет недостатки: 1) невозможность одновременно и в одной точке массива (объем $30 \times 30 \times 30$ см) получить полный набор показателей состава, состояния и свойств пород; 2) дублирование общих операций опробования; 3) необходимость во всех случаях выполнения горных работ и отбора проб породы; 4) сложность сочетания различных технических средств при исследовании донных отложений.

В связи с этим наиболее перспективно сочетание экспресс-методов на базе одного метода — способа проходки. Именно к такому комплексу относится пенетрационный каротаж. Следует отметить, что технические средства, применяемые для пенетрационного каротажа (особенно аппаратура), значительно сложнее, чем для динамического или статического зондирования, зато и эффективность пенетрационного каротажа гораздо выше (табл. 6). За рубежом это направление также получает развитие.

В последнее время в литературе встречаются классификации зондировочных установок в зависимости от их максимального

Таблица 6

Технические данные пенетрационных станций

Параметры	СПК	СПК-Т	ПСПК-69
Глубина вдавливания, м	25	30	25
Усилие:			
вдавливания, кН	12	19	12,5
извлечения, кН	15,7	25	12,5
Диаметр:			
бурильных труб, мм	50	63,5	63,5
утолщенной части зонда, мм	62	80	80
Длина бурильных труб, м	6,5	6	9,6
Максимальная глубина анкерения, м	2	3	—
Ход подачи, мм	1300	1000	800
Напряжение питания аппаратуры, В	~220	12	~220
Система передачи информации	Проводная	Телеметрическая	Проводная
Источник излучения:			
^{137}Cs , распадов $\cdot \text{с}^{-1}$	5×10^8	$1,0 \times 10^9$	5×10^8
Рц-Ве, нейтронов $\cdot \text{с}^{-1}$	2×10^5	$2,5 \times 10^5$	—
Экипаж станции, чел.	5	3	4

Примечание. СПК—станция пенетрационного каротажа; СПК-Т—то же, телеметрическая; ПСПК-69—то же, подводная.

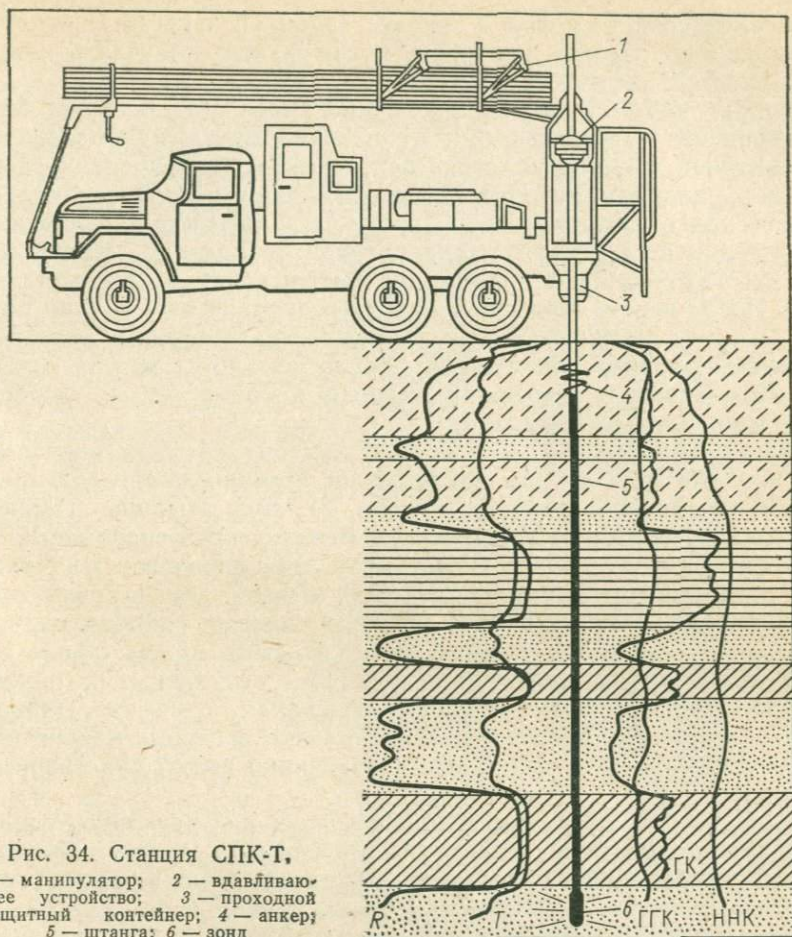


Рис. 34. Станция СПК-Т.

1 — манипулятор; 2 — вдавливающее устройство; 3 — проходной защитный контейнер; 4 — анкер; 5 — штанга; 6 — зонд

усилия вдавливания (мощности). В группу тяжелых установок этой классификации иногда включают пенетрационно-каротажные станции (СПК). На наш взгляд, это не совсем верно по двум причинам: во-первых, мощность установок статического зондирования не определяет гарантированной глубины проходки, которая практически является главным показателем класса установок; во-вторых, такие станции — это технические средства для получения комплекса показателей свойств пород базовым методом (способом проходки), в которых наряду со статическим зондированием может быть применен любой вид бурения при условии выполнения основных правил погружения первичных преобразователей в породу.

Поскольку СПК являются техническими средствами, реализующими идею сочетания ряда методов для получения определенных

показателей свойств пород с заранее заданной чувствительностью непрерывно по глубине проходки, к ним нужно подходить как к совершенно специфическим установкам.

Станции СПК-Т. Функциональные узлы (рис. 34). Вдавливательное устройство состоит из зажимного гидромеханического патрона, перемещаемого в вертикальном направлении главными гидроцилиндрами. Патрон по отношению к колонне бурильных труб является проходным. В процессе работы при вдавливании и извлечении штанг три плашки патрона сдвигают и захватывают их. Поступательное движение патрона передается колонне штанг. После перемещения колонны по вертикали на 1 м (ход патрона) плашки разжимаются и патрон возвращается в исходное положение (верхнее или нижнее), после чего цикл можно повторить. При холостом движении патрона колонна штанг удерживается специальным тормозом.

Анкерное устройство (4) состоит из двух анкерных свай, которые служат для закрепления станции в определенном положении, гашения реакции грунта на зондирование. Привод каждой сваи состоит из гидромотора, механической трансмиссии и проходного вращательного ствола сваи, расположенного на траверсе вдавливающего устройства. Для осевой подачи свай при их завинчивании используются главные силовые гидроцилиндры, работающие в неполном режиме. Жесткая связь между стволом и рамой станции осуществляется посредством специальных патронов-зажимов, размещенных на концах основания портала. Привод анкерных свай может обеспечить завинчивание винтовых наконечников на глубину до 3 м. Винтовые наконечники имеют три типовых размера.

Манипулятор 1, имеющий конструкцию раскладывающегося параллелограмма, позволяет производить захват, прямой подъем, перемещение по вертикали и укладку штанг в кассету, что полностью исключает применение ручного труда.

Прходной защитный контейнер 3 для хранения наконечника зонда с радиоактивными источниками имеет откидной поддон, который отбрасывается при работе станции и фиксирует положение наконечника в контейнере при его транспортировке и на стоянке. Во вне рабочее время контейнер с источниками излучения закрывается на замок и пломбируется.

Механизм синхронного привода лент самописущих регистраторов состоит из ролика, прижатого к бурильным трубам, и датчика импульсов. В процессе погружения зонда самописцы с импульсными двигателями, расположенные в кабине оператора, обеспечивают синхронную запись информации в масштабе 1:50.

В комплект установки входят пять штанг диаметром 63,5 мм и длиной 6 м, размещающихся в кассете. Соединение труб производится с помощью конусных резьбовых ниппелей.

Энергоснабжение аппаратного комплекса осуществляется от бортовой сети автомобиля с напряжением 12 В. Изме-

рительный зонд питается от автономной батареи аккумуляторов, зарядка которой может производиться от бортовой сети установки.

Гидравлическая система станции приводится в действие четырьмя гидравлическими насосами, имеющими привод от коробки отбора мощности автомобиля. Автономное питание гидросистемы станции, а также отказ от автоматического режима значительно упростили ее устройство, повысили надежность работы. Управление гидросистемой станции осуществляется с двух пультов. Все операции по наращиванию колонны труб (работа с манипулятором) производятся с отдельного пульта, расположенного на портале.

КОМПЛЕКС ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ И РЕГИСТРИРУЮЩЕЙ АППАРАТУРЫ. Аппаратура МАК-5П состоит из глубинного зонда, включающего пять измерительных преобразователей (ИП), и наземного блока, который монтируется в кабине оператора станции СПК-Т (рис. 35).

Для нейтрон-нейтронного каротажа (ННК) используется плутоний-бериллиевый источник излучения и кристаллический детектор рассеянных нейтронов ЛДНМ с фотоэлектрическим умножителем (ФЭУ), для гамма-каротажа (ГК) — сцинтилляционный детектор NaI(Tl) с ФЭУ.

Для измерения сопротивления породы вдавливанию зонда используют ИП, с помощью которых механическое воздействие на наконечник зонда преобразуется в электрические сигналы. Каждый ИП представляет собой тензометрический мост, составленный из четырех тензорезисторов, выполняющих функции измерительных и термокомпенсационных плеч. Тензорезисторы наклеены по образующим цилиндра чувствительного элемента и воспринимают его механические деформации. Компенсационные тензорезисторы наклеены перпендикулярно к измерительным. Электрические сигналы с каждого радиометрического и тензометрического ИП усиливаются в соответствующих блоках.

Для повышения устойчивости системы к помехам и обеспечения передачи пяти характеристик с помощью беспроводной гальванической связи в телеизмерительной аппаратуре МАК-5П применена

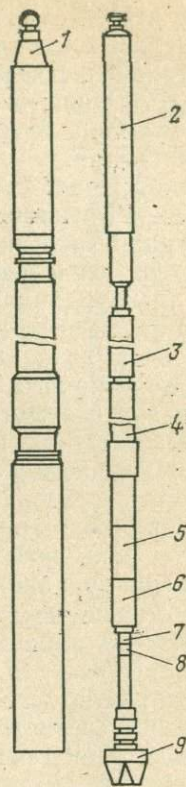


Рис. 35. Схема зонда аппаратуры МАК-5П.

1 — корпус зонда; 2 — блок питания зонда; 3 — функциональный блок схемы зонда; 4 — блок ГК; 5 — фотоэлектрический умножитель; 6 — кристалл ЛДНМ; 7 — источник нейтронов; 8 — источник гамма-лучей; 9 — наконечник

система АИМ-ЧМ — модуляция сигнала с временным разделением измерительных каналов. При временном разделении каждому каналу периодически предоставляется определенный временной интервал, в течение которого передается радиоимпульс канала, частота заполнения которого линейно связана со значением измеряемого параметра.

В аппаратуре МАК-5П модуляция сигнала осуществляется в две стадии. Вначале в передающей части аппаратуры происходит амплитудно-импульсная модуляция, когда на выходе модулятора появляется последовательность импульсов, амплитуда которых прямо пропорциональна текущему значению измеряемого параметра, а затем частотная модуляция, когда частота электрического сигнала на выходе частотного модулятора прямо пропорциональна амплитуде импульса на его выходе. Достоинством кодирующего устройства в системе АИМ-ЧМ является одновременное использование коммутатора как для переключения каналов, так и для амплитудно-импульсной модуляции.

Для осуществления последней непрерывные сигналы с каждого интегратора подаются на входы соответствующих ключей блока канальных модуляторов, управляемых по вторым входам сигналами блока управляющих напряжений. Отличительной чертой системы с временным разделением каналов является то, что в ней синхронизирующий канал используется не только для разделения информационных каналов, но и для передачи информации о стабильности несущей частоты f_0 . С выходов ключей импульсы, амплитуда которых соответствует напряжению на интеграторе параметра, подаются в блок генератора, где осуществляется частотная модуляция сигнала. После необходимого усиления по мощности с помощью АИМ-ЧМ сигналы излучаются в породу антенной (наконечником зонда). Питание аппаратуры зонда осуществляется от автономного блока, расположенного в зонде и состоящего из батареи аккумуляторов типа КНГ-1,5 общим напряжением не менее 12 В.

Сигнал, переданный на поверхность и принятый антенной (электродом, вбитым в грунт на расстоянии 0,5—1,0 м от станции), поступает в приемное устройство, структурная схема которого обеспечивает контроль за изменением несущей частоты путем выработки соответствующего сигнала, позволяющего практически компенсировать дополнительную погрешность измерения, вызванную нестабильностью несущей частоты, так как демодуляция сигналов в информационных каналах учитывается вычитанием частот информационного и синхронного каналов. Сигнал для контроля за несущей частотой передающего устройства фиксируется при приеме синхримпульсов тем же демодулятором, который применяется для сигналов информационных каналов.

Для получения на выходе демодулятора сигналов, пропорциональных приращению частоты в каждом канале, осуществляются следующие операции. После усиления и фильтрации частотно-модулированных сигналов с помощью счетчика формируются

сигнальные импульсы, длительность которых обратно пропорциональна частоте сигнала каждого канала. Полученные импульсы сравниваются с длительностью опорного импульса, исходящего от управляемого генератора следящего демодулятора. Разность длительностей импульсов используется для формирования управляющего напряжения, приводящего систему в равновесие. При этом величина этого напряжения прямо пропорциональна приращению частоты в каждом канале. К соответствующим выходным устройствам подключены каротажные регистраторы Н-361. Величина отклонения пера самописца функционально связана с измеряемой величиной.

Возможность передачи информации от зонда к наземной аппаратуре по штангам и породе без проводов позволяет не только увеличить объем передаваемой информации, но и использовать для проходки породы вращательные (или другие) способы внедрения зонда, что дает возможность с принципиально новых позиций решать задачи, стоящие перед инженерами-геологами и гидрогеологами.

Создание многоканальной теленмерительной аппаратуры МАК-80 вызвано необходимостью устранить ряд конструктивных недостатков аппаратуры МАК-5П. Аппаратура МАК-80 имеет следующие преимущества. Путем увеличения числа поддиапазонов каналов R , T и GK повышена разрешающая способность аппаратуры по этим показателям. Переключение поддиапазонов осуществляется по обратному телеметрическому каналу связи с пульта наземной аппаратуры. В результате использования интегральных микросхем повышена надежность работы, уменьшены габариты и масса аппаратуры. Снижено потребление энергии для питания аппаратурой зонда.

В целях повышения разрешающей способности метода ННК упрощена конструкция наконечника зонда и облегчены условия замены изношенного разделителя. В новом зонде последний выполнен в виде текстолитовой шайбы и перенесен в коническую часть наконечника зонда. Разработаны сменные наконечники (рис. 36).

Небольшие размеры зонда аппаратуры МАК-80 позволяют постоянно хранить его в контейнере в собранном состоянии (с наконечником), что обеспечивает большую радиационную безопасность при пенетрационно-каротажных исследованиях.

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ПОДВОДНОГО ПЕНЕТРАЦИОННОГО КАРОТАЖА. Одновременно с развитием сухопутных установок пенетрационного каротажа проводились работы по созданию методики и технических средств для выполнения

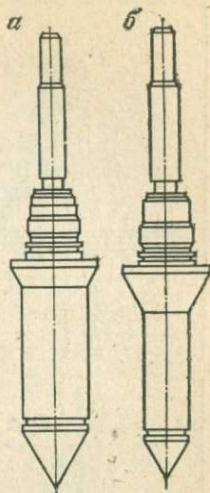


Рис. 36. Сменные наконечники к зонду МАК-80.
 $a - d=600$ мм; $b - d=36,5$ мм

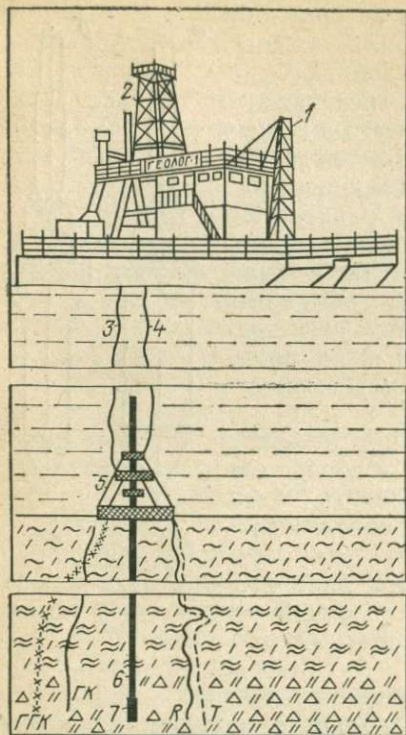


Рис. 37. Пенетрационно-каротажная установка «Геолог-1».

1 — буровая установка УГБ-50; 2 — копер для спуска и подъема подводной станции пенетрационного каротажа; 3 — кабель связи и энергообеспечения; 4 — трос; 5 — подводная станция пенетрационного каротажа; 6 — штанги; 7 — зонд

ние механических свойств пород в естественных условиях гостированными методами и использование обычного для сухопутных условий способов оценки свойств пород.

Поэтому наиболее рациональной представляется технология исследования донных отложений, позволяющая одновременно в одной точке разреза непрерывно по глубине получать большую часть показателей свойств пород, используемых для проектирования или прогноза. Этим требованиям, как правило, удовлетворяет пенетрационный каротаж.

После макетных испытаний ПСПК, в результате которых было выполнено около 1500 м пенетрационного каротажа, была создана специализированная плавучая буровая установка «Геолог-1» — морское самоходное судно-катамаран, предназначенное для комплексных инженерно-геологических исследований донных отложений (рис. 37).

подводных работ. Начало их было связано с необходимостью проведения геотехконтроля за состоянием намываемых под воду песков.

В связи с этим было опробовано несколько вариантов изучения донных отложений на одном из водохранилищ с помощью сухопутной пенетрационно-каротажной станции, установленной на понтоне. Однако понтон стабилизировать не удалось: сразу же после начала зондирования он приподнимался и смещался в сторону, что могло привести к деформации штанг. Было предложено принципиально новое решение задачи зондирования донных отложений на больших глубинах, реализованное в виде подводной пенетрационно-каротажной станции ПСПК.

Станция была опробована на строительстве ряда объектов. Условия подводных работ по оценке состава, состояния и свойств донных отложений значительно отличаются от сухопутных: чрезвычайно затруднены отбор и подъем проб грунта с ненарушенной структурой, невозможны определе-

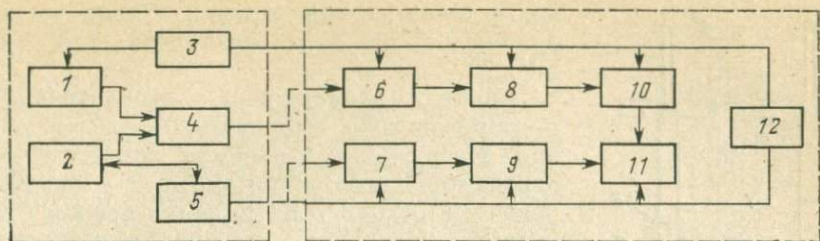


Рис. 38. Блок-схема измерительной и регистрирующей аппаратуры ПСПК
 Блоки преобразователей: 1 — радиометрических, 2 — тензометрических, 3 — высоковольтного питания; 4 — предусилителей; 5 — коммутации; 6 — усилителей радиометрических каналов, 7 — модуляторов, 8 — дискриминаторов, 9 — усилителей тензометрических каналов; 10 — интеграторов, 11 — регистраторов, 12 — питания

Размещенная на судне станция подводного пенетрационного каротажа ПСПК состоит из следующих основных элементов (см. рис. 37): погружаемого на дно акватории приспособления (установки), с помощью которого производится вдавливание и извлечение колонны штанг с зондом, аппаратуры, пультов управления и регистрации. Кроме транспортировки судовые механизмы позволяют осуществлять спуско-подъемные работы и обеспечивают потребность агрегатов и аппаратуры в энергии. В отличие от аппаратуры на СПК-Т связь между зондом и пультом управления ПСПК в данном случае осуществляется с помощью кабеля, так как в морских условиях такой вариант наиболее надежен.

На рис. 38 приведена блок-схема аппаратуры ПСПК. В комплекс зонда вошли четыре первичных преобразователя (методов ГГК, ГК, тензометрия R и T). Отсутствие метода ННК значительно усложнило интерпретацию результатов.

ТЕХНОЛОГИЯ ПЕНЕТРАЦИОННОГО КАРОТАЖА. Перед началом пенетрационно-каротажных работ проводится градуировка аппаратуры для выявления чувствительности измерительных преобразователей и определения масштаба записи регистрируемых параметров. Надежность градуировки, а следовательно, и качество получаемой информации могут быть обеспечены лишь при условии тщательной подготовки измерительной аппаратуры и в первую очередь проверки соответствия параметров измерительных каналов предъявляемым к ним требованиям. Качество градуировки радиометрических каналов во многом зависит от достоверности лабораторных определений показателей свойств пород, представительности образцов и точности их привязки к интервалам глубин на диаграммах пенетрационного каротажа.

Ниже описаны приемы, применяемые для получения градуировочных характеристик измерительных каналов комплекса. Эти приемы применимы и для аппаратуры ПСПК.

При градуировании тензометрических каналов необходимо иметь устройство для крепления зонда, образцовые динамометры и домкраты, позволяющие создать на наконечнике зонда максимально (для ИП) допустимое давление и измерять

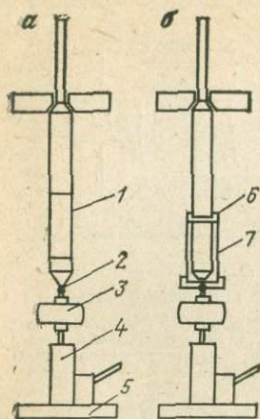


Рис. 39. Схема градуировки тензодатчиков канала: а — лобового сопротивления; б — трения.

1 — зонд; 2 — шарик; 3 — образцовый динамометр; 4 — домкрат; 5 — опорная плита; 6 — упорное кольцо; 7 — стакан

его в процессе градуировки. Схема расположения всех этих элементов дана на рис. 39.

Сначала градуируют измерительный преобразователь удельного бокового трения. Нагрузка, создаваемая домкратом 4, передается через динамометр 3 и градуировочный стакан 7 на цилиндр трения ступенями. Нагрузка должна повышаться ступенями (1000—2000 Н) до предельной, а затем понижаться также ступенями до 0. Этот цикл повторяется три-четыре раза. Градуировочная характеристика считается достоверной, если погрешность при повторных измерениях и обратном ходе не превышает $\pm 5\%$. Полученные результаты сводят в таблицу, где указывают значения общей нагрузки P_T , удельного трения T , определяемого как результат деления значений P_T на площадь внешней боковой поверхности элемента трения F_T и отклонения пера самописца. По данным таблицы строят усредненный градуировочный график отклонения пера самописца в зависимости от удельного

бокового трения. На нем по вертикальной оси откладывают значения отклонений пера самописца, а по горизонтальной — удельное боковое трение. График позволяет получить данные для оцифровки шкал регистраторов через равные интервалы или равные дольные части (0,1; 0,2; 0,3 и т. д. или 0,5; 0,10; 0,15; 0,20 и т. д.).

Аналогично градуируется канал измерения удельного лобового сопротивления. Нагрузку повышают ступенями по 10 000 Н. Для перевода давления в удельное сопротивление общее усилие P (определенное по динамометру) относят к площади максимального поперечного сечения наконечника зонда. Масштаб записи на диаграммах наносится в целых единицах (например, 2, 4, 6, 8 МПа и т. д.).

Как правило, градуировка тензометрических каналов осуществляется перед началом полевых работ, ежемесячно в процессе работ и после каждого ремонта регистрирующей и записывающей аппаратуры, а также после замены тензометров или попадания воды в зонд. Текущий контроль за работой аппаратуры проводится ежедневно по положению нулей.

Градуировка радиометрических каналов на грунтах в условиях естественного залегания. Способ градуировки радиометрических зондов станции СПК-Т на грунтах в естественном залегании наиболее предпочтителен, так как в этом случае можно непосредственно связать результаты измерений пенетрационно-каротажным комплексом с характеристиками основных видов пород. При этом

желательно придерживаться определенной последовательности выполнения операций градуировки.

На исследуемой территории по результатам предварительного пенетрационного каротажа и другим геологическим данным выбирают пункты для заложения шурфов или скважин. Число их определяется тем, что для получения достоверных градуировочных зависимостей надо иметь как минимум по четыре-пять определений объемной массы и объемной влажности, распределенных равномерно во всем диапазоне измеряемых величин ($\gamma_{об} = 1,4 - 2,3 \text{ т/м}^3$; $W_{об} = 0,01 - 0,50$) в разных видах пород. До проходки шурфа по углам его контура повторно производят пенетрационный каротаж, что позволяет получить усредненные значения измеряемых показателей, а также установить интервал глубин с одинаковыми значениями показателей $\gamma_{об}$ и $W_{об}$. Образцы грунта для лабораторного определения

объемной массы и влажности отбирают из однородных и достаточно мощных (около 1 м) горизонтов (по три образца из каждого). Полученные в лаборатории средние значения $\gamma_{об}$ и $W_{об}$ сопоставляют с соответствующими величинами зарегистрированной интенсивности радиоактивного излучения. Эти данные позволяют построить градуировочные зависимости $I_{\gamma} = f(\gamma_{об})$ и $I_n = f(W_{об})$.

Пенетрационный каротаж и отбор в контрольных выработках образцов пород желательно проводить одновременно, что позволит исключить возможность изменения физических свойств грунтов.

Для контроля за стабильностью работы аппаратуры используют универсальное контрольно-моделирующее устройство КМУ, позволяющее оценивать воспроизводимость градуировочных зависимостей по плотности и влажности. КМУ представляет собой цилиндрическую емкость диаметром 300 мм и высотой 740 мм (рис. 40). В ней расположена кассета с девятью алюминиевыми трубками с внутренним диаметром 36 мм. Верхние (открытые) и нижние (закрытые) концы трубок закреплены, что обеспечивает жесткость конструкции калибровочного устройства. Имитация естественной среды различной плотности и влажности производится путем заполнения алюминиевых трубок водой или введением в них стальных стержней (комплект из 10 стержней прилагается к моделирующему устройству). В целях уменьшения влияния рассеянного гамма-излучения от металлических конструкций пенетрационной установки кассета алюминиевых трубок защищена снаружи цилиндрическим экраном, выполненным из свинцового листа толщиной 0,2 см.

Для получения градуировочной характеристики КМУ зонд,

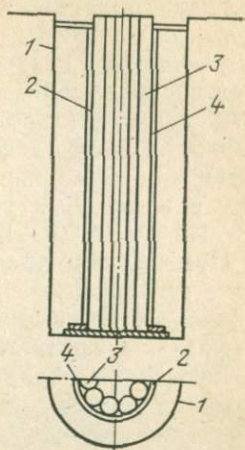


Рис. 40. Контрольно-моделирующее устройство КМУ.

1 — емкость; 2 — кассета;
3 — металлический стержень; 4 — свинцовый экран

проградуированный на естественных средах, вводят в направляющую трубу КМУ и измеряют интенсивность рассеянного гамма-излучения и нейтронов. При выполнении измерений емкость постепенно заполняют водой. Алюминиевые трубки также наполняют водой или вводят в них в различных комбинациях стальные стержни. Этим достигается широкий диапазон моделирования изменения интенсивности радиоактивных излучений, соответствующих в природных условиях изменениям $\gamma_{об}$ и $W_{об}$ в интервалах 1,2—2,2 т/м³ и 0,0—1,0 соответственно.

При каждом последующем заполнении КМУ водой или стержнями регистрируют интенсивность рассеянного гамма-излучения и нейтронов. Полученные результаты относятся по градуировочным графикам к соответствующим значениям $\gamma_{об}$ и $W_{об}$.

Проэталонированное таким образом КМУ используется для проверки воспроизводимости градуировочной характеристики пене-трационно-каротажных зондов, а также для контроля за стабильностью работы аппаратуры.

Ввиду того, что геометрия моделирующего устройства не позволяет освободиться от воздействия на детекторы переменного рассеянного гамма-излучения от окружающих предметов, градуировку зондов желательно проводить в стационарных условиях.

Перед каждым зондированием проверяют стабильность работы радиометрических каналов, при этом зонд находится в контейнере при постоянном положении гидромеханического патрона. По результатам проверки для каждого канала строят контрольный график, на котором по оси абсцисс откладывают время измерений (даты), а по оси ординат — результаты измерений. По полученным результатам вычисляется среднее квадратическое отклонение σ по формуле

$$\sigma = \pm \sqrt{\left[\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \right] / (N - 1)}, \quad (20)$$

где x_i — рядовое измерение (I_{γ} ; $I_{\gamma\gamma}$; I_n ; R ; T); \bar{x} — среднее арифметическое значение; N — число определений.

Считается, что аппаратура работает нормально, если разброс в показаниях не превышает $\pm 2\sigma$; в противном случае необходимо найти причину расхождения, устранить ее и заново провести градуировку. Следует отметить, что изложенная методика градуирования зондов ГГК и ННК на естественных средах наиболее предпочтительна, однако она требует отбора большего числа монолитов и увеличения объема лабораторных работ. Поэтому в ряде случаев, в частности при работе с ПСПК, применяются методики градуирования радиометрических каналов в насыпных грунтах.

Градуировка радиометрических каналов в насыпных грунтах. Этот способ более экономичен, так как не требуется специальной проходки горных выработок. Градуирование производят в цилиндрическом баке (диаметром 90 см и высотой 100 см), на внутренней стенке которого нанесена разметка. В качестве материала исполь-

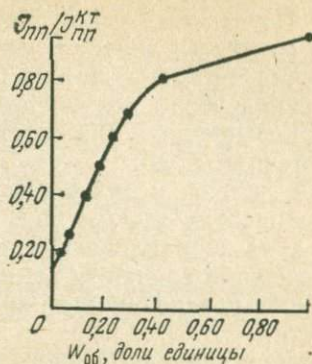
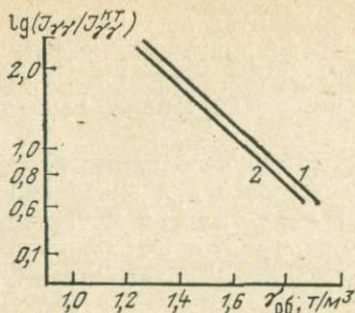


Рис. 41. Градуировочный график ГГК:
1 — при $W_{об} > 0,5$; 2 — при $W_{об} < 0,5$ (с учетом поправки на уплотнение)

Рис. 42. Градуировочный график ННК

зуют сухой песок ($W_{об} = 0,10$). Для получения заданной плотности песок послойно укладывают в бак и утрамбовывают. Оптимальная толщина укладываемого слоя 10—15 см.

После засыпки и уплотнения первого слоя в центре бака на песок устанавливают зонд. Этот слой песка необходим для того, чтобы исключить влияние поверхности земли на распределение излучений в градуировочном устройстве. Учитывая размеры и вес зонда, целесообразно закреплять его в баке в подвешенном состоянии. Для равномерного увлажнения песка перед засыпкой градуировочной емкости его надо тщательно перемешать. Для этого, как правило, используют вспомогательную емкость большего размера.

Рекомендуется следующий порядок проведения градуировочных работ. Сначала поочередно снимают три замера по ГГК и ННК в баке, последовательно заполняемом сухим песком — рыхлым, средней и максимальной плотности. Затем увеличивают влажность песка (добавлением по 15 л воды для каждой ступени) и по каждому из каналов снимают четыре-пять отсчетов. Таким образом, грунт доводят до состояния полного водонасыщения. Последний замер (по ННК) берется в баке с водой.

Для каждой ступени испытания необходимо определять объемную массу песка и естественную влажность. Для большей точности в определении влажности песка из бака отбирают не менее шести проб, распределенных попарно на трех горизонтах: первый горизонт расположен на уровне середины зонда ННК, второй — на 30—40 см выше и третий — на 10—15 см ниже первого.

Для оценки стабильности работы аппаратуры градуировки обязательно должны сопровождаться измерениями в контрольно-моделирующем устройстве. Полученные данные наносят на соответствующие графики. На рис. 41 приведен градуировочный график ГГК. По вертикальной оси отложены нормированные к величине контрольного измерения величины отклонения пера самописца (в

логарифмическом масштабе), а по горизонтальной — объемной массы грунта (в линейном масштабе). Затем по точкам вычисляют уравнение прямой. Полученный градуировочный график может быть использован только для определения объемной массы грунтов с повышенной влажностью ($W_{об} > 0,50$): илов, глин текучей консистенции и др.

Для грунтов с влажностью $W_{об} < 0,50$ необходимо вводить поправку на зону уплотнения, образующуюся при внедрении зонда. На рис. 41 исправленный график показан линией 2. Для построения масштаба записи объемной массы грунтов с графика снимают показания интенсивности, кратные десятым долям принятой размерности.

Пример градуировочного графика ННК приведен на рис. 42. На нем в линейном масштабе по оси ординат отложены нормированные к величине контрольного замера значения отклонения пера самописца, а по оси абсцисс — объемной влажности. Объемную влажность рассчитывают по формуле

$$W_{об} = \gamma_{ск} W, \quad (21)$$

где $\gamma_{ск} = \gamma_{об} / (1 + W)$ — объемная масса скелета песка; W — естественная влажность песка.

В заключение следует отметить, что градуировка на насыпных песках не лишена некоторых недостатков. Основные из них следующие: неравномерность распределения плотности и влажности песка по высоте бака, погрешности при взвешивании, необходимость введения поправки на уплотнение. Проведение градуировки на глинистых грунтах очень сложно. Эти недостатки обычно приводят к появлению систематической погрешности в значениях $W_{об}$ и $\gamma_{об}$, поэтому применение методики градуировки на искусственных средах ограничено (при работе на ПСПК с последующим контролем в естественных условиях).

Градуировка канала ГК проводится для определения чувствительности регистрирующей аппаратуры к величине интенсивности естественного гамма-излучения. Ее проводят по общепринятой в промысловой геофизике методике: на ровной площадке размером не менее 10×10 м подвешивают зонд таким образом, чтобы детектор ГК находился на высоте не менее 2 м от поверхности земли. От зонда перпендикулярно к оси его протягивают шнур, на котором с помощью стальной мерной ленты намечают точки размещения эталонного гамма-источника (типа $^{41}\text{С}$). Для расчета применяют формулу

$$I_{\gamma} = 840Q/R^2, \quad (22)$$

где I_{γ} — интенсивность излучения;
 Q — радиоактивность эталона;
 R — расстояние.

Измеряя естественный фон (до начала градуировки и в конце ее) и показания от эталонного источника, последовательно помещаемого в намеченные точки, получают данные, по которым строят

график зависимости величины отклонения пера самописца от интенсивности регистрируемого гамма-излучения.

СПЕЦИФИКА ТЕХНОЛОГИИ ВЫПОЛНЕНИЯ ПЕНЕТРАЦИОННОГО КАРОТАЖА. При выборе места установки станции следует учитывать наличие подземных и воздушных коммуникаций и требования техники безопасности работ. При установке станции в пункте зондирования должна быть обеспечена строгая вертикальность колонны штанг. Все операции должны выполняться строго в соответствии с инструкциями по эксплуатации станции и аппаратуры.

Операция по закреплению станции на поверхности грунта очень ответственна, так как от правильности ее проведения зависит глубина погружения зонда.

Отличительной особенностью анкерного устройства станций СПК-Т, СПК и ряда других является то, что величина подачи сваи по отношению к шагу лопасти может произвольно меняться в процессе завинчивания сваи в зависимости от плотности породы. Начальная вертикальная нагрузка на сваи создается в основном за счет веса портала; после того как сваи завинчены на определенную глубину, они углубляются в грунт при минимальном вертикальном давлении.

Станция оснащена тремя парами сменных анкерных винтовых наконечников, отличающихся величиной диаметра лопастей. Диаметр анкерных наконечников выбирают в зависимости от вида грунта. Практика показывает, что в песчаных грунтах целесообразно использование малых наконечников, а в суглинистых и глинистых (в зависимости от консистенции) — наконечников среднего или большого диаметра. В слабых илистых или торфянистых грунтах применяются только большие наконечники.

Зимой, когда грунт промерз, перед закреплением специальным буровым наконечником разбуривают устье скважин для нормального входа зонда. После установки станции над подготовленным устьем разбуриваются входы в грунт для винтовых наконечников на глубину промерзания. После установки винтовых наконечников станцию закрепляют обычным способом.

Технология подводного пенетрационного каротажа. Пенетрационно-каротажные исследования с помощью станции ПСПК, размещенной на судне «Геолог-1», как правило, проводились на море при ветре до четырех баллов и волнении до трех баллов. Неблагоприятные метеорологические условия практически не влияют на качество получаемой информации и работу подводного агрегата, но в этом случае увеличивается вероятность возникновения аварийной ситуации при проведении спуско-подъемных операций.

Район исследований, число точек пенетрационного каротажа (ТПК) и их расположение в плане должны быть заранее установлены и обозначены буйками.

Пенетрационно-каротажные исследования с помощью судов типа «Геолог-1» могут выполняться в любое время суток при обеспечении надежной привязки ТПК на плане. Затраты времени Т

на проведение пенетрационно-каротажных исследований и последовательность выполнения отдельных операций определяются следующим соотношением:

$$T = T_1 + kT_2 + \Sigma T_3 + \Sigma T_4 + \Sigma T_5 + kT_6 + T_7, \quad (23)$$

где T_1 — время, затрачиваемое судном на переход от места стоянки до района исследований; T_2 — время закрепления судна на якорь в ТПК; T_3 — время спуска на дно погружаемого агрегата ПСПК; T_4 — время погружения зонда в грунт и извлечения из него; T_5 — время подъема погружаемого агрегата на борт судна; T_6 — время съемки судна с якорей; T_7 — время перехода судна к месту стоянки; k — число точек ПК.

Каждая составляющая T носит переменный характер и зависит от ряда объективных и субъективных факторов, заслуживающих специального рассмотрения совместно с описанием технологических приемов и выполняемых операций. Например, время перехода судна от места стоянки в район работ T_1 зависит от расстояния S и скорости хода судна.

Выбор способа удержания судна на ТПК до завершения всех работ полностью находится в компетенции капитана и зависит от силы ветра, волнения и течения. Закрепление плавсредства может осуществляться с помощью трех или четырех якорей. Если глубина воды не превышает 6 м, используют носовую и кормовую закордные сваи.

Время, затрачиваемое на закрепление судна якорями T_2 и на съемку с них T_6 , зависит от опыта судоводителя и слаженности работы команды шлюпки, занятой на развозке якорей. По мере накопления опыта затраты времени на выполнение каждой из указанных операций могут быть сокращены до 40 мин.

Во время перехода и постановки на якоря геофизик-оператор ПСПК-69 проверяет работоспособность станции. Проверка включает оценку готовности к работе измерительной системы ПК и погружаемого агрегата. Особое внимание уделяют проверке надежности работы синхронизатора привода лент регистраторов, стабильности электрических нулей тензометрических каналов и воспроизводимости диаграмм РК, для чего включают погружаемый агрегат и из походного положения производят погружение зонда на шесть-восемь ходов штока в воду и последующее его извлечение с остановкой в исходной позиции относительно защитного экрана.

Подготовительные операции перед спуском агрегата на дно во времени совпадают с завершающим этапом фиксации судна на ТПК. Выполняются следующие работы: подъем агрегата над палубой, удаление опорных пальцев из кронштейнов, спуск агрегата между корпусами катамарана до положения, когда можно закрыть створки «окна». Затраты времени на указанные операции составляют в общей сложности 8—9 мин.

Время спуска агрегата на дно складывается из времени, затра-

чиваемого на наращивание колонны бурильных труб и установку агрегата на дно:

$$T_3 = (h_B/V_{\text{погр}}) + nt_m + t_K \quad (24)$$

где h_B — глубина воды в ТПК; $V_{\text{погр}}$ — скорость погружения; n — число наращиваемых при погружении бурильных труб; t_m — время наращивания бурильной трубы; t_K — время, затрачиваемое на контроль положения.

Из практики работ среднее время на наращивание одной бурильной трубы равно 1,6 мин, а время погружения агрегата на глубину, равную длине трубы, 1,4 мин.

По окончании спуска агрегата на дно производится контроль его положения и подготовка к началу пенетрационного каротажа. Затраты времени T_K составляют от 6 до 8 мин. При этом выполняются следующие операции: контроль по сигнальным индикаторам отклонения оси агрегата от вертикали и при необходимости выравнивание его с помощью выдвижных опор-гидродомкратов; подъем патрона в крайнее верхнее положение в ручном режиме; коррекция положения механических и электрических (в тензометрических каналах) нулей.

Время вдавливания зонда T_4 в донные отложения и подъема его в исходное положение зависит от мощности отложений $h_{\text{ГР}}$, подлежащих проходке, и скорости перемещения зонда:

$$T_4 = (2h_{\text{ГР}}/V_{\text{ср.з}}) + n_1 t_m \quad (25)$$

где $V_{\text{ср.з}} = V_{\text{ш}}/2$ — средняя скорость движения зонда в грунтах; n_1 — общее число операций по монтажу и демонтажу бурильных труб за рабочий цикл; t_m — время, необходимое на монтаж (демонтаж) одной бурильной трубы; $V_{\text{ш}} = 1,86$ м/мин — скорость перемещения зажимного патрона.

Из практики совместного применения пенетрационного каротажа и бурения приведем пример для сопоставления затрат времени. Время проходки T_4 в ТПК с $h_{\text{ГР}} = 26,2$ м и $h_B = 19,6$ м составило 76 мин. Бурение с отбором образцов в тех же условиях заняло 12 ч.

Обобщая сказанное, отметим: из 30 показателей состава, состояния и свойств пород лишь 7 могут быть установлены по стандартизированной методике; при этом для определения каждого из показателей прочности и сжимаемости имеется несколько стандартных методик; большинство остальных показателей определяется по эмпирическим зависимостям.

Чувствительность методов (штампов, прессиометрии, дилатометрии) по отношению к отдельным показателям различна. Наиболее перспективен в этом плане пенетрационный каротаж: он стандартизован, позволяет получать непрерывную по глубине исследования массива информацию. Дополнение его методами электрометрии и сейсмоакустики даст возможность определять показатели, используемые не только в инженерной геологии, но и в оценке наличия в массиве полезных ископаемых.

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ И ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ИНФОРМАТИВНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ПОЛЕВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На достоверность интерпретации результатов полевых исследований оказывают влияние многие факторы: расчетные схемы, граничные условия, точность оценки элементов схем, состав, состояние и свойства пород в естественном состоянии или лабораторных условиях и др.

Как правило, при лабораторных испытаниях удается свести до минимума неопределенность условий оценки тех или иных показателей. Так, например, при определении объемной массы достаточно точно взвесить образец и измерить его объем, в то время как определение этого показателя методом ГГК требует специальной градуировки, а при оценке этого показателя методом динамического или статического зондирования требуется знание вида породы, ее влажности и генетических особенностей. Поэтому взаимосвязь в системе «показатель — метод определения» носит множественный характер по отношению к используемым методам определения.

В связи с тем, что полевые методы изучения состава, состояния и свойств пород в большинстве случаев выполняются в шурфах и скважинах, вопросы качества проходки инженерно-геологических скважин приобретают особое значение. Одним из важнейших вопросов в данном случае является влияние способов проходки инженерно-геологических скважин на результаты последующих опытных полевых исследований грунтов. Большое число типов буровых станков, бурового оборудования, а также вариантов технологии проходки инженерно-геологических скважин не позволяют точно оценить степень изменения состава, состояния и свойств пород, вносимого процессом бурения, особенно ниже уровня грунтовых вод.

Требования к способам бурения инженерно-геологических скважин, приведенные в СНиП II-9—78, являются довольно общими и не гарантируют стандартной подготовки забоя скважины к опробованию. Кроме того, как будет видно ниже, многие факторы технологии бурения, влияющие на состояние пород различного состава, генезиса и состояния, изучены недостаточно. Применение колонкового бурения с промывкой глинистым раствором приводит к образованию вокруг скважины ряда зон (глинистый раствор, глинистая корка, промытая часть породы, зона проникновения фильтрата в породу и т. д.), неблагоприятно влияющих на последующее опробование пород. Ударно-канатный способ бурения, используемый для проходки песчаных и глинистых необводненных и слабообводненных пород, в определенной степени влияет на плот-

ность и структурные связи в породах так же, как и вибрационный способ бурения.

В настоящее время на большинство методов испытания пород в скважинах имеются или разрабатываются стандарты и в то же время отсутствуют стандарты на бурение скважин и особенно на подготовку интервала скважин к испытаниям полевыми методами.

В работе А. В. Васильева [4] детально рассмотрены факторы, влияющие на нарушения, возникающие при отборе образцов пород в процессе проходки горных выработок.

К качеству образцов пород и получению информации о них при бурении в морских условиях предъявляются еще более жесткие требования, так как результаты этого бурения не могут быть проверены путем проходки шурфов, котлованов или других исследований.

Ниже описаны процессы, происходящие при внедрении в породу наконечников зондов. Приведенные примеры дают представление о том, как влияет процесс отбора проб на текстуру отбираемой из скважины и остающейся в стенках породы.

Кроме того, необходимо учитывать, что на качество инженерно-геологической информации, получаемой в результате бурения как на суше, так и в морских условиях, в значительной степени влияют точность выделения границ, а также правильность определения номенклатурного вида грунтов и их физических характеристик.

В табл. 7 приведены данные, характеризующие количественные показатели точности определения границ видов и разновидностей пород при различных способах бурения (контроль по шурфам) [1].

Как известно, при исследовании массива наибольший интерес обычно представляют слабые породы, определяющие предрасполо-

Таблица 7

Точность определения границ пород

Способ бурения	Состояние извлекаемого грунта	Погрешность определения границ ($x \pm \sigma$), м	Показатель неполноты отражения разреза K_{Π} , %	Точность способа бурения
Вибрационный	Монолит	0,25	10	Высокая
Ударно-канатный:				
забивной	»	0,25—0,50	10—20	Средняя
«клюющий»	»	0,25—0,50	10—20	»
Колонковый всухую	»	0,25—0,50	10—20	»
Вращательный медленный	Грунт с нарушенной структурой	0,50—0,75	20—30	Низкая
Шнековый:				
рейсовый	То же	0,50—0,75	20—30	»
поточный	»	>0,75	>30	Весьма низкая

женность массива к деформациям (сдвигам отдельных частей его, оползням, провалам и другим нежелательным явлениям).

К сожалению, именно такие прослои пород чаще всего пропускаются при исследовании массива бурением и отбором проб, так как из-за их малой прочности они часто продавливаются и не попадают в пробоотборник. Выход керна в слабых породах может быть и меньше, и больше 100 %, поэтому очень важен опыт геолога, контролирующего бурение. Кроме того, в морских условиях при желонировании мелкая фракция породы может вымываться и, таким образом, отбирается преимущественно крупная фракция, испытание которой в лаборатории дает завышенные прочностные показатели исследуемой породы.

Применение электрометрии в пенетрационно-каротажном комплексе

Как известно, электроразведка широко применяется для решения задач геологического картирования и структурной геологии, поисков и разведки полезных ископаемых, гидрогеологических, инженерно-геологических и др.

Возможность практического использования электрометрии для проведения гидрогеологических и инженерно-геологических изысканий обусловлена тем, что различные горные породы (в том числе и грунты) отличаются друг от друга удельным электрическим сопротивлением ρ_k и удельной поляризацией η_k . В зависимости от типа грунтов значения удельного электрического сопротивления изменяются от долей до сотен и даже тысяч ом на метр, а удельной поляризации — от долей до четырех процентов.

Для работы методами электрометрии на пенетрационно-каротажной установке СПК-Т применен кольцевой трубный зонд диаметром 80 мм. Многожильный кабель, обеспечивающий питание электродов зонда электрическим током, а также измерение разностей потенциалов, силы тока и напряжения вызванной поляризации, пропущен через штангу.

При выполнении электрокаротажа методами КС и ВП разности A 0,1 М 0,1 N 0,1 В соответствовали глубинности исследования околоскважинного пространства радиометрическими методами. В отдельных случаях применялся микрозонд A 0,005 М 0,05 N 0,05 В. В качестве регистрирующей аппаратуры использовались приборы: «Эрцпроспектор» (для измерения ВП) и ЭСК (для измерения КС). Измерения значений кажущейся поляризации η_k проводились на двух временах спада поля ВП — 50 и 100 мс. Длительность разнополярных импульсов пропуска электрического тока через грунт составляла 0,2 с. Измерение КС проводилось общепринятым способом. Расстояния между точками опробования по глубине составляли 25 см.

Электрометрические работы выполнялись в комплексе с пенетрационным каротажом методами кажущегося удельного сопро-

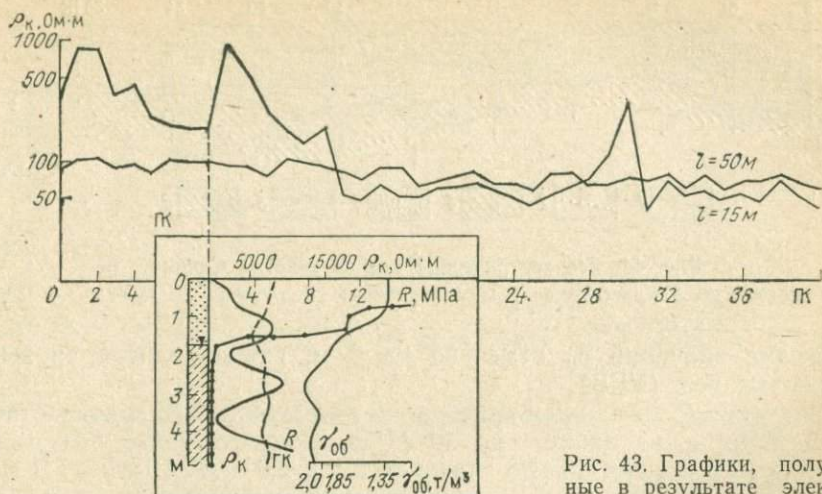


Рис. 43. Графики, полученные в результате электрического профилирования участка Юрмала

тивления (КС), дипольного электропрофилирования на переменном токе (ВЧЭП) и электрокаротажа (НЧ). Кроме того, для профилирования была использована аппаратура для высокочастотного электропрофилирования. В связи с тем, что подобные исследования проведены впервые, они описаны более детально и подробно.

На участке г. Юрмала дипольное профилирование (рис. 43) аппаратурной ВЧЭП проводилось двумя разносами ($l=15$ м, $l=50$ м). Размер установки был выбран с расчетом исследования двух горизонтов. При сравнении полученных графиков величины ρ_k резко изменяются с глубиной на пикетах 0—15. На разносе диполя $l=50$ м кажущиеся удельные сопротивления составляют примерно 100 Ом·м. На том же участке профиля на диполе размером $l=15$ м удельные сопротивления возрастают до 900 Ом·м. Отсюда следует, что на этом отрезке профиля значения ρ_k резко падают с глубиной. Остальная часть профиля, исследуемого дипольным профилированием, на тех же разностях диполей имеет значения ρ_k около 100 Ом·м. Исключение составляет пикет ГК 30, где ρ_k на разносе $l=15$ м возрастает до 300 Ом·м. На ГК 8 получены пенетрационные и КС диаграммы на глубину 4,75 м (см. рис. 43). Результаты, полученные комплексом пенетрационных методов, указывают на резко выраженную дифференциацию грунтов. Уровень грунтовых вод близок к границе раздела песка и супеси, расположенной на глубине 1,8 м. Песок мелкозернистый, супесь неоднородна по составу. Особенно отчетливо выделяется неоднородность супеси по графикам R и $\gamma_{об}$.

По результатам КС, от устья, где $\rho_k=61\ 000$ Ом·м, до глубины 2 м с удельным электрическим сопротивлением 1000 Ом·м объемная масса, по данным ГК, уменьшается до 1,35 т/м³. Резкое

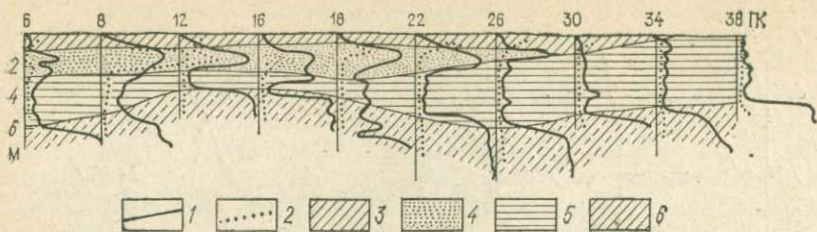


Рис. 44. Геоэлектрический разрез участка Санино.

1 — диаграмма R ; 2 — диаграмма ρ_k ; 3 — суглинок; 4 — песок; 5 — глина; 6 — супесь

снижение значений ρ_k отмечено на 2 м, где находится уровень грунтовых вод (УГВ).

Значение R по данным пенетрации на глубине 2,75 м возрастает до 5 МПа, а на забое — до 10 МПа. Соответственно объемная масса имеет максимальные значения 2,1 и 2,0 т/м³. Ниже УГВ методом КС не выделяется разновидностей суглинков. В интервале глубин от 1,8 м до забоя величины ρ_k составляют 150—180 Ом·м.

На участке пос. Санино геоэлектрический разрез протяженностью 400 м построен по данным пенетрационного (1) и электрического каротажа (2) КС (рис. 44). Сверху до глубины 0,5—1 м разрез представлен суглинками (3), удельные сопротивления которых составляют 50—250 Ом·м. Глубже залегают пески (4), имеющие высокие значения ρ_k (1000—15 000 Ом·м), R (7—15 МПа) и низкие значения естественной радиоактивности. Ниже расположены глины и суглинки (5). Наибольшая мощность глин 4,27 м. Величина ρ_k в глинах уменьшается до единиц ом на метр, R составляет 0,5—3 МПа, а естественная гамма-активность повышается. Под глинами до забоя по всему разрезу выделяется слой супесей (6) с незначительным повышением ρ_k (250—500 Ом·м) и максимальными значениями R примерно 14 МПа и выше. Объемная масса, по данным ГК, в супесях выражается постоянной величиной 1,92 т/м³.

На участке проведены работы методом дипольного профилирования на переменном токе (ВЧЭП) на разносах $l=15$ м ($AB=$
 $=MN=5$ м) и $l=50$ м ($AB=MN=5$ м), шаг установки равен 10 м (рис. 45). На диполе $l=15$ м в левой части графика получена резко дифференцированная кривая $S_{\text{эфф}}$ с максимальными значениями до 120 Ом·м и минимальными — до 30 Ом·м. В правой части графика (ГК 19—40) график характеризуется однородностью кривой электропрофилирования и малыми значениями ρ_k (около 10 Ом·м). На разносе $l=50$ м величины ρ_k однородны по всему профилю ($\rho_k \sim 80$ Ом·м).

Результаты дипольного профилирования (ВЧЭП) хорошо согласуются с пенетрационным и электрометрическим каротажем (КС). По всему профилю на глубине 6—8 м в нижней части разреза залегают супесчаные породы, ρ_k которых близко к 80 Ом·м.

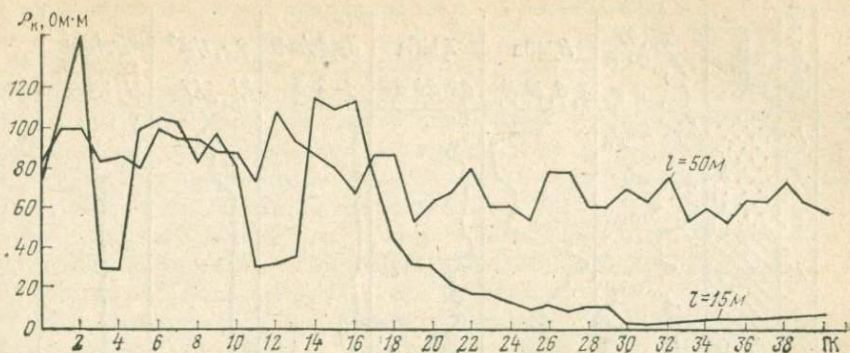


Рис. 45. График изменения ρ_k по профилю участка Санино

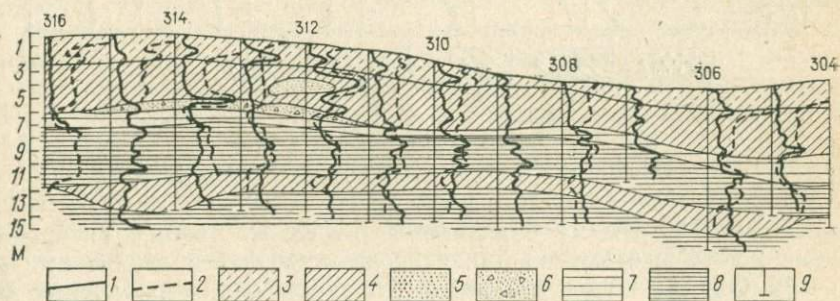


Рис. 46. Геозлектрический разрез.

1 — диаграмма R ; 2 — диаграмма ρ_k ; 3 — супесь; 4 — суглинок; 5 — песок; 6 — песок с гравием и щебнем; 7 — глина; 8 — глина тяжелая; 9 — скважины

На опытном участке в Серпуховском районе геозлектрический разрез построен по 13 скважинам, из которых 10 электрометрические (рис. 46). Глубина исследования пород достигала 15 м. В геозлектрическом разрезе четко выделяются разновидности грунтов, установленные электрическим, радиометрическим и пенетрационным методами. В верхней части разреза залегает супесь. Электрические сопротивления ρ_k верхней части супесей (200—600 Ом·м) намного больше, чем в нижней (20—50 Ом·м). Удельное сопротивление зондированию R в верхней части 1—2 МПа, а в нижней 4—6 МПа. В прослое суглинков величина ρ_k понижается до 20 Ом·м, R_z — до 1 МПа. Ниже залегают суглинки мощностью около 4 м, которые по всему разрезу выделяются одинаковыми значениями удельного электрического сопротивления 20 Ом·м, малыми значениями удельных сопротивлений ($R=2$ МПа, $T=0,02$ МПа) и глинистостью до 15%. Под ними залегает песок с включениями щебня ($R=8-12$ МПа, и $T=0,22$ МПа). В песке

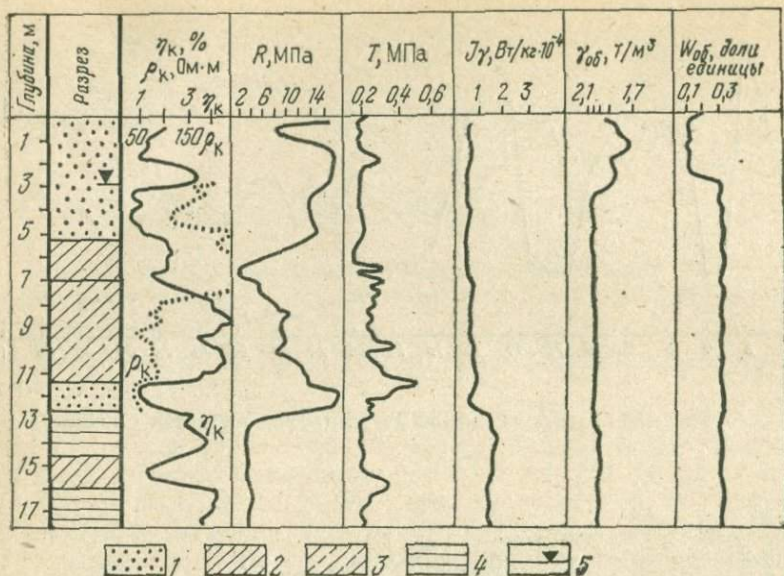


Рис. 47. Геологическая колонка скважины.

1 — песок; 2 — суглинки; 3 — супеси; 4 — глины; 5 — уровень грунтовых вод

заметно (до 60 Ом·м) повышается ρ_k . Кроме того, в интервале глубин 2,5—4 м отмечена линза песка с высокими значениями ρ_k (60—82 Ом·м). Ниже суглинков до забоя лежат различные по своим свойствам глины, вмещающие слои суглинков с малыми значениями ρ_k (5 Ом·м). В верхнем слое глины $\rho_k=6$ Ом·м, а сопротивление R снижается до 2 МПа. В тяжелых глинах ρ_k и R повышаются по сравнению с вышележащими глинами в четыре-пять раз. В глинах заметно повышается величина естественной гамма-активности. На этом геофизическом разрезе, построенном по данным комплекса методов пенетрационного и электрического каротажа, наглядно показана возможность совмещения тензометрии, радиометрии и электрометрии (метод КС), а также резкого повышения уровня информативности благодаря наложению геоэлектрических и пенетрационно-каротажных кривых.

По данным КС, ВП и пенетрационного каротажа построена геологическая колонка скважины (рис. 47). Сверху до глубины 5,3 м по сопротивлению R выделяются пески. До уровня грунтовых вод (УГВ) пески характеризуются высокими значениями ρ_k (1600—2000) и R (до 17 МПа). Объемная масса $\gamma_{об}$ в этом интервале песков в верхней части составляет 1,72—1,8 т/м³. Боковое трение T для песков колеблется в пределах 0,18—0,25 МПа с небольшими увеличениями на глубине 2 м до 0,31 МПа.

Ниже УГВ ρ_k сначала резко уменьшается до 1000 Ом·м. Полярность песков на уровне грунтовых вод возрастает до 3,3 %.

Увеличение значений η_k совпадает с повышением T и указывает на разнородность песков в разрезе. Под песками залегает слой суглинков, в котором R падает до 1 МПа, а T — до 0,1 МПа. Объемная масса возрастает до 2,1 т/м³. η_k и ρ_k увеличиваются по сравнению с нижним слоем песка в три раза. Увеличение электрического сопротивления в суглинках по сравнению с песками в одинаковых водонасыщенных условиях выглядит довольно странно. На глубине 7—11,5 м в тяжелых супесях η_k повышается до 5 %, ρ_k падает до 500 Ом·м, а R в верхней части имеет величину 8,7 МПа, в нижней — 12,8 МПа. Изрезанность диаграмм R , T , ρ_k , η_k указывает на неоднородность супесей.

Под супесями на метровом интервале глубины резко падает величина η_k (до 0,7 %), возрастают R (до 18 МПа) и T (до 0,5 МПа), в два раза понижается I_V . Все это свидетельствует о том, что в этом интервале залегает песок.

С глубины 13 м до забоя залегают пластичные глины, внутри которых по данным ВП выделяется прослой тяжелого суглинка, характеризующегося понижением η_k почти в 4 раза по сравнению с глинами. Дополнение комплекса показателей пенетрационного каротажа, используемого для построения геологических колонок электрометрическими методами, свидетельствует о необходимости введения в комплекс методов, позволяющих получать показатели сопротивления и поляризуемости пород.

Распределение полей поляризуемости на исследуемом участке по времени спада $\Delta U_{ВП} = 50$ мс ниже УГВ составляет (в %): песок 0,5—0,7, суглинок тяжелый 2, глина 2,5—3,5, супесь тяжелая 3,7—4, супесь легкая 5—6. Привязка значений η_k к геологическому разрезу проводилась на основании изучения проб грунта, отобранных из каждого слоя. Сопоставление количественных данных различных показателей, использованных в данном случае, довольно часто дает очень богатый фактический материал, который не во всех случаях можно однозначно интерпретировать даже с применением имеющихся геологических данных. Поэтому приходится привлекать для анализа самую различную информацию. Так, содержание химических элементов (установленное по данным спектрального анализа), вероятно, избирательно воздействует на поляризуемость грунтов. Результаты спектрального анализа получены для 12 проб, отобранных ниже УГВ. Пробы отбирали после проведения каротажа и построения геологического разреза (одну — три пробы из каждого слоя). Было выявлено, что содержание Fe (более 1 %) равномерно распределяется по всему разрезу. Песок и суглинок с низкой поляризуемостью (0,7—1 %) содержат малые дозы некоторых элементов: Al, Mg, Zn, Na, Ti от 0,1 до 1,0 %; Mn от 0,001 до 0,01 %. Содержание этих элементов значительно повышается в пластичных глинах, поляризуемость которых возрастает до 2,7 %: Al, Mg, Ti более 1,0 %; Mn от 0,1 до 1,0 %; Ba от 0,01 до 0,1 %; Co, Zn, Cu от 0,001 до 0,01 %. Супесь легкая ($\eta_k = 3,7$ %) и тяжелая ($\eta_k = 5$ —6 %) имеют одинаковое содержание перечисленных

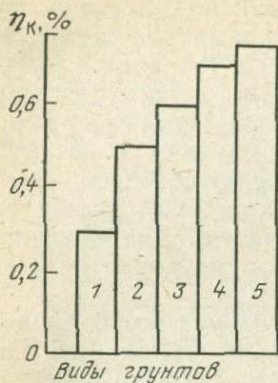


Рис. 48. Распределение поляризуемости в отношениях времен спада.

1 — песок; 2 — суглинок;
3 — супесь легкая; 4 — глина тяжелая; 5 — супесь тяжелая

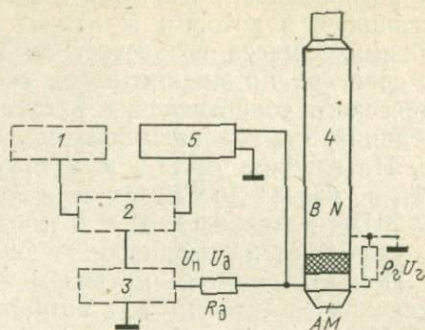


Рис. 49. Электрическая схема зонда МАК-5П

элементов. Только содержание Ti уменьшается до 0,1—1,0%. Кроме того, в супесях обнаружен Ca (более 1%).

Проведенный анализ временных характеристик спада поля ВП указывает на неоднозначность его интенсивности для различных грунтов. В песках наблюдаются резкие спады величин $\Delta U_{ВП}$, а в супесях — пологие. По данным отношений времен спада $\Delta U_{ВП}$ 100 мс/50 мс различных пород построена гистограмма (рис. 48).

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЗОНДА МАК-5П ПО МЕТОДУ ТОКОВОГО КАРОТАЖА. В ряде работ, направленных на совершенствование техники пенетрационного каротажа и дополнение его другими геофизическими методами, была изучена возможность использования аппаратуры МАК-5П и МАК-80 для непрерывного измерения электрического сопротивления грунта в процессе зондирования.

Во время работы с выходного каскада передатчика на кончик зонда подается импульсное напряжение в виде пачек импульсов. Частота пачек 72 Гц, частота импульсов в пачках 2400 Гц. Импульсный ток проходит через грунт, опоясывающий разделитель-изолятор, и замыкается на массу. Была поставлена задача: в процессе вдавливания зонда измерить электрическое сопротивление грунта, опоясывающего зонд в области разделительного изолятора, используя для этого выходное импульсное напряжение, несущее информацию.

На рис. 49 представлена часть структурной электрической схемы зонда МАК-5П, дополненной элементами, обеспечивающими возможность непрерывного измерения электрического сопротивления грунта в процессе вдавливания зонда. Элементы, относящиеся к схеме МАК-5П, нанесены пунктиром, а дополнительные эле-

менты — сплошной линией. К первым относятся: блок радиометрии 1 (например, ГК), вырабатывающий управляющее напряжение для преобразования уровня (ГК) в соответствующую частоту, блок управления 2, управляющий работой передатчика 3, и зонд 4. Дополнительно установлены схема измерения сопротивления грунта 5 и дополнительный нагрузочный резистор R_d .

Электрический импульсный ток, несущий информацию, получаемую в процессе зондирования, с выхода передатчика через резистор подается на наконечник зонда, который является питающим электродом A . В качестве электрода B используется корпус зонда. Электрод A изолирован от корпуса зонда кольцевым изолятором. С поверхности наконечника зонда ток через грунт ρ_r поступает на электрод B , т. е. на массу зонда. Электрическая цепь замыкается. Стабилизированное выходное напряжение U_{Π} передатчика распределяется на делителе, составленном из дополнительного резистора R_d и сопротивления грунта ρ_r , т. е. $U_{\Pi} = U_d + \rho_r$ и $\rho_r/U_r = R_d/U_d$. Отсюда сопротивление грунта $\rho_r = U_r R_d / U_d$. Поскольку $U_d = U_{\Pi} - U_r$,

$$\rho_r = \frac{R_d}{U_{\Pi}/(U_r - 1)}.$$

В этом выражении R_d и U_{Π} — постоянные величины, следовательно, сопротивление грунта ρ_r можно оценить, измерив только напряжение U_r между корпусом и наконечником зонда. Таким образом, наконечник и корпус являются также и измерительными электродами M и N .

Напряжение U_r поступает на вход измерительной схемы 5, преобразуется и поступает через схему управления 2 в один из свободных телеметрических каналов передачи информации (например, ГК). Полученная таким образом непрерывная диаграмма, после нанесения на нее шкалы сопротивления ρ_r , дает возможность проследить измерение сопротивления грунта ρ_r , окружающего при вдавливании зонда кольцевой изолятор.

Шкала сопротивления ρ_r строится по градуировочной зависимости, получаемой с помощью магазина сопротивлений, который подключается к корпусу и передающему электроду зонда. На ленте самописца отмечаются точки (с протяжкой ленты), соответствующие определенным значениям сопротивлений, устанавливаемых магазином сопротивлений $R=33$. Градуировочная зависимость нелинейна. Чувствительность канала уменьшается с повышением сопротивления грунта, поэтому шкала электрических сопротивлений градуировочного графика строится в логарифмическом масштабе.

Запись диаграммы электрического сопротивления грунта производилась при вдавливании зонда. Схема зонда дополнена блоком дистанционного управления каналами, который позволяет подключать любой из телеметрических каналов для передачи информации от какого-либо измерительного преобразователя. Таким образом,

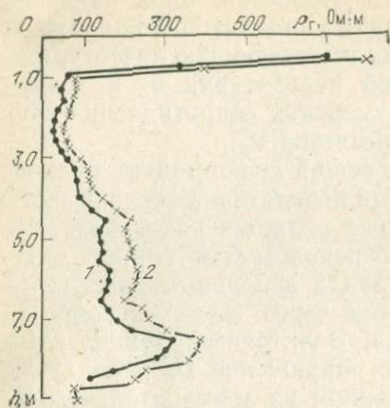


Рис. 50. Диаграмма электрокаротажа пойменных отложений р. Шерны:

1 — диаграмма КС (А0,1М0,1N0,1В); 2 — диаграмма ρ_r (одноэлектродный метод)

МО,1 N0,1 В), приспособленный для вдавливания в грунт, а другой — МАК-5П, дополненный схемой измерения R_r , опытный.

Зондирование с записью диаграмм ρ_k и ρ производилось на пойменных отложениях р. Шерны. Регистрация значений ρ_k с помощью первого зонда производилась на остановках через каждые 0,25 м; при измерениях ρ_k использовалась аппаратура ЭСК-1.

Изучение грунта вторым зондом проводилось рядом на расстоянии не более двух метров. При этом была получена непрерывная запись изменения ρ (рис. 50). Для удобства сопоставления полученных результатов с непрерывной диаграммы ρ снимали точечные значения, соответствующие глубинам, на которых выполнялись измерения ρ_k . Эти значения наносили на общий график, на котором по вертикали нанесены отметки глубины зондирования, а по горизонтали — величины КС и ρ_r в омах на метр (см. рис. 50).

Анализ полученных диаграмм показывает, что характер их изменения по вертикали совпадает. Это свидетельствует о том, что результаты второго метода измерений тесно связаны с изменением электрического сопротивления грунта.

Однако наличие некоторых расхождений, в частности, отсутствие пропорциональности между значениями ρ_k и ρ , объясняется, по-видимому, влиянием неучитываемых переходных сопротивлений на контакте электрод — порода. Таким образом, эта неоднозначность не позволяет производить точной интерпретации диаграмм ρ . Однако благодаря их соответствию диаграммам ρ_k они могут быть использованы для качественной оценки электрических свойств пород в комплексной интерпретации результатов пенетрационного каротажа. Можно предположить, что разница между ρ_k и ρ зави-

во время вдавливания зонда записывается диаграмма электрического сопротивления грунта ρ_r , а при извлечении — ГК.

Глубинность метода ГК значительно превышает глубинность метода ρ_r , поэтому вторичное нарушение естественной структуры грунта при извлечении зонда вносит меньшие искажения в диаграмму ГК, чем в диаграмму ρ_r , в случае записи ее при извлечении зонда.

Для проверки данного метода измерения электрического сопротивления грунта параллельно были проведены измерения электрического сопротивления грунта двумя различными зондами: один — с известным расположением кольцевых электродов (А0,1

сит от свойств порового раствора и породы и может быть использована для получения дополнительной информации.

Изложенный анализ исследования полей ρ_k и η_k в комплексе с пенетрационным каротажем показывает, что выбранные методы электротометрии соответствуют своему назначению при изучении и расчленении пород разреза. Кроме того, результаты электрокаротажа могут быть использованы в качестве параметрических данных для привязки наземных электроразведочных работ.

НАЗНАЧЕНИЕ И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ АППАРАТУРЫ ЭПК-80. Выполненные работы послужили основой для разработки и создания аппаратуры ЭПК-80 (электротометрической пенетрационно-каротажной в бескабельном варианте) применительно к использованию на станции СПК-Т. Комплекс аппаратуры ЭПК-80 предназначен для измерения удельного электрического сопротивления пород (КС) в процессе вдавливания зонда для расчленения разреза по величине электрического сопротивления.

Аппаратура ЭПК-80 обеспечивает в процессе пенетрации регистрацию на самописцах Н-361 удельного сопротивления пород в диапазоне от 0,2 до 10 000 Ом·м с погрешностью не более $\pm 5\%$. Диапазон измеряемых сопротивлений разбит на пять поддиапазонов (в Ом·м): I — от 0 до 1; II — от 0 до 10; III — от 0 до 100; IV — от 0 до 1000; V — от 0 до 10 000. Передача и прием сигналов с глубинного зонда осуществляются по беспроводному электрическому каналу связи.

В процессе вдавливания глубинного зонда генератор зондирующего тока, работающий в непрерывном режиме на частоте 400 Гц, излучает через электроды АВ во вмещающие породы стабильный по величине ток. В блоке измерения КС происходит преобразование наведенного на электродах MN сигнала в постоянное напряжение, пропорциональное удельному сопротивлению пород. Постоянное напряжение подается в блок кодирования, где оно преобразуется в сигнал амплитудно-импульсной модуляции (АИМ).

В блоке передатчика сигнал АИМ осуществляет модуляцию генератора несущей частоты передатчика, в результате чего формируется сигнал с амплитудно-импульсной и частотной модуляцией (АИМ-ЧМ). После необходимого усиления по мощности сигнал АИМ-ЧМ излучается в породу с помощью антенны, функцию которой выполняет глубинный зонд.

Сигнал АИМ-ЧМ, переданный к приемнику, принимается антенной, которая представляет собой металлический электрод, вбитый в землю на расстоянии 10—15 м от установки. Принятый сигнал обрабатывается приемно-регистрирующим устройством и записывается самописцами на магнитную пленку. В качестве приемно-регистрирующего устройства используется приемник из аппаратуры МАК-80.

Питание блоков зонда осуществляется от автономного блока питания, а приемно-регистрирующего устройства — от аккумулятора станции СПК-Т.

Устройство и работа глубинного зонда. Глубинный зонд пред-

ставляет собой прибор, предназначенный для измерения в процессе вдавливания удельного электрического сопротивления пород, преобразования его в электрические сигналы и передачи их на поверхность по электрическому беспроводному каналу связи. Зонд состоит из генератора зондирующего тока, блока измерения КС, блоков кодирования, передатчика, стабилизаторов и блока питания с выключателем, функциональные назначения которых заключаются в следующем.

Генератор зондирующего тока предназначен для поддержания постоянного тока в цепи электродов АВ при измерении сопротивления пород в процессе вдавливания глубинного зонда. Датчиком величины зондирующего тока является эталонный резистор, напряжение с которого подается на преобразователь.

В качестве управляющего элемента используется транзистор, включенный в цепь эмиттера выходного каскада и выполняющий функцию резистора, сопротивление которого меняется в зависимости от приложенного к нему напряжения. Генератор зондирующего тока обеспечивает постоянство тока в цепи электродов АВ.

Блок измерения используется для преобразования введенного на электродах МN сигнала генератора зондирующего тока в постоянное напряжение, пропорциональное удельному электрическому сопротивлению пород.

Кроме того, в этом блоке осуществляется разделение всего диапазона измеряемых величин КС. Блок измерения КС состоит из входного усилителя, делителей напряжения и одноступенчатых преобразователей. После детектирования формируется постоянное напряжение, которое через согласующий каскад подается на один из входов блока кодирования.

В процессе испытаний было выяснено, что на электроды МN, наряду с полезным сигналом, наводится сигнал от радиопередатчика, представляющий собой импульсную последовательность радиоимпульсов с частотой повторения 72 Гц, который вносил существенную погрешность в измерения КС на первых трех поддиапазонах. Поэтому в схему блока было внесено изменение, позволяющее проводить измерения КС в паузах между импульсами радиопередатчика, а на время действия импульсов вход избирательного усилителя запирается и тем самым снизить погрешность в результатах измерения до 2 %.

Блок кодирования предназначен для преобразования входного напряжения в сигналы АИМ и временного разделения каналов. Для осуществления такого разделения каналов в блоке кодирования применен электронный коммутатор, состоящий из пяти аналоговых ключей и ключа маркерного канала.

В момент поочередного запуска каждого ключа на выходе его формируется импульс амплитудой, равной мгновенному значению измеряемого параметра. Для синхронизации сигнала в глубинном зонде и приемном устройстве один из импульсов, который отличается от канальных по длительности, является маркерным.

Блок передатчика используется для осуществления час-

тотной модуляции сигнала, а также для усиления сигнала до необходимой мощности. Сигнал с выхода передатчика через антенну излучается в породу и передается на поверхность земли. Импульсы подаются на двухтактный выходной каскад усилителя мощности. Усиленные импульсы через передающую антенну поступают в породу.

Блок питания предназначен для автономного питания электронных схем глубинного зонда. Блок питания состоит из двух групп аккумуляторов типа КНГ-1,5 (по 8 аккумуляторов в каждой группе), соединенных последовательно. Группы между собой соединены параллельно, в результате чего обеспечивается непрерывная работа глубинного зонда в течение 8 ч. Общее выходное напряжение заряженного блока питания составляет 10 В.

Конструкцией зонда предусмотрено механическое отключение блока питания. Принцип работы выключателя рассмотрен ниже.

В глубинном зонде находятся два стабилизатора напряжения: один из них напряжением 6 В используется для питания блока измерения КС, а второй — напряжением 5 В — для питания остальных узлов схемы. Стабилизаторы выполнены по компенсационной схеме.

Конструкция глубинного зонда. По внешнему виду глубинный зонд представляет собой цилиндр с диаметром 80 или 65 мм. Нижним концом его является наконечник конической формы. Верхний конец зонда оканчивается ниппелем, с помощью которого осуществляется стыковка с буровой колонной.

Глубинный зонд содержит разделитель, блок электроники, блок питания. Разделитель состоит из: несущей стальной трубы, набора диэлектрических колец и электродных колец. Наружная поверхность несущей трубы обрабатывается до диаметра 63 мм. В качестве диэлектрических колец используются кольца из текстолита высотой 40 мм и диаметром 80 мм. На них и между ними устанавливаются контактные электроды из латуни с наружным диаметром 80 мм. Расстояние между электродами *AM*, *MN*, *NB* было принято равным 100 мм, расстояние между электродами *B* и наконечником *A* и штангой равно 250 мм.

Электрод, предназначенный для передачи сигнала АИМ-ЧМ находится в нижней части разделителя. Диэлектрические кольца склеиваются с трубой и между собой эпоксидной смолой. Электрическое соединение электродов с разъемом осуществлялось проводами. В нижнюю часть разделителя посредством резьбового соединения вворачивался наконечник. Для предотвращения попадания жидкости предусмотрены два уплотнительных кольца. В верхней части разделителя установлен переходник, к которому крепится разъем.

Блок электроники конструктивно представляет собой набор плат. Для электрического соединения блока электроники с разделителем и блоком питания предусмотрены соответственно пяти- и трехконтактные разъемы.

Блок питания состоит из трехконтактной розетки, соединенной

с вставкой с одной стороны и наконечником с другой. Вставка и наконечник скрепляются четырьмя планками.

Питание электрических схем зонда осуществляется от аккумуляторов, разделенных на две группы по несколько штук. Аккумуляторы лежат в изоляционных обоймах из полихлорвинила; электрически они соединены между собой перемычками.

Блок электроники и блок питания в рабочем состоянии располагаются в колонковой трубе диаметром 65 мм. С одной стороны трубы предусмотрена наружная резьба для соединения с разделителем посредством муфты, с другой — внутренняя резьба для соединения с ниппелем. При вворачивании ниппеля блоки питания и электроники фиксируются в трубе. Конструкцией зонда предусмотрено, при необходимости, механическое отключение блока питания.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРОБОВАНИЯ АППАРАТУРЫ ЭПК-80.

Испытания этой аппаратуры проводились на двух участках. За период испытаний было пройдено 32 скважины общей глубиной 423 м. По 25 скважинам записаны диаграммы удельного электрического сопротивления пород КС и ряда характеристик для контроля и оценки погрешности аппаратуры.

В процессе испытаний было отмечено, что значения КС пород на этих участках изменяются в пределах 40—2000 Ом·м, причем высокие значения КС пород (от 600—700 Ом·м и выше) характерны для пород, залегающих выше уровня грунтовых вод. Ниже уровня грунтовых вод до глубины 20 м КС пород изменяются, как правило, в пределах 40—400 Ом·м.

Калибровка аппаратуры ЭПК-80 проводилась по следующей блок-схеме. К электродам разделителя подключалась цепочка сопротивлений из резисторов R_1 , R_2 , R_3 , имитирующих сопротивление пород. Они выполняли функцию переходных сопротивлений электродов A и B , а R_2 эквивалентен удельному электрическому сопротивлению пород.

Полученная таким образом функция $A = \varphi(P)$ является калибровочной кривой третьего канала измерения аппаратуры ЭПК-80 (где A — деление шкалы диаграммной ленты).

Калибровка аппаратуры по четвертому и пятому каналам выполнялась аналогичным образом. В результате выполненных исследований было установлено, что принципы, заложенные и реализованные в макете ЭПК-80, позволяют выполнять электрокаротажные работы в процессе вдавливания зонда и передавать информацию на поверхность по бескабельному каналу. Чувствительность аппаратуры соответствует установленной для стандартной электроразведочной аппаратуры. Проверка стабильности работы зонда дала удовлетворительные результаты. В комплексе со стандартным зондом СПК-Т зонд ЭПК-80 дает ценную информацию, необходимую для решения гидрогеологических задач.

Процессы, происходящие в грунтах при вдавливании зондов

Структурно-текстурные особенности песчано-глинистых пород отражают условия их формирования, определяют механические свойства, а также являются основой для прогнозирования их изменения во времени. Кроме того, результаты исследования структурно-текстурных изменений, происходящих в породе под действием внешних сил, в частности при вдавливании в нее конуса, представляют собой основу для разработки расчетных схем, в которых отражается взаимосвязь напряжений с физико-механическими показателями исследуемых пород.

Для обоснованного подхода и выбора схемы интерпретации результатов статического зондирования необходимо иметь четкое представление о характере изменения текстуры породы при вдавливании в нее зонда. В связи с этим ниже приведены результаты некоторых исследований.

Г. К. Бондарик отмечал, что при внедрении зонда под острием образуется конус уплотненной породы, который при вдавливании наконечника режет нижележащий грунт. Вытесняемые при этом частицы образуют вокруг наконечника зонда уплотненную зону. До достижения конусом некоторой глубины частицы породы могут выпираться вверх, а ниже этой глубины движение частиц происходит в стороны от зонда. Направление перемещения частиц зависит от угла конуса: чем меньше угол, тем меньше наклон траекторий частиц к горизонту. Бесконечно тонкое острие с идеально гладкой поверхностью при вдавливании в породу отодвигало бы ее частицы только в сторону.

В экспериментах, проведенных в Германии (в 1938 г.), производилось вдавливание зонда диаметром 35,6 мм с углом заострения 60° в плотные ($D=0,6-0,7$) и слегка уплотненные ($D=0,3$) пески. Для опыта был использован лоток размером $1,0 \times 1,0 \times 1,0$ м со съемными стенками. Горизонтальными маркирующими слоями служил окрашенный песок. Для регистрации давления в песке в горизонтальной плоскости и на дне были установлены датчики. Было установлено, что вокруг зонда образуется зона песка с сильно пониженным значением пористости. При вдавливании зонда с поверхности происходит уплотнение песка, вызванное перемещением частиц вниз и в стороны от конуса, и выпор, направленный к поверхности. Ниже определенной глубины, названной критической, преобладают деформации уплотнения. Радиус зоны деформации равен двум диаметрам наконечника. Нижняя граница уплотненного песка имеет форму полусферы с центром, расположенным вблизи центра тяжести конуса. Угол раскрытия конуса, плотность и влажность песка, по мнению исследователей, не оказывают влияния на размеры зоны деформаций. За пределами зоны деформаций находится область напряженного состояния.

График испытаний плотных песков показывает, что датчик, расположенный на дне лотка, начинает фиксировать давление от

наконечника, когда расстояние между ними уменьшается до 50 см. Это свидетельствует о том, что перед зондом возникает напряженная зона, мощность которой около 0,5 м. Когда расстояние между наконечником и датчиком уменьшается до нескольких сантиметров, показания датчика вдвое превышают значение силы, приложенной к зонду, что можно объяснить тем, что датчик реагирует на уплотнение, возникающее при движении зонда в вышележащих слоях. Радиус области напряженного состояния в горизонтальном направлении равняется 17 диаметрам наконечника.

В рыхлых песках вертикальное давление, возникающее при вдавливании зонда, невелико; величина его, измеренная датчиком в момент, когда зонд находился в крайнем нижнем положении, равна силе давления на зонд.

Проведенные позже исследования процесса погружения модели сваи в песок, насыпанный в сосуд с прозрачными стенками, показали, что: 1) при внедрении сваи в грунт вокруг нее образуется зона нарушенного грунта, имеющая очень небольшую мощность; 2) конец сваи вызывает в прилегающем к нему грунте перемещение частиц на небольшую глубину, при этом частицы поворачиваются вокруг оси и перемещаются по кривым выпирания, направленным вблизи сваи вниз, а на некотором удалении от нее — вверх; 3) эффект, вызываемый концом сваи, сначала распространяется до поверхности земли, а затем прекращается после опускания конца сваи на глубину, равную нескольким диаметрам; 4) перемещение грунта наблюдается в очень ограниченном объеме, размеры которого зависят от его способности к сжатию.

Ж. Керизель [25] исследовал процессы, сопутствующие вдавлению зонда в грунт. В результате он пришел к следующим выводам: при погружении наконечника зонда в грунт происходит повышение плотности грунта под острием; уплотнение грунта вблизи наконечника обуславливается перемещением частиц в стороны и вниз; происходит выпирание грунта в кольцевое пространство между стенками скважин и штангой зонда. Он утверждает, что ниже критической глубины, во многом зависящей от плотности, чувствительности и консистенции грунтов, а также от геометрии зонда, преобладают уплотнение или разуплотнение под наконечником зонда и сдвиг, сопровождаемый разрыхлением грунта вблизи кольцевого пространства.

Ж. Керизель произвел более 500 определений объемной массы песков режущими кольцами и установил, что при погружении стержневого зонда возникают зоны скольжения, в пределах которых песок имеет критическую (для данного напряженного состояния) пористость. Эти зоны наблюдаются по всей длине зонда. Диаметр зоны скольжения близок к значению 5,5 диаметров пенетromетра. Зона распространяется на три диаметра ниже острия. Возможно наличие дополнительных зон скольжения, распространяющихся радиально от основания. Вблизи наконечника зонда в зоне, распространяющейся в сторону на два диаметра зонда, грунт полностью нарушен.

Некоторые исследователи отмечают, что в процессе вдавливания зонда в грунт проявляется процесс сдвига и сжатия пород, при этом поверхности скольжения фиксировались по всей длине зонда.

Поскольку вопрос о характере деформации грунта вблизи наконечника зонда является принципиальным при выборе схем интерпретации результатов статического зондирования и существует несколько взглядов на этот процесс, были проведены стендовые испытания, моделирующие процесс вдавливания зонда в грунт. Они были открытыми, т. е. позволяли наблюдать динамику процесса, а не только конечную картину, как это бывает в результате вдавливания зонда в закрытый лоток.

Для опытов использован металлический лоток размером $600 \times 400 \times 1000$ мм. Три боковые стенки и дно лотка металлические, а четвертая — в зависимости от характера опыта закрывалась стеклом (толщиной 20 мм) или деревянным щитом. В большинстве случаев такое стекло выдерживало возникавшее в грунте напряжение.

На верхнем переплете лотка устанавливалось устройство, позволявшее производить вдавливание зонда в породу (рис. 51). Оно состояло из двух направляющих стоек, по которым передвигалась упорная плита под домкрат. По мере того как зонд вдавливался в грунт и поршень домкрата выдвигался на максимальную величину, упорная плита передвигалась вниз и фиксировалась в новом положении, после чего цикл вдавливания зонда повторялся. Скорость вдавливания зонда равнялась 10 см/мин.

Вдавливательное устройство можно было перемещать в плане лотка и таким образом производить вдавливание зонда не только в центре лотка, но и непосредственно вблизи его стеклянной стенки.

Для вдавливания использовались зонды двух типов: 1) полный зонд, состоящий из наконечников диаметром 60 мм с углом рас-

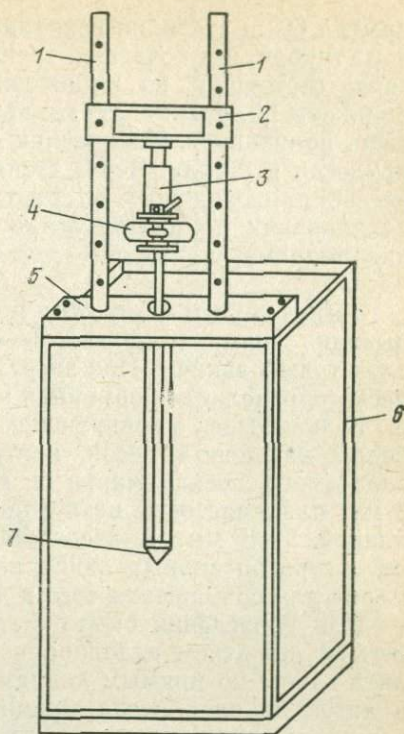


Рис. 51. Схема лотка для испытания грунтов.

1 — стойки направляющие; 2 — опорная плита; 3 — домкрат; 4 — динамометр ДОСМ-3; 5 — анкерные балки; 6 — корпус; 7 — наконечник зонда

крытия 60° и стержня, ввинчивающегося в наконечник и защищенного трубой, исключавшей трение грунта по стержню; 2) разрезной зонд, состоящий из половинок конуса, в которые ввинчивался стержень. Давление от домкрата передавалось через этот стержень полуконусу. Наконечник своей плоской поверхностью плотно прилегал к стеклу. Через стекло можно было наблюдать все процессы, происходящие в грунте. Первый зонд использовали для вдавливания по центру лотка (при этом измерялось сопротивление породы), а второй — для вдавливания по стеклянной стенке лотка.

Загрузка лотка грунтом производилась вручную. Песок укладывали слоями толщиной 3—4 см, с последующим уплотнением слоя трамбованием. При загрузке лотка для укладываемого в него песка определялась объемная масса.

В качестве маркирующих материалов были использованы: белый кварцевый песок, контрастно выделяющийся на фоне исследуемого песка; марки в виде шайб диаметром и толщиной 3 мм; пластмассовые нити (в опытах с глиной) толщиной 0,7 мм и длиной 5—6 мм. В песок маркирующие знаки укладывались в виде горизонтальных линий непосредственно у стекла, отдельных марок или совмещения того и другого.

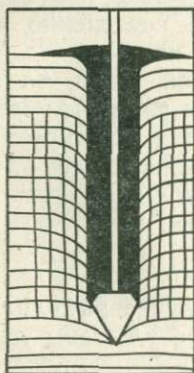
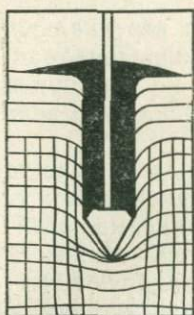
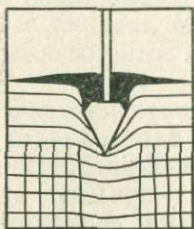
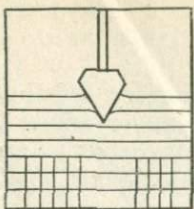
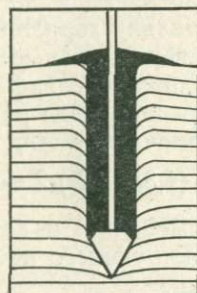
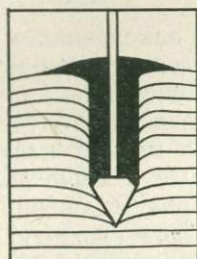
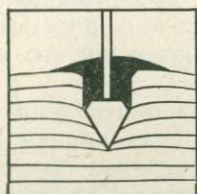
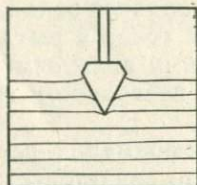
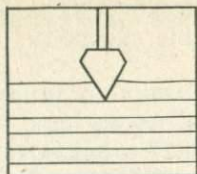
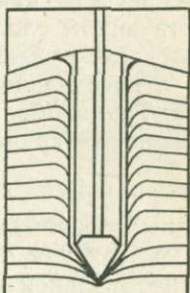
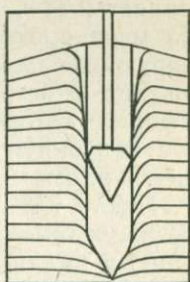
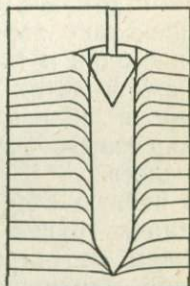
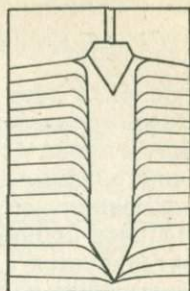
При проведении опыта с глиной отрезки пластмассовых нитей легким нажатием вдавливались в зачищенную поверхность монолита глины по прямым линиям. Затем монолит глины укладывали в лоток на слой песка толщиной 10—20 см, маркированную поверхность слегка прижимали к стеклу и засыпали песком с остальных трех сторон. После этого на монолит укладывали песок, в котором также располагались маркирующие слои. Песок, окружавший монолит, имел среднюю плотность.

Регистрация результатов опытов осуществлялась с помощью фотографирования процессов вдавливания зонда через каждые 2—4 см продвижения наконечника, а также киносъемки.

Перед проведением основных серий опытов разрезным зондом были выполнены предварительные опыты, позволившие определить граничные условия при выполнении зондирования в лотке и в первую очередь установить максимальную плотность, которая при данной геометрии зонда и лотка позволила бы избежать влияния стенок и дна лотка на результаты зондирования. Для этого вдавливали зонд по центру лотка в песок, уложенный с различной плотностью.

Влияние стенок и дна лотка выражалось в том, что нисходящая часть графика R по глубине резко отклонялась от вертикального положения в сторону увеличения. Таким образом было определено максимальное значение плотности скелета песка $1,60 \text{ т/м}^3$. Все последующие опыты, проведенные с разрезным зондом, выполнялись в песках, плотность скелета которых не превышала этой величины.

ИССЛЕДОВАНИЕ РЫХЛЫХ ПЕСКОВ. Плотность скелета песка, уложенного в лоток, равнялась $1,45 \text{ т/м}^3$, что в естественных

а*б**в*

52. Деформации при вдавливании наконечника зонда в аллювиальные среднезернистые пески:
а —рыхлый; *б* —средней плотности; *в* —при повторном вдавливании

условиях характерно для аллювиальных отложений. Эта же плотность характерна для песков, укладываемых в искусственные сооружения гидравлическим способом, особенно при намыве под воду.

Рис. 52, а дает представление о динамике процесса деформации рыхлого среднезернистого песка под наконечником зонда. Для удобства проведения анализа и исключения неточностей из-за возможной разномасштабности фотографий все измерения и вычисления выполнены в долях радиуса зонда.

Процесс проникновения зонда в рыхлый среднезернистый песок характеризуется следующими явлениями. До вдавливания и после его окончания положение поверхности грунта в лотке осталось на одном и том же уровне.

Поскольку характер деформации всех маркирующих слоев по глубине один и тот же (что свидетельствует об однородности уложенного в лоток песка), деформацию песка под внедряющимся зондом и вблизи него можно рассмотреть на примере одного маркирующего слоя, характеризуя его величинами, средними для всех слоев.

В первую очередь была определена граница вертикальной деформации грунта по оси вдавливания зонда, определяемая расстоянием от острия наконечника до первого не претерпевшего прогиба маркирующего слоя. Для рыхлого песка эта величина составляет 2,74 *r*.

По мере прохождения наконечником зонда этого расстояния маркирующий слой все больше прогибается и, наконец, при соприкосновении с острием наконечника получает максимальный прогиб, форма которого близка к полукругности. Минимальный радиус полукругности (в момент касания маркирующего слоя острием) равен 2,78 *r*. Высота сегмента в этот момент равна 0,63 *r*. После того как острие наконечника прорезало полукругность, последняя приобретает сложную форму, постепенно переходящую в цилиндр с расширяющейся верхней частью.

После того как зонд погрузился до конечной точки, по всем маркирующим слоям определяли горизонтальные размеры участка, на котором наблюдались вертикальные смещения маркирующего слоя относительно их положения, зафиксированного до начала опыта. Таким образом были получены размеры зоны вертикальных перемещений грунта. Обозначив ее $\Delta r_{\text{в}}$, получим, что

$$\Delta r_{\text{в}} = (4,3r - 2r)/2 = 1,15r. \quad (26)$$

Зоны горизонтальных смещений в данном случае выделить не удалось, так как слои маркирующего песка были уложены только в горизонтальной плоскости.

Поскольку в данном случае определенный интерес представляли не только размеры зоны перемещения грунта вообще, но и, в частности, того грунта, который находится непосредственно в вертикальной проекции зонда, опыт был продолжен. В сохранившееся после вдавливания зонда отверстие был уложен и уплотнен (до

Рис. 53. График зависимости траекторий перемещения песчинок от их первоначального расстояния до оси вдавливания зонда для песков:

1 — средней плотности; 2 — рыхлого

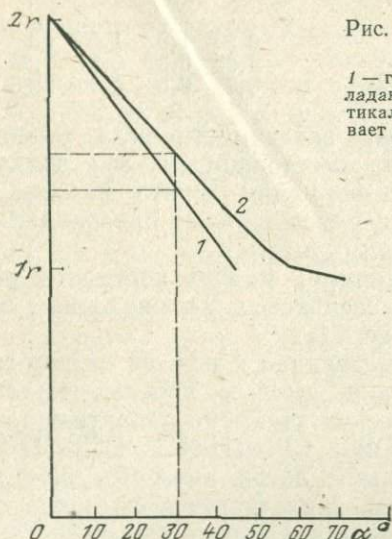
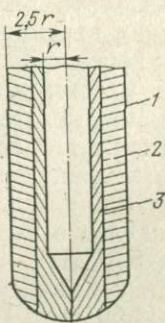


Рис. 54. Схема деформации рыхлых песков при вдавливании в них зонда.

1 — граница общих деформаций; зоны преобладания смещений; 2 — горизонтальных; 3 — вертикальных. Направление штриховки указывает преобладающее направление смещения частиц



исходной плотности) белый кварцевый песок (см. рис. 52, в). После этого проведено повторное вдавливание зонда по той же оси скважины. Белый песок был выжат из-под наконечника зонда и расположился в виде тонкостенной трубы по периферии скважины. Толщина стенок трубы колебалась в пределах $0,20r - 0,24r$. Этот опыт показал, что песок, выжатый из-под зонда, претерпевает значительное уплотнение; объем его уменьшается до 50 %.

Для определения границ горизонтального перемещения частиц мелкозернистого песка был проведен подобный опыт, но кроме маркирующих слоев песка в исследуемом песке были установлены марки по оси вдавливания на расстоянии r , $2r$ и $4r$ от нее. Зонд благодаря жестким направляющим, довольно точно прошел по заданной оси. В результате песок вместе с марками переместился вниз и в стороны, при этом оказалось возможным измерить смещение марок в горизонтальном и вертикальном направлениях и, таким образом, определить траектории движения частиц песка, находившихся на различных расстояниях от оси зонда. Было установлено, что положение крайних точек осталось неизменным.

Марки, расположенные на расстоянии $4r$ от оси вдавливания, также остались на прежних местах. Марки, находившиеся на расстоянии $2r$ от оси, значительно сместились, и, наконец, марки, находившиеся на расстоянии r от оси вдавливания, имели максимальные смещения.

На примере перемещения этих точек и результатов предыдущих опытов можно в первом приближении построить схему деформации песка и траектории движения песчинок при вдавливании зонда в рыхлый песок. Данные, характеризующие эту картину, приведены ниже.

Расстояние марки от оси зонда, r	0,95	1,0	1,05	1,2	2,0
Горизонтальное смещение, r	0,25	0,37	0,30	0,25	0,13
Вертикальное смещение, r	0,73	0,6	0,40	0,25	0,0

На рис. 53 приведен график зависимости угла траектории частиц песка (к горизонту) от расстояния до оси зонда. Он позволяет разделить область деформации грунта на две зоны: 1) преобладания вертикальных перемещений; 2) преобладания горизонтальных перемещений частиц грунта.

Используя рассмотренные данные, можно построить общую схему деформации рыхлых мелкозернистых аллювиальных песков при вдавливании в них зонда (рис. 54).

Как видно из фактического материала и рис. 54, выпор грунта на поверхность при зондировании рыхлых песков отсутствует, поверхности сдвига в рыхлых песках также не обнаружено.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕСКОВ СРЕДНЕЙ ПЛОТНОСТИ.
Среднезернистый песок, уложенный в лоток, имел объемную массу скелета 1,55—1,60 т/м³. Пески такой плотности очень широко распространены в естественных условиях. На рис. 52, б представлены изменения, происходящие в песке при вдавливании в него зонда, причем эта картина значительно отличается от картины, полученной для рыхлых песков.

Прежде всего следует отметить, что поверхность песка при вдавливании зонда изменила форму. По мере внедрения зонда грунт выдавливается на поверхность, в результате чего образуется поверхность выпора. Рост ее продолжается до тех пор, пока наконечник зонда не погрузится на глубину 5—6 r . При этом наблюдаемый максимальный подъем поверхности песка равен r .

По деформации маркирующих слоев при погружении зонда можно выделить два горизонта. Первый, расположенный до глубины 5—6 r , характеризуется наличием выпора грунта в сторону поверхности. При этом величина приподнятости маркирующих слоев уменьшается по мере приближения к границе раздела горизонтов. Ниже ее выпора песка к поверхности не наблюдается, что свидетельствует о том, что деформация нижнего второго горизонта развивается по той же схеме, что и для рыхлых песков, т. е. вниз и в сторону.

Общим в деформации обоих горизонтов является характер изменений группы непосредственно под наконечником зонда. Но в отличие от рыхлых песков ниже наконечника и даже при прохождении наконечника через маркирующий слой не наблюдается или почти не наблюдается прогиб маркирующего слоя. Грунт раздвигается в стороны и как бы обтекает наконечник зонда. Характер изгиба маркирующих слоев по сравнению с рыхлыми

песками меняется. В данном случае наблюдается более резкий изгиб маркирующего слоя к стенке скважины.

Выражая отмеченные особенности для песков средней плотности в количественных значениях, можно сделать следующие выводы.

1. Максимальный подъем поверхности песка h и максимальный радиус поднятия R , наблюдаемые на поверхности, составляют $h=r$ и $R=5,5r$; на глубине $2r-h=0,34$, $R=5,5r$; при $4r-h=0,22$, $R=4r$; при $2,5-3,0d$ высота поднятия и радиус близки к нулю.

2. В рассматриваемом опыте глубина $2,5-3,0d$ может быть принята за критическую, т. е. глубину, выше которой происходит как уплотнение в стороны и вниз, так и частичный выпор грунта на поверхность.

3. О том, что в данном случае протекают два процесса, свидетельствует и то, что при сравнении объема песка, вытесненного зондом, и объема грунта, приподнятого над первоначальной поверхностью, объем вытесненного грунта составляет около 470 см^3 , а приподнятого — около 235 см^3 . Отсюда следует, что 50 % грунта уплотнилось, а 50 % было выжато на поверхность. Ниже критической глубины песок претерпевает только уплотнение, причем преимущественно в стороны.

После того как опыты с вдавливанием зонда в песок средней плотности были закончены, в образовавшееся отверстие был заложен и уплотнен до первоначальной плотности белый кварцевый песок и произведено повторное вдавливание зонда по той же оси. Цель опыта — определение толщины стенки трубы, образующейся в результате отжатия песка из-под наконечника зонда.

В результате повторного вдавливания было выявлено, что в верхней части (см. рис. 52, в) произошел скол песка примерно под углом 45° к оси зонда, а толщина стенки отжатого песка составила около $0,07-0,08r$. Этот опыт позволил определить значение критической глубины и общую картину изменения строения песка средней плотности при вдавливании зонда.

Аналогичные опыты проводились с мелкозернистым песком, уложенным в лоток в зоне маркирующих слоев с той же плотностью, что и в предыдущих опытах. Выше этой зоны грунт имел плотность несколько меньшую, вследствие чего на поверхности выпора не произошло. В зоне расположения маркирующих слоев выпор не отмечался из-за наличия пригрузки. Характер деформации маркирующих слоев остался тем же, что и в предыдущем опыте, т. е. маркирующие слои не прогибались при приближении к ним наконечника, наконечник резал грунт, раздвигая его в стороны.

При проведении опыта острие наконечника проходило по центральным маркам трех маркирующих слоев. Две соседние марки были удалены от центральной марки на расстояние, равное величине r , и таким образом, по их смещению можно было проследить не только направление деформации, но и величину зоны, в которую выжимается грунт, непосредственно находящийся под наконечником зонда. В ходе опыта выявилось, что ось вдавливания на не-

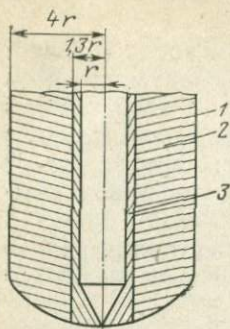


Рис. 55. Схема деформации песков средней плотности при вдавливании в них зонда.

1 — граница общих деформаций. Зоны преобладания смещений: 2 — горизонтальных, 3 — вертикальных. Направление штриховки указывает преобладающее направление смещения частиц

сколько миллиметров сместилась по отношению к оси марки, отсюда некоторая асимметрия полученной картины деформации песка. В связи с этим в данном случае рассматриваются средние величины перемещений частиц песка, расположенных с противоположных сторон зонда.

Следует отметить, что все крайние марки после вдавливания зонда не сместились ни в горизонтальном, ни в вертикальном направлении. Марки, расположенные на расстоянии полутора диаметров от оси вдавливания зонда, не переместились в вертикальном направлении, но в горизонтальном направлении они отодвинулись на $0,072r$. Марки, находящиеся на расстоянии, равном одному диаметру, также сместились только в горизонтальном направлении. Величина смещения $0,108r$. Наконец, точки, располагавшиеся на расстоянии радиуса от оси вдавливания зонда, сместились в горизонтальном направлении на $0,17r$ и в вертикальном — тоже на $0,17r$, т. е. под углом 45° .

Нанеся угловые смещения частиц песка и расстояния от оси вдавливания на график (см. рис. 53), получим зоны преобладания вертикальных и горизонтальных перемещений песчинок для мелко- и среднезернистых песков средней плотности. На основе этих данных составлена схема изменения строения песков средней плотности при вдавливании в них зонда (рис. 55).

ИССЛЕДОВАНИЕ ГЛИНЫ. Для сравнения процессов, возникающих в связных и несвязных грунтах при вдавливании в них зонда, аналогичный опыт был проведен с иольдиевой глиной. Поскольку необходимого для полной загрузки лотка количества глины не было, опыт был поставлен по схеме, приведенной выше. Размеры монолита $20 \times 20 \times 20$ см оказались вполне достаточными для получения надежных результатов. Как и в опытах с песками, в данном случае необходимо было выявить количественную картину деформации и границы зон общей деформации. На рис. 56 приведена схема внедрения наконечника зонда в монолит. Измерения показали, что на поверхность монолита наконечник зонда начал влиять, находясь на расстоянии около $1r$ от нее. При этом, как и в рыхлых песках, наблюдался прогиб поверхности монолита и маркирующих слоев.

Выпора глины на поверхность зафиксировано не было. Измерения показали, что концы маркирующих слоев после окончания вдавливания сохранили свое первоначальное положение. Это свидетельствует о том, что деформации и напряжения гасились внутри монолита.

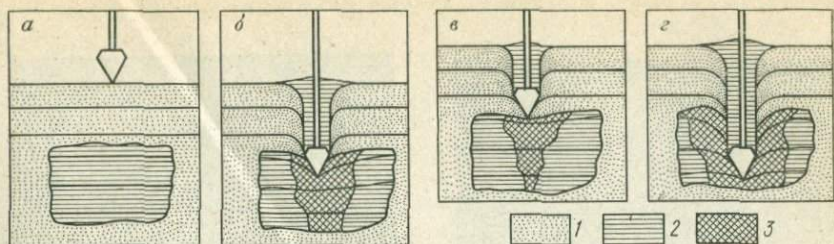


Рис. 56. Деформации иольдиевых глин при вдавливании в них наконечника зонда: а, б, в, з — последовательные стадии вдавливания.

1 — песок; 2 — глина; 3 — зона перераспределения влаги

Мощность зоны с вертикальными перемещениями составила около $1,1r$, а с горизонтальными — $2,16r$. Говоря о размерах зон преобладания вертикальных и горизонтальных смещений грунта, в данном случае можно лишь предположить, что первая занимает очень ограниченный объем и преимущественно происходит деформация грунта в горизонтальном направлении.

При детальном рассмотрении процесса было отмечено явление, которое позволяет приблизительно судить о зоне напряжений, возникающих в монолите. Оказалось, что по мере приближения наконечника зонда к монолиту и внедрения его в глину в образце под действием возникающих в нем напряжений возрастает поровое давление и отжимается вода; при этом область отжатия влаги перемещается перед наконечником зонда в виде сферической поверхности и отражает деформацию маркирующих слоев. Радиус сферы, считая от острия зонда, приблизительно равен $2r$. После того как наконечник зонда прошел монолит, на лицевой стеклянной стенке остались четкие следы зоны, в которой произошло перераспределение влаги. Размеры зоны колеблются от r до $2r$.

Изучение мезотекстуры глины, проводившееся в прозрачных шлифах при увеличении в 90—200 раз с помощью поляризационного микроскопа МИН-8, показало значительные изменения, среди которых можно выделить два основных (на рис. 57, а дан фон): 1) сближение глинистых частиц и агрегатов в направлении действия конуса, что приводит к общему уплотнению образца (см. рис. 57, б); 2) нарушение сплошности текстуры сетью трещин, направленных под углом $42-45^\circ$ к оси конуса, разбивающих породу на прямоугольные блоки. Густота сети неодинакова, наблюдается затухание трещин по мере удаления от оси вдавливания зонда к периферии (см. рис. 57, в). В зоне преобладания вертикальных перемещений расстояние между основными, направленными вверх трещинами меняется от 1 (вблизи края) до 3 мм при раскрытии трещин 0,03 мм.

Трещины, направленные вниз, в зоне максимального нарушения расположены равномерно по всей высоте шлифа на расстоянии

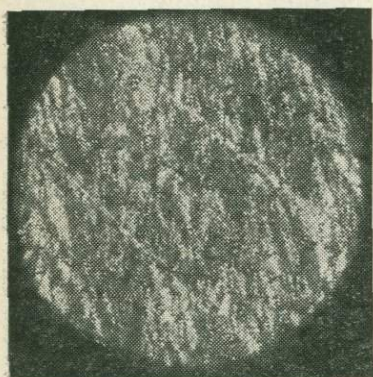
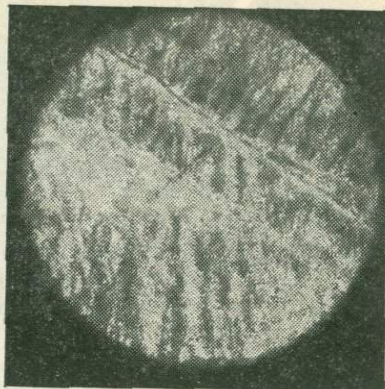
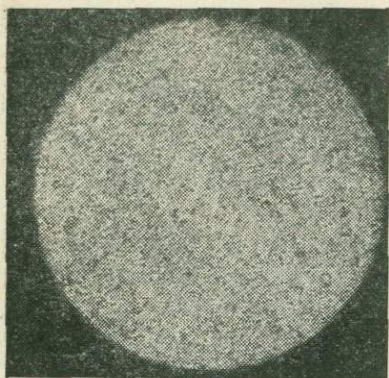


Рис 57. Изменение мезотекстуры ильдиевых глин в зависимости от расстояния до оси вдавливания зонда.

Расстояния: а — $2,5r$; б — $0,25r$; в — $0,15r$

0,2—0,3 мм друг от друга и имеют мощность раскрытия 0,01—0,008 мм.

В процессе образования трещин происходит смещение отдельных блоков грунта относительно друг друга, о чем свидетельствует наличие зон смещения, отличающихся ориентацией частиц и агрегатов вдоль трещин. На рис. 58 дана общая схема.

В заключение можно сделать следующие выводы, вытекающие из результатов проведенных работ, позволивших оценить характер явлений, возникающих при вдавливании зонда в средне- и мелкозернистые, рыхлые и средней плотности пески.

Характер деформации песка во всех случаях один и тот же. Частицы песка при вдавливании зонда (ниже критической глубины) перемещаются вниз и в стороны, при этом чем плотнее песок, тем больше размеры зоны преобладания горизонтальных смещений частиц и тем меньше зона преобладания вертикальных перемещений. Значительную часть зоны преобладания вертикаль-

ных смещений занимает грунт, выжатый из-под наконечника зонда.

Ни в одном из опытов, за исключением повторного вдавливания в песок средней плотности, не отмечено появления поверхностей сдвига грунта вблизи наконечника зонда.

В исследованном монолите глины характер явлений, возникающих при вдавливании зонда, не противоречил результатам, полученным для песков. Что касается размеров зон и границы общих деформаций, то для каждого из грунтов они индивидуальны.

Полученные общие схемы распределения деформаций позволяют обоснованно подойти к выбору метода интерпретации результатов статического зондирования относительно сжимаемости и прочности грунтов. Было установлено, что на результаты зондирования влияют также сдвиговые параметры грунта, так как в результате развития нормальных давлений возникают силы, препятствующие движению поверхности зонда по уплотненному грунту.

* *
*

Установлено, что при вдавливании зонда в указанные породы выпора грунта на поверхность не происходит.

При вдавливании зонда в средне- и мелкозернистые пески средней плотности наблюдается частичный выпор грунта на поверхность, который прекращается при погружении зонда ниже некоторой (критической) глубины $2,5-3,0d$. При вдавливании зонда в пески и связные грунты происходит отжатие грунта из-под наконечника в стороны и вниз.

В рыхлых песках граница общих деформаций находится на расстоянии $2,5r$, а границы зоны преобладания вертикальных смещений — $1,5r$ от оси зонда. Деформированная зона под наконечником имеет форму полусферы, вершина которой находится на расстоянии $2,7r$ от острия.

Угол траектории частиц песка изменяется в зависимости от расстояния от стенки зонда от 55° (у стенки) до 0° (на расстоянии $2r$). В песках средней плотности граница общих деформаций находится на расстоянии $4,0r$, а граница зоны преобладания вертикальных смещений — $1,3r$.

Деформированная зона под наконечником имеет форму полусферы, вершина которой касается острия наконечника. Угол траек-

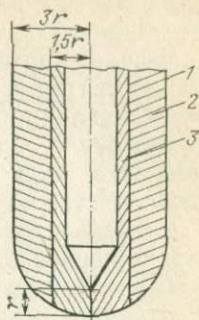


Рис. 58. Схема деформации глин при вдавливании в них наконечника зонда.

1 — граница общих деформаций; зоны преобладания смещений: 2 — горизонтальных, 3 — вертикальных. Направление штриховки указывает преобладающее направление смещения частиц

тории частиц песка изменяется от 45° у стенки зонда до 0° на расстоянии $2r$.

Общая картина деформации грунта около наконечника следующая: грунт, выжатый из-под зонда, оказывает давление на грунт, находящийся в непосредственной близости от стенок зонда, отодвигает его на небольшую величину и одновременно увлекает вниз. Эта зона преимущественно вертикальных перемещений породы и есть, по сути дела, зона сдвига.

Степень перемещения или сдвига хорошо фиксируется изгибом маркирующих линий. Вторая — зона — преимущественно горизонтальных смещений — зона сжатия грунта. Что касается зон разуплотнения, о которых сказано у Ж. Керизеля и которые иногда проявляются, то они действительно могут возникнуть в зоне сдвига и объясняются соотношением естественной плотности породы с ее критическим значением. Картина, наблюдаемая при внедрении зонда, свидетельствует о том, что процессы сдвига и сжатия породы в данном случае очень тесно связаны, протекают в одно и то же время и зависят в первую очередь от генезиса, вида породы, плотности и влажности. При этом резко меняется поровое давление вокруг наконечника зонда. Следует также отметить и то обстоятельство, что с ростом плотности породы увеличивается зона взаимодействия зонда и породы. Отсюда следует, что объем исследуемой зондированием породы изменяется по глубине в зависимости от плотности.

Влияние параметров наконечников зонда на результаты зондирования

Для уточнения приемов интерпретации результатов зондирования и обоснованного проектирования технических средств ниже приведены результаты экспериментальных исследований.

Опытный участок, на котором проводились экспериментальные работы, находился у с. Коломенское на II надпойменной террасе. Поверхность участка ровная; уровень грунтовых вод расположен на глубине 0,5—2,0 м. Большая часть пенетрационных работ выполнена на площадке размером 15×15 м.

Участок сверху сложен покровными супесями и суглинками, аллювиальными песками, аллювиальными супесчаными разностями и юрскими глинами. Такое разнообразие литологического строения участка позволило проследить изменение удельного сопротивления в зависимости от параметров наконечника зонда для нескольких литологических разностей грунта.

Для уточнения литологического строения опытного участка и определения основных физических показателей грунтов в четырех пунктах участка по углам квадрата 15×15 м и был произведен пенетрационный каротаж полным комплексом.

Разрез сложен в основном тремя типами однородных по физическим свойствам грунтов: 1) аллювиальными мелкозернистыми

Данные по опытному участку

Грунт	$W_{об.} \%$	$\gamma_{об.} \text{ т/м}^3$	$\gamma_{ск.} \text{ г/см}^3$
Аллювиальные пески	32,0	1,88	1,41
	28,0	1,94	1,50
	28,8	1,92	1,46
	28,8	1,92	1,46
	27,8	1,90	1,44
	28,0	1,94	1,50
Среднее	28,8	1,92	1,46
Аллювиальные суглинки	31,4	1,90	1,43
	29,8	1,95	1,40
	31,4	1,90	1,43
	29,5	1,92	1,46
Среднее	30,5	1,92	1,45
Глины юрские	29,0	1,92	1,45
	29,0	1,92	1,45
Среднее	29,0	1,92	1,45

глинистыми песками (водонасыщенными, рыхлыми и средней плотности); 2) аллювиальными суглинками; 3) юрскими глинами (табл. 8).

ОПИСАНИЕ УСТАНОВОК И ОБОРУДОВАНИЯ. Для проведения полевых экспериментальных работ в качестве базовой установки был использован опытный образец пенетрационной каротажной станции СПК. Это позволило получить диаграмму распределения: объемной массы грунтов по разрезу отложений методом гамма-гамма-каротажа (ГГК), объемной влажности грунтов по разрезу отложений методом нейтрон-нейтронного каротажа (ННК), удельного сопротивления грунта наконечнику зонда, трения грунта по боковой поверхности цилиндрического элемента зонда, естественного радиоактивного излучения пород методом гамма-каротажа (ГК). Все пять диаграмм записи непрерывны по глубине зондирования.

Для получения пенетрационно-каротажных данных использовалась установка, смонтированная на базе трактора ТДТ-75. К ее основным узлам относятся: 1) вдавливающее устройство; 2) устройство для подачи, подъема и укладки штанг при наращивании или развинчивании колонны; 3) вращатель, размещенный над вдавливающим устройством; 4) гидравлическая система, обеспечивающая автоматизацию процессов вдавливания и извлечения зонда, а также управление всеми механизмами и устройствами установки; 5) комплект пенетрационных штанг, в которые вмонтирован шестижильный кабель; 6) привод гидронасосов от двигателя трактора; 7) механизм синхронного привода лент самопишущих регистрато-

ров; 8) бензоэлектрический агрегат для питания аппаратуры и других потребителей станции.

Лаборатория-станция была смонтирована на автобусе повышенной проходимости и включала следующие основные элементы оборудования и аппаратуры; 1) комплект из двух измерительных пенетрационно-каротажных зондов. Зонд 1 имел три измерительных датчика: два электротензометрических для определения удельного сопротивления наконечнику и трения грунта по боковой поверхности зонда и датчик гамма-гамма-каротажа. Зонд 2 включал датчики нейтрон-нейтронного и гамма-каротажа; 2) аппаратный стенд с панелями: тензометрии для записи информации от электротензометрических датчиков при погружении зонда; радиометрии для записи информации от датчика нейтрон-нейтронного и гамма-каротажа при погружении зонда 2; управления для обеспечения необходимой коммутации; регистраторов, состоящей из двух приборов типа Н-361 с общим приводом ленты для непрерывной видимой записи информации.

Конструктивные особенности зондов. Датчики удельного сопротивления грунта наконечнику и трения грунта о боковую поверхность стандартного измерительного зонда 1 расположены в нижнем конце зонда, непосредственно в зоне возникновения регистрируемых сопротивлений грунта, и представляют собой цилиндрические упругие элементы с наклеенными на них электрическими тензометрами. Стандартный тензометрический зонд СПК имел диаметр 62 мм.

Для проведения полевых экспериментальных работ были изготовлены зонды диаметром 60, 80 и 100 мм. Собственно использовался один зонд, но он имел набор наконечников различных диаметров и углов заострения, а также набор муфт трения с различными внешними диаметрами.

Таким образом, комбинируя различные наконечники, можно было получить зонды с диаметрами 60, 80 и 100 мм, для каждого из них имелся набор наконечников с углами заострения 15, 60 и 180°.

Кроме того, был изготовлен зонд диаметром 60 мм, позволявший измерять напряжения, возникающие в результате зондирования не на всем наконечнике, а лишь на его острие, имевшем площадь поперечного сечения 10 см² ($d=36$ мм). Этот зонд позволял изучать характер распределения напряжений по высоте наконечника.

На том же полигоне была испытана приставка, позволявшая измерять давления, направленные радиально к боковой поверхности зонда, или упругий отпор грунта (датчик нормального давления).

В процессе зондирования запись удельного сопротивления наконечнику и удельного трения велась непрерывно по всей глубине зондирования.

Было пройдено 44 пенетрационных вертикали общим метражом 420 м; по каждой из них был получен график изменения удель-

Изменение величины сопротивления пород (R , МПа) в зависимости от диаметра (d , мм) и угла заострения (α°) зонда

Грунт	R при				
	$d=36$		$d=60$		
	$\alpha=15$	$\alpha=60$	$\alpha=15$	$\alpha=60$	$\alpha=180$
Пески мелкие глинистые	2,87	2,58	2,29	2,05	1,85
Суглинки	1,98	2,33	1,15	1,11	1,08
Юрские глины	1,29	1,32	0,96	0,85	1,00

Продолжение табл. 9

Грунт	R при					
	$d=80$			$d=100$		
	$\alpha=15$	$\alpha=60$	$\alpha=180$	$\alpha=15$	$\alpha=60$	$\alpha=180$
Пески мелкие глинистые	1,90	1,79	2,17	1,67	1,73	1,85
Суглинки	1,21	0,92	0,94	1,08	0,88	0,98
Юрские глины	1,01	0,69	0,82	0,63	0,64	0,82

ного сопротивления по глубине зондирования. Поскольку для каждой из четырех групп точек имелась геологическая колонка с выделенными на ней границами отдельных литологических разностей, границы были перенесены на графики пенетрации. Таким образом, графики изменения удельного сопротивления оказались разбитыми на ряд интервалов, каждый из которых соответствовал определенному типу грунта.

После этого по графикам были определены средние значения R по интервалам. В табл. 9 приведены усредненные по всем четырем группам значения удельных сопротивлений грунта наконечнику зонда в зависимости от типа грунта (грунт находился в водонасыщенном состоянии).

На рис. 59 приведены зависимости R от диаметра и угла заострения зонда для песков, суглинков и глин. Графики построены следующим образом. Для выявления влияния диаметра зонда на значения удельного сопротивления показатели для каждого диаметра с различными углами заострения сгруппированы и взято их среднее значение. Чтобы выявить влияние угла заострения, группировали средние значения R для каждого угла заострения независимо от диаметра зонда.

Значения, характеризующие R зондов с диаметрами 60, 80 и 100 мм, лежат на одной прямой, причем чем больше диаметр (даже в таком маленьком интервале), тем меньше удельное сопротивление. Если учесть, что каждая из этих точек является

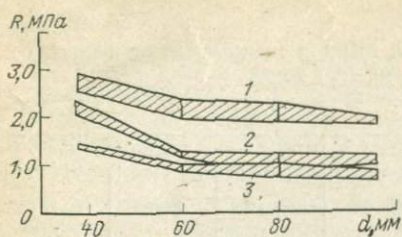


Рис. 59. Графики зависимости параметра R от диаметра зонда для: 1 — песков; 2 — суглинков; 3 — глин

средней величиной сотен измерений, то можно не сомневаться в достоверности отмеченной закономерности.

Значения R мало зависят от угла заострения наконечника, и все же для угла 60° наблюдается некоторое понижение по сравнению с углами заострения 15 и 180° .

Картина изменения R в зависимости от диаметра зонда для суглинков и глин та же, что и для песков. Увеличение диаметра зонда приводит к снижению удельного сопротивления грунта зондированию. Хотя это снижение незначительно, но оно фиксируется. Картина изменения удельного сопротивления от угла раскрытия наконечника зонда также аналогична, но для глин она выражена в меньшей степени, так как сопротивление их ниже.

КОЭФФИЦИЕНТ ТРЕНИЯ ГРУНТА ПО МЕТАЛЛУ. При внедрении зонда поверхность его контактирует с породой и поэтому на результаты зондирования R и T значительно влияет трение о грунт. В связи с этим изучение характера изменения коэффициента трения металла о грунт имеет важное значение для интерпретации результатов зондирования; поэтому необходимо более подробно остановиться на этом показателе. Указанный коэффициент изменяется в пределах $0,33$ — $0,82$. Песчаные грунты имеют большие значения коэффициентов трения, глинистые — меньшие. Один и тот же грунт при различных значениях влажности имеет разные коэффициенты трения. Наиболее детально этот вопрос проанализировал Я. Я. Нагла, который исследовал легкую и тяжелую супеси, легкий пылеватый суглинок и пылеватую глину.

Несколько серий опытов, заключавшихся в сдвиге металла с разной степенью обработки поверхности по исследуемым грунтам, имевшим различную влажность, позволили получить коэффициенты трения стали по грунту и сделать выводы: коэффициент трения зависит в первую очередь от влажности и нормального давления; он возрастает с увеличением шероховатости поверхности металла. В общем коэффициент трения находится в сложной зависимости от влажности, вида грунта, удельного давления и шероховатости поверхности.

Коэффициент трения, как известно, выражается отношением удельного трения к удельному нормальному давлению и является величиной безразмерной. Иногда коэффициент трения выражает тангенс угла ψ в отличие от угла φ , определяющего коэффициент внутреннего трения (для песков).

П. У. Бахтин для почв, а Я. Я. Нагла для грунтов, проведя эксперименты в широких пределах изменения влажности, пришли к выводу, что при трении грунта о сталь по мере увеличения влажности грунта от воздушно-сухого состояния коэффициент

трения возрастает, но только до определенного для каждого вида грунта значения влажности. Затем, несмотря на дальнейшее увеличение влажности, величина коэффициента трения начинает уменьшаться (рис. 60).

На всех графиках при определенных значениях влажности прослеживается максимум значения коэффициента трения. Для разных грунтов и почв эти значения различны так же, как и значения влажности, при которых наблюдается максимум.

Повышение коэффициента трения с увеличением влажности объясняется возрастанием сил молекулярного притяжения частиц почвы, а снижение после перехода максимума — появлением на поверхности контакта свободной воды, которая служит смазкой для трущихся поверхностей. Пределы изменения коэффициента трения от влажности у супесчаных почв меньше, чем у суглинистых. Поэтому с возрастанием глинистости грунта максимум смещается в сторону больших значений влажности. Коэффициент трения в значительной степени зависит также от нормального давления и степени обработки поверхности стали.

В процессе эксплуатации пенетрационно-каротажных станций и экспериментальных работ выяснилось, что для измерения удельного трения необходимо соблюдать очень жесткие требования к материалу и качеству изготовления цилиндров трения. При сработке поверхности цилиндров трения показания датчика трения резко искажаются. Особенно отчетливо это проявляется при работе в песчаных породах. Сработка поверхности цилиндра и уменьшение его диаметра на несколько десятых миллиметра (при условии, что размер диаметра наконечника оставался прежним) приводили к тому, что на одних и тех же песках через определенное время работы датчик трения переставал регистрировать этот показатель.

Очевидно, что для повышения информативности показателя удельного трения необходимо более детально исследовать этот процесс и, в частности, измерять нормальное давление.

Как известно, нормальное давление σ_n в общем случае может быть обусловлено бытовым давлением p_b и силой упругости σ_u сжатого при зондировании грунта.

В основном нормальное давление на поверхность рубашки трения зонда обусловлено силой упругого отпора породы, сжатой наконечником, для исследования которой были проведены опыты в лабораторных условиях. Испытывались две разновидности по-

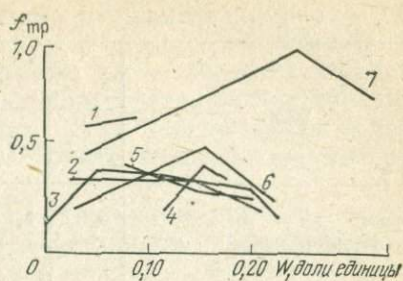


Рис. 60. Графики зависимости коэффициентов трения различных грунтов по стали от влажности

1 — песок мелкозернистый; 2 — супесь тяжелая; 3 — суглинок легкий; 4 — суглинок пылеватый; 5 — глина; 6 — суглинок средний; 7 — суглинок тяжелый

Грунт	Содержание частиц (в %) определенного размера (в мм)							
	2—1	1—0,5	0,5—0,25	0,25—0,10	0,10—0,05	0,05—0,01	0,01—0,005	—0,005—0,002
Песок	0,02	1,33	3,45	5,31	11,25	—	—	—
Суглинок тяжелый	—	—	2,38	3,77	14,91	36,99	22,52	19,42

род — песок и тяжелый суглинок, гранулометрический состав которых приведен в табл. 10.

Сущность опытов заключалась в следующем. Грунт помещался в кольцо одометра с площадью поперечного сечения 60 см² и высотой 4,7 см. На выровненную поверхность грунта устанавливался поршень прибора. Затем одометр помещался под винтовой пресс и на поршень подавалось определенное давление, которое измерялось с помощью образцового динамометра сжатия ДОСМ-3; грунт сжимался, осадка поршня фиксировалась с помощью двух индикаторов часового типа. После выдержки заданной нагрузки в течение одной минуты, давление уменьшалось ступенями, каждая ступень также выдерживалась в течение одной минуты. При снятии первых ступеней нагрузки высота образца оставалась постоянной, затем при снятии определенной ступени нагрузки начиналась упругая деформация грунта и индикаторы показывали подъем поршня. Упругость образца определялась по показанию динамометра на каждой ступени разгрузки, а величина упругой деформации — по показанию индикаторов. По результатам измерений построены графики зависимости упругой реакции грунта от величины упругой деформации и от сжимающей нагрузки, графики зависимости отношения упругой реакции грунта к сжимающей нагрузке P_y/p от величины упругой деформации и влажности песка. Типичные примеры графиков приведены на рис. 61.

Анализируя полученные результаты, можно сделать следующие выводы.

1. Величина упругой деформации увеличивается с ростом сжимающей нагрузки (деформации породы).

2. Упругая реакция грунта

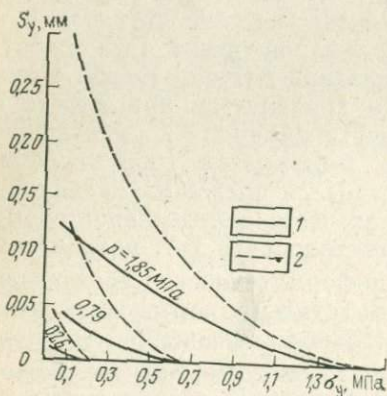


Рис. 61. Графики зависимости между силой упругости грунта σ_y и величиной упругой деформации S_y при различных значениях давления p для песка (1) и суглинка (2)

находится в прямой зависимости от сжимающей нагрузки и в обратной зависимости от величины упругой деформации. Последнее обстоятельство наводит на мысль о том, какое большое влияние на величину бокового трения должна иметь разница в диаметрах рубашки трения и наконечника зонда. Даже небольшое (в долях миллиметра) различие в диаметрах может сильно повлиять на величину бокового трения.

3. Отношение σ_y/p при определенной величине упругой деформации для каждого грунта является величиной постоянной и в песках практически не зависит от влажности. В суглинке опыты с разной влажностью не проводились.

4. Для испытанных образцов при упругой деформации, равной 0,01 мм, σ_y составляет $0,75p - p_1$ для тяжелого суглинка и $0,64p - p_2$ для песка, где σ_y — упругая реакция породы, p — общее давление на породы, $p_1=0,07$ и $p_2=0,06$ (в паскалях).

Таким образом, при одном и том же усилии сжатия упругая реакция тяжелого суглинка несколько больше, чем песка (в данном случае в 1,17 раза). Можно сделать вывод, что при малых величинах упругих деформаций упругая реакция тяжелого суглинка ненамного превышает упругую реакцию песка.

Влияние режима нагружения на показатели сжимаемости пород

Эти работы выполнены во ВСЕГИНГЕО и описаны ниже А. И. Вайтекунене. Они имеют важное значение для правильного подхода к интерпретации результатов механического каротажа и, в частности, результатов статического зондирования.

Сущность этих работ заключалась в сопоставлении результатов стандартных компрессионных испытаний с испытаниями, выполненными по схеме быстрого сжатия (замер напряжений в грунте, возникающих при заданной фиксированной деформации).

Такая постановка задачи объясняется тем, что в процессе зондирования порода, как было показано выше, деформируется наконечником в зоне, равной радиусу зонда, оказывая при этом сопротивление R внедрению наконечника. При этом скорость деформации породы примерно равна скорости внедрения наконечника. Эта скорость и была выдержана при проведении опытов на «быстрое сжатие». При этом особое внимание было уделено влиянию плотности и влажности пород на исследуемую связь.

ХАРАКТЕРИСТИКА ОБРАЗЦОВ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА. Работы проводились со среднезернистыми и пылеватыми песками, пылеватыми суглинками и глинами. Пески четвертичные аллювиальные, по минеральному составу кварцевые с небольшой примесью темноцветных или железистых минералов. Коэффициент неоднородности имеет невысокие значения: 2,5 для среднезернистого песка и 4,4 для пылеватого. Пылеватый суглинок представляет собой переотложенный элювий пермских коренных пород. В составе его преобладают тонкопесчаные и крупнопылеватые частицы (содержание фракции 0,1—0,01 мм

составляет 70 %). Минеральный состав в основном кварцевый. Зерна кварца покрыты пленками гидроокислов железа. В естественном состоянии суглинки тугопластичные ($I_T=0,2$) нормально уплотненные ($K_d=0,2$).

Глины четвертичные озерные, в составе глинистой фракции преобладает гидрослюда, есть небольшая примесь каолинита. Фракция менее 5 мкм не агрегирована, коэффициент агрегированности фракции менее 1 мкм составляет 2,1, что позволяет определить тип структуры (по И. М. Горьковой) как коагуляционный. В естественном состоянии глины полутвердые ($I_L=0,12$), нормально уплотненные ($K_d=0,8$). Степень влажности в опытах с песками изменялась от 0 до 1,0.

Для изучения влияния строения грунтов на исследуемые параметры опыты проводились на песках с различной объемной массой (при минимально и максимально возможной плотности) и на связанных грунтах естественного и нарушенного сложения. В качестве способов нагружения были выбраны компрессионные испытания (ступенчатая нагрузка) и быстрое сжатие до заданной величины деформации. Компрессионные испытания проводились в двух режимах: нагрузки и разгрузки на серийно выпускаемых приборах КПр-1 конструкции «Гидропроекта». Площадь исследуемых образцов составляла 40 см², высота — 2 см.

Величина деформации, которая задавалась при быстром сжатии, устанавливалась по компрессионным кривым, исходя из следующих соображений. Для сравнения величина деформации при быстром сжатии для всех образцов была одинаковой. Точка сопоставления должна находиться на участке компрессионной кривой, характеризующемся логарифмической зависимостью между вертикальной нагрузкой и соответствующей ей вертикальной деформацией образца, с тем чтобы исключить влияние начальной пористости на сжимаемость. Быстрое сжатие проводилось в специальном приборе, основу которого составлял прибор ВСВ-25, со скоростью 16 мм/с до достижения деформации, рассчитанной по компрессионным испытаниям. По динамометру измерялось усилие, необходимое для получения заданной деформации. Число повторностей при каждом эксперименте принималось исходя из того, чтобы относительная ошибка среднего не превышала 10 % с вероятностью 0,95. Всего было выполнено 534 определения для песчаных грунтов и 92 для глинистых.

КОМПРЕССИОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ПЕСКОВ. Пески испытывались при максимальной и минимальной плотности и различной влажности (~0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0). Пылеватый песок дополнительно изучался при промежуточном значении объемной массы, так как при большой влажности песок значительно уплотнялся под весом штампа уже при сборке компрессионного одометра.

Компрессионные кривые для песков построены по средним значениям коэффициентов пористости. Для большинства образцов они имеют вид логарифмической зависимости между коэффициентом пористости и уплотняющим давлением во всем исследованном

интервале давлений. Однако есть и некоторые отклонения. Так, рыхлые пылеватые пески при увлажнении под действием малых давлений (0,05—0,1 МПа) дают несколько большую осадку, что объясняется легким отжатием воды из крупных пор.

Сухие пески, наоборот, при малых нагрузках (до 0,1 МПа) уплотняются слабо вследствие того, что низкая начальная пористость обуславливает большое трение между частицами. Поскольку коэффициент пористости e по отношению к уплотняющему давлению изменяется по логарифмическому закону, компрессионная кривая аппроксимировалась уравнением: $e_2 = e_1 - a_k \lg(P_2/P_1)$, где a_k — угловой коэффициент прямой, называемый коэффициентом компрессии. Поэтому в дальнейшем изучение сжимаемости образцов можно проводить, сравнивая значения коэффициентов a_k .

В целом коэффициент компрессии возрастает с ростом начального коэффициента пористости. Другими словами, для песков сходного минерального состава сжимаемость тем больше, чем выше начальная пористость. Сжимаемость песков зависит не только от уплотняющего давления и гранулометрического состава, но и от их исходной пористости. Для сухих песков между e_k (коэффициент пористости после компрессии до 1,0 МПа) и e_0 (начальный коэффициент пористости) существует прямая линейная связь. Следовательно, конечная пористость рыхлых песков, несмотря на большее значение коэффициента компрессии a_k , остается более высокой по сравнению с плотными песками при уплотнении одной и той же компрессионной нагрузкой. Влияние увлажнения не менее существенно, чем влияние начальной пористости.

Коэффициент компрессии, при прочих равных условиях, возрастает при увлажнении песков, что обусловлено уменьшением трения между частицами и, как следствие этого, облегчением их перемещения друг относительно друга при уплотнении. Однако эти различия менее существенны по отношению к тем, которые вызваны начальной пористостью.

КОМПРЕССИОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ. Компрессионные кривые глин естественного сложения и нарушенной структуры практически совпадают, что свидетельствует об отсутствии жестких структурных связей. У пылеватых суглинков жесткие структурные связи имеются, хотя их роль невелика. На компрессионных кривых образцов с естественным сложением наблюдается перегиб, соответствующий природному давлению 0,1 МПа, поскольку образцы были отобраны на глубине 5,0—5,5 м.

За точкой, соответствующей $P_{пр}$, наблюдается логарифмическая зависимость между уплотняющим давлением и коэффициентом пористости. По сравнению с песками коэффициент компрессии глинистых образцов в 5—10 раз выше. При тех же значениях уплотняющего давления они достигают меньшей пористости, что обусловлено меньшим трением между частицами из-за присутствия пленок связанной воды на их поверхности.

Установлена обратная связь между пористостью песков (не-

зависимо от их гранулометрического состава) и их относительной упругой деформацией и слабое влияние влажности на эту зависимость. Исключение составляют увлажненные пылеватые пески максимальной плотности, для которых с увеличением влажности упругая деформация существенно возрастает.

Быстрое сжатие. В соответствии с условиями экспериментов и данными, полученными по компрессионным кривым, были выбраны значения деформаций для опытов с быстрым сжатием. Для пылеватых песков они составили 0,40 мм, для среднезернистых — 0,26 мм.

Для пылеватых суглинков быстрое сжатие проводилось при всех деформациях, соответствующих ступеням компрессионных нагрузок. Быстрое сжатие глин удалось провести только при деформациях, соответствующих 0,2 МПа при компрессии, так как для достижения больших деформаций при быстром сжатии требовались нагрузки, превышающие возможности прибора.

Быстрое сжатие песков. Результаты быстрого сжатия песков показали следующее. Графические зависимости вертикального усилия от степени влажности различны для разных типов песков, но сходны для разных плотностей в пределах одного типа. Для среднезернистых песков зависимость имеет вид параболы с минимумом при степени влажности $G=0,4-0,5$, а для пылеватых песков максимальной и промежуточной плотности — параболы с максимумом при $G=0,2$ и местным минимумом при $G=0,1$.

Параболическая зависимость при быстром сжатии среднезернистых песков объясняется тем, что при увлажнении до $G=0,4-0,5$ снижается трение между частицами и тем самым облегчается уплотнение песков. Дальнейшее увеличение влажности приводит к тому, что при быстром сжатии вода не успевает отфильтроваться из пор и возникает поровое давление, которое увеличивает усилие, необходимое для достижения заданной деформации. При большой влажности часть воды вообще не может быть отжата из-за наличия замкнутых пор. При ступенчатом же нагружении поровое давление успевает рассеяться, и зависимость принимает вид, описанный выше. Более интересен тот факт, что при $G < 0,7$ для получения одной и той же деформации требуется большая компрессионная нагрузка по сравнению с быстрым сжатием. Одна из возможных причин этого явления заключается в том, что при быстром сжатии с некоторых контактов между частицами не успевают удаляться прослойки воздуха и частично прослойки воды. Воздух, сжимаясь, практически полностью снимает трение на данном контакте, уменьшая в целом усилие при быстром сжатии. По мере заполнения пор водой содержание воздуха уменьшается и возрастает роль порового давления.

Более сложный вид параболы для пылеватых песков обусловлен, по-видимому, тем, что в сухом состоянии глинистые частицы в виде пленок покрывают более крупные пылеватые и песчаные отдельные, образуя агрегаты. Поэтому P_b для среднезернистых и пылеватых песков при их одинаковой пористости равны.

При увлажнении агрегаты в пылеватых песках диспергируются, вследствие этого возрастает число контактов между частицами. Так как количество воды при $G=0,2$ невелико, значительная ее часть находится в связанном состоянии. Прочность на сдвиг связанной воды довольно велика. Все это способствует росту сопротивления деформации. При дальнейшем увлажнении появляется свободная вода, сдвиговая прочность которой значительно меньше (по сравнению со связанной водой) и значения P_b снижаются. Трудно объяснить отсутствие повышения P_b при степени влажности, близкой к единице, так как поровое давление в этом случае должно играть заметную роль. Можно предположить, что при быстром сжатии с током воды происходит вынос тонких частиц, однако это лишь частично объясняет отмеченный факт. В этом направлении необходимы дальнейшие исследования.

Другой факт, который в настоящее время не нашел объяснения, — это более высокое сопротивление пылеватого песка с промежуточными значениями плотности быстрому сжатию по сравнению с компрессионными нагрузками.

Быстрое сжатие глинистых грунтов. Компрессионная кривая и кривая быстрого сжатия пылеватых суглинков практически совпадают. Небольшое различие наблюдается лишь между образцами нарушенной структуры и естественного сложения. Для глины же, наоборот: усилие, необходимое для получения заданной деформации путем быстрого сжатия, примерно на порядок превышает компрессионную нагрузку. Последнее можно объяснить появлением высокого порового давления при быстром сжатии. Возникает вопрос, почему оно практически полностью отсутствует у пылеватого суглинка. Объяснить это явление можно следующим образом.

Пылеватый суглинок по составу кварцевый. Глинистые минералы присутствуют в нем в виде примеси и вследствие особой кристаллохимии поверхности обладают способностью связывать значительное количество воды. Глина же содержит много гидрослюды. Поэтому пылеватый суглинок легче отдает воду, уменьшая тем самым поровое давление по сравнению с глиной. Уменьшению порового давления способствует также меньшая водонасыщенность суглинка и его более легкий гранулометрический состав по сравнению с глиной (коэффициенты водонасыщения равны соответственно 0,81 и 0,91). В связи с этим особенно интересны опыты по компрессионному и быстрому сжатию глинистых грунтов различной влажности и минерального состава.

Анализ результатов быстрого сжатия песчаных и глинистых пород и их сопоставление с результатами компрессионных испытаний позволяет сделать следующие очень важные выводы:

— усилия, необходимые для получения заданной деформации путем быстрого сжатия находятся в параболической зависимости от степени влажности песков. Более сложный вид параболы имеют пылеватые пески;

— для получения одной и той же деформации при $G < 0,7$

требуется бóльшая компрессионная нагрузка по сравнению с быстрым сжатием.

Более высокое сопротивление быстрому сжатию пылеватого песка промежуточной плотности по сравнению с компрессией не нашло объяснения и требует проведения дальнейших исследований. Компрессионные кривые и кривые быстрого сжатия пылеватых суглинков практически совпадают. Для глин усилия при быстром сжатии почти на порядок превышают компрессионные ступени нагрузок, причиной этого можно считать кварцевый минеральный состав.

Установлена обратная связь между пористостью песков (независимо от их гранулометрического состава) и их относительной упругой деформацией и слабое влияние влажности на эту зависимость. Сопоставление показателей деформационных свойств, полученных стандартными методами (компрессионными испытаниями), с показателями, полученными методом, моделирующим работу грунта при вдавливании в него зонда (быстрым сжатием), проведенное для среднезернистых и пылеватых песков, пылеватых суглинков и глин, показало, что для среднезернистых песков при степени влажности менее 0,7 уплотнение происходит интенсивнее и, следовательно, переходный коэффициент к модулю деформации должен быть несколько выше. Для пылеватых суглинков любой влажности показатели, полученные обычными методами, практически совпадают. Для глин в исследуемых диапазонах влажности усилия при быстром сжатии на порядок превышают компрессионные ступени нагрузок, и, следовательно, значения модулей деформации получаются равными, что может быть объяснено высоким поровым давлением, развивающимся при быстром приложении нагрузки. Этим можно объяснить различный вид корреляционных зависимостей, полученных для пород различного состава.

Интерпретация результатов зондирования

Результаты зондирования, как правило, интерпретируются качественно и количественно.

ДЛЯ КАЧЕСТВЕННОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ используются только данные зондирования, без перевода их в другие величины (модуль деформации, плотность и др.). На практике по данным статического и динамического зондирования может быть решен целый ряд конкретных геологических задач. К ним относятся определение положения: 1) кровли коренных пород; 2) старичных отложений в толще аллювиальных песков; 3) плотных прослоев пород в массиве; 4) полостей в коренных глинах, образовавшихся в результате оползней и подвижек склонов; кроме того, могут быть проведены оценка видов пород по отношению R/T и оценка однородности пород в исследуемом разрезе.

ПРИ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ следует обратить особое внимание на возможное влияние удельного трения по

Таблица 11

Страна	Тип установки	Технические характеристики зондов						
		$R_{уд}, Н$	$H, м$	$d_z, мм$	$\alpha, градус$	$F_R, см^2$	$h_{бок}, см$	$F_{бок}, см^2$
<i>Динамическое зондирование</i>								
СССР	УБП-15М*	600	0,8	74	60	42	—	—
Болгария	Легкая	200	0,25	25	90	5	2,5	19,5
	Средняя	500	0,50	47,7	90	17	4,4	71,0
	Тяжелая	600	0,80	74	60	42	—	—
Польша	Легкая	100	0,5	35,6	60	10	3,6	39
	Тяжелая	650	0,75	50,5	60	20	5,1	80
<i>Статическое зондирование</i>								
СССР	С-979*	—	—	36	10	7,4	83	60
	С-832	—	—	36	10	31,0	350	60
Польша		—	—	35,6	10	10,0	113	60

*Установка не фиксирует влияния трения на значения удельного сопротивления зондированию.

боковой поверхности наконечника в случае, когда наконечник составляет целое с боковой поверхностью.

В табл. 11 сведены данные, характеризующие размеры и форму различных зондов. В тех случаях, когда конус зонда составляет целое с боковой поверхностью, в примечаниях к табл. 12 указано на возможность влияния ее на общий результат.

Это влияние может быть оценено для глинистых пород исходя из предположения, что при динамическом зондировании также, как и при статическом, $R/T=10,0$. Для песков это значение можно не учитывать, так как очевидно, что оно будет на порядок выше.

В качестве примера можно сопоставить форму зондов отечественных установок С-832 и С-979. У последней наконечник составляет целое с цилиндром, служащим его продолжением. Вследствие этого в одних и тех же глинистых породах данные удельного сопротивления пород конусу установки С-979 будут выше, чем установки С-832. Завышенные значения R будут давать и зонды со струнными датчиками.

В связи с тем, что методы интерпретации результатов динамического и статического зондирования, применяемые в СССР, освещены в работах [14, 15] и др., ниже более подробно приведены приемы интерпретации зарубежными авторами.

Интерпретация результатов динамического зондирования. Динамическое зондирование применяется в основном для определения свойств несвязных пород, а также ненасыщенных связных грунтов, в которых нет повышенного порового давления. Число ударов

может выражаться через энергию зондирования (Q_0, R_d, P_d) на единицу поперечного сечения наконечника:

$$Q_0 = \frac{WHN}{Al}, \quad (27)$$

где W — вес ударника; H — высота падения; N — число ударов; A — поперечное сечение зонда; l — осадка;

$$R_d = \frac{W^2HN}{Al(W+P)}, \quad (28)$$

где P — вес колонны штанг;

$$P_d = \frac{kWHjN}{Al}, \quad (29)$$

где k — коэффициент удара (0,49—0,63); j — коэффициент трения (0,6—1,0).

На показатель динамического зондирования могут оказывать влияние положение уровня грунтовых вод (УГВ), бытовое давление и длина штанг (гибкость). При $N < 15$ К. Терцаги рекомендует для мелких и пылеватых песков, находящихся ниже уровня грунтовых вод, применять формулу для определения скорректированного числа ударов $N' = 15 + 0,5(N - 15)$. Для связных грунтов

$$N' = N[0,5 + D_w/(D + B)], \quad (30)$$

где D_w — глубина УГВ от поверхности; D — глубина заложения фундамента; B — ширина фундамента.

Ниже приводятся некоторые корреляционные связи между показателями динамического зондирования и свойств пород.

В Болгарии связь между показателем динамической пенетрации и модулем сжатия E (одометр), а также модулем общей деформации E_0 (штамп 5000 см²) выражается следующими соотношениями

Грунт	E	E_0
Песок		
гравелистый	$8N_{10} - 9$	$2N_{10} + 2$
среднезернистый	$6,5N_{10} + 3,5$	$2N_{10} - 12$
глинистый (супесь)	$6,7N_{10} - 24$	$11N_{10} - 80$
Суглинок	$4,3N_{10} - 27$	$11N_{10} - 88$
Глина	$4N_{10} - 11$	$9,5N_{10} - 50$

Связь между удельным сопротивлением статическому зондированию C_{hd} и показателем динамического зондирования N_{10} приведена ниже.

Глина
Песок

$2,4N_{10}-2$

глинистый пылеватый
пылеватый
среднезернистый
гравелистый

$2,7N_{10}-12$

$4,2N_{10}-10$

$4N_{10}+7$

$5N_{10}+10$

По мнению большинства исследователей, связь между показателями C_{hd} и N пропорциональная, а величина коэффициента связи зависит от вида породы. Реже встречается связь вида $C_{hd} = aN_{10} + b$ (где a и b — коэффициенты).

Динамическое зондирование применяется также для определения степени уплотнения и консистенции пород, оценки однородности пород, выявления кровли скальных пород и др.

Интерпретация результатов статического зондирования. Статическое зондирование используется для качественных и количественных оценок свойств пород. В первом случае оцениваются плотность несвязных и консистенция связных пород, мощность рыхлых отложений, положение кровли скальных пород, выбирается вид фундамента. Во втором случае могут быть определены: сопротивление недренированному срезу, сжимаемость (для связных пород); угол сдвига, модуль деформации (для несвязных пород); глубина забивки свай; предельная несущая способность фундаментов мелкого заложения и т. д.

На рис. 62 приведены графики интерпретации результатов статического зондирования относительно угла внутреннего трения.

Сопротивление при недренированном сдвиге C_u определяется по формулам вида

$$C_u = C_{hd}/M, \quad (31)$$

где M — коэффициент, колеблющийся от 10 до 40 (при $C_{hd} < 1,5$ МПа $M \approx 12$, при $C_{hd} \geq 50$ $M \approx 40$).

Модуль общей деформации E_S определяется по формулам $E_S = 1,5 C_{hd}$ при $C_{hd} > 3,0$ МПа; $E_S = 3 C_{hd}$ при $C_{hd} < 3,0$ МПа. Очевидно, что для использования приведенных зависимостей необходимо знать размер и форму наконечника, вид или разновидность породы, в которой проводились исследования. Используя приведенные выше сведения о влиянии размера, формы и угла заострения наконечника, можно в определенной степени скорректировать

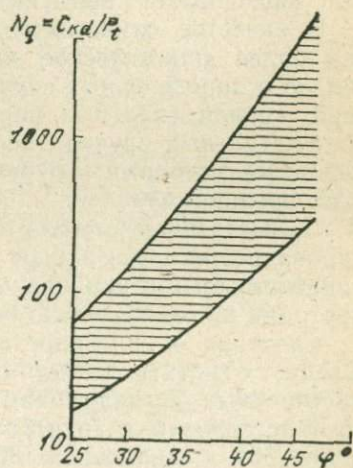


Рис. 62. График зависимости удельного сопротивления N_q от угла внутреннего трения φ

Характеристики уплотненности пород

Виды песков	Степень уплотнения песков		
	плотные	средней плотности	рыхлые

По коэффициенту пористости e

Гравелистые, крупные и средней крупности	$e < 0,55$	$0,55 \leq e < 0,7$	$e > 0,7$
Мелкие	$e < 0,6$	$0,6 \leq e < 0,75$	$e > 0,75$
Пылеватые	$e < 0,6$	$0,6 \leq e < 0,8$	$e > 0,8$

По сопротивлению погружения конуса p_q
(в МПа) при статическом зондировании

Средней крупности и крупные*	$p_q > 15,0$	$15,0 \geq p_q \geq 5,0$	$p_q < 5,0$
Мелкие*	$p_q > 12,0$	$12,0 \geq p_q \geq 4,0$	$p_q < 4,0$
Пылеватые:			
маловлажные и влажные	$p_q > 10,0$	$10,0 \geq p_q \geq 3,0$	$p_q < 3,0$
водонасыщенные	$p_q > 7,0$	$7,0 \geq p_q \geq 2,0$	$p_q < 2,0$

По условному динамическому сопротивлению p_d (в МПа)

Крупные и средней крупности*	$p_d > 12,5$	$12,5 \geq p_d \geq 3,5$	$p_d < 3,5$
мелкие	$p_d > 11,0$	$11,0 \geq p_d \geq 3,0$	$p_d < 3,0$
маловлажные и влажные	$p_d > 8,5$	$8,5 \geq p_d \geq 2,0$	$p_d < 2,0$
водонасыщенные	$p_d > 8,5$	$8,5 \geq p_d \geq 2,0$	$p_d < 2,0$
Пылеватые, маловлажные и влажные	$p_d > 8,5$	$8,5 \geq p_d \geq 2,0$	$p_d < 2,0$

* Полученные данные не зависят от влажности грунта.

эти зависимости применительно к своему оборудованию.

В качестве самостоятельных методов как статическое, так и тем более динамическое зондирование могут быть использованы только в определенных случаях (определение несущей способности свай, кровли скальных пород, выявление пустот в породах). Во всех остальных случаях необходимо комплексирование с другими полевыми методами и бурением (с последующими лабораторными исследованиями).

Отечественные стандарты на статическое и динамическое зондирование регламентируют получение показателей статического и динамического зондирования, а также некоторые приемы интерпретации их относительно показателей свойств пород.

Сведения об интерпретации имеются и в СНиПах (табл. 12). Следует отметить, что для определения плотности пылеватых водонасыщенных песков динамическое зондирование не допускается. Для исследования грунтов используется конус с углом при вершине 60° и диаметром 36 мм при статическом и 74 мм при динамическом зондировании.

Приемы интерпретации результатов пенетрационного каротажа

Многолетний опыт интерпретации результатов пенетрационного каротажа (ПК) позволил получить ряд зависимостей, связывающих показатели свойств пород с результатами ПК. Как известно, показатели свойств пород могут быть определены несколькими путями: 1) стандартными методами; 2) нестандартными методами, результаты которых путем нахождения зависимостей для определенных геологических условий связываются со стандартными; 3) расчетами; 4) комбинацией перечисленных способов.

Пенетрационный каротаж в большинстве случаев используется как комбинированный способ получения показателей свойств пород. Методы использования связи между показателями комплекса и стандартными методами для оценки показателей свойств пород применяются довольно часто. Такой подход к интерпретации результатов полевых методов широко используется как в отечественной практике, так и за рубежом. Многолетний опыт применения комплекса пенетрационного каротажа позволил найти пути оценки показателей свойств пород, особенно механических, по отдельным показателям комплекса.

Для оценки модуля деформации грунтов используется уравнение вида

$$E = \alpha R, \quad (32)$$

где α — коэффициент, зависящий от вида пород; R — удельное сопротивление породы. Для наконечника СПК-Т значение α составляет: для песков — 3,0; супесей — 3,6; суглинков — 5,5; глин — 7,0.

Для оценки вида пород по данным СПК-Т могут быть использованы зависимости, представленные ниже.

Грунт	T/R	ГК, Вт/кг · 10 ⁻⁴
Песок	0,008—0,021	< 1,4
Супесь	0,021—0,035	1,4—2,2
Суглинок	0,035—0,045	2,2—3,5
Глина	0,045—0,20	> 3,5

Что касается интерпретации результатов ГГК, ННК и ГК, то после соответствующей градуировки они позволяют получать значения объемной массы $\gamma_{об}$, объемной влажности $W_{об}$, а по ГК оценивается и вид пород.

Погрешности первых двух методов близки к гостированным и составляют соответственно $\Delta\gamma_{об} = \pm 0,03$ т/м³, $\Delta W_{об} = \pm 0,02$ (при $W_{об} < 0,3$) и $\pm 0,05$ (при $W_{об} > 0,3$).

По полученным с помощью пенетрационного каротажа данным можно определить целый ряд расчетных показателей. В частности, $\gamma_{ск} = \gamma_{об} - W_{об}$. Естественная влажность $W_e = W_{об} / (\gamma_{об} - W_{об})$. В случае, когда известна плотность пород, можно, используя дан-

ные пенетрационного каротажа, определить пористость n , коэффициент пористости e , коэффициент водонасыщения G и полную влагоемкость $W_{\text{п}}$:

$$\text{выше УГВ } n = 1 - \frac{\gamma_{\text{об}} - W_{\text{об}}}{\gamma_{\text{уд}}}; \quad (33)$$

$$e = \frac{\gamma_{\text{уд}} - \gamma_{\text{об}} + W_{\text{об}}}{\gamma_{\text{об}} - W_{\text{об}}}; \quad (34)$$

$$\text{ниже УГВ } n = W_{\text{об}}; \quad (35)$$

$$e = \frac{W_{\text{об}}}{1 - W_{\text{об}}}; \quad (36)$$

$$G = \frac{W_{\text{об}} \gamma_{\text{об}}}{1 - (\gamma_{\text{уд}} - \gamma_{\text{об}} + W_{\text{об}})}; \quad (37)$$

$$W_{\text{п}} = \frac{1}{\gamma_{\text{об}} - W_{\text{об}}} - \frac{1}{\gamma_{\text{уд}}}. \quad (38)$$

Комбинированный способ предполагает совместное использование всех приемов интерпретации. Он основан прежде всего на том, что практически все свойства пород зависят от состава и состояния, т. е. вида породы, пористости и влажности. Вид породы может быть определен по показателям I_{γ} и T/R , а пористость — расчетным путем, как указано выше. Влажность породы определяется непосредственно по данным нейтрон-нейтронного каротажа.

Имея в распоряжении указанные показатели и используя известные зависимости, можно оценить основные свойства пород. В первую очередь появляется возможность по этим данным и таблицам СНиП II-15—74 оценить механические характеристики пород E , σ , φ . Как известно, оценка просадочности лёссовых пород осуществляется по ряду косвенных критериев, приведенных в методических рекомендациях различных организаций: объемной массе $\gamma_{\text{об}}$, значению пористости n , естественной влажности W , степени водонасыщения G и др. Используя результаты пенетрационного каротажа и формулы, приведенные в табл. 13, можно получить прогноз просадочности пород на исследуемой территории.

Кроме указанных выше показателей свойств пород по данным пенетрационного каротажа может быть произведена общая оценка водопроницаемости исследуемых пород.

Как известно, одной из характеристик водопроницаемости горных пород служит коэффициент фильтрации $k_{\text{ф}}$. Он может быть оценен непосредственно опытным путем или по показателям, характеризующим состав и состояние породы, которые с помощью пенетрационного каротажа могут быть установлены с достаточной точностью. Ниже приведены общие соображения о путях решения этой задачи.

В целом методы оценки $k_{\text{ф}}$ по показателям состава и состояния делятся на несколько групп. К одной из них относится группа методов, базирующаяся на оценке $k_{\text{ф}}$ по виду породы. Эти данные приведены в табл. 14. Из них следует, что крайние значения $k_{\text{ф}}$

Признаки просадочности пород

Показатели просадочности	Признак просадочности	Методы определения
Плотность Пористость	$n = 1 - \frac{\rho - W_{об}}{\rho_S} > 0,42$	ГГК ГГК, ННК
Естественная влажность	$W = \frac{W_{об}}{\rho - W_{об}} < 0,18 - 0,2$	То же
Степень влажности	$G = \frac{W \rho_s}{e \rho_d} = \frac{W_{об} \rho_S}{\rho_W (\rho_S - \rho + W_{об})} \leq 0,6^*$	ГГК, ННК; ρ_S — лабораторный
Просадочность	$e = \frac{\rho_s - \rho + W_{об}}{\rho - W_{об}}; \quad e_L = \frac{W_L \rho_S}{\rho_W}$	ГГК, ННК; ρ_S и W_L — лабораторный
Уплотнение	$K = \frac{e_L}{e} \cdot \frac{W_L \rho_S (\rho - W_{об})}{\rho_S - \rho + W_{об}}$	То же
Критическая влажность	$\frac{W_{об}}{\rho - W_{об}} \leq 0,65 \frac{n - 0,3}{1 - n}$	ГГК, ННК — лабораторный
Уплотненность	$K_d = \frac{W_L - W_0}{I_p} = \left[W_L - \frac{\rho_S - \rho + W_{об}}{\rho_S (\rho - W_{об})} \right]; I_p > 0$	ρ_S, W_L, I_p — лабораторный

* По данным УкрГИПРОВОДХОЗа. $G=0,6-0,85$; КазГИИЗа $G=0,7-0,75$.

Зависимость значений k_{Φ} от вида породы

Порода	k_{Φ} , м/сут	
	по В. Д. Ломтадзе	по Н. Н. Маслову, М. Ф. Котову
Гравий, галька с песчаным наполнителем	100—300	50 и более
Песок:		
крупный	50—30	50
средней крупности	30—10	50
мелкий	10—2	5
глинистый (тонкозернистый)	2—0,1	—
Супесь	2—0,1	0,5
Суглинок	0,1—0,001	$5 \cdot 10^{-3}$
Глина	0,001	10^{-5}

для отдельных видов пород, определенные различными авторами, сопоставимы. В то же время градация k_{Φ} в зависимости от пористости пород отсутствует, хотя во всех эмпирических формулах, используемых для определения k_{Φ} по гранулометрическому составу, значение пористости фигурирует. В связи с этим можно предположить, что пористость пород входит в табличные значения k_{Φ} в скрытой форме. Диапазон размаха значений k_{Φ} для каждой разновидности пород, очевидно, объясняется изменением значений пористости и генезиса пород. Оценивая возможность ПК для определения k_{Φ} , можно считать, что при условии четкого выделения по данным T/R и ГК видов пород имеется возможность приближенно, но зато с большой детальностью по разрезу оценить k_{Φ} (табл. 15).

Расчленение разреза по диаграммам пенетрационного каротажа

Интерпретация результатов ПК включает в себя не только оценку количественных значений показателей свойств и нахождение связей между основными характеристиками пород, но и совместный анализ их с формой кривых в целях выделения видов пород и установления их границ.

Таблица 15

Зависимость значений k_{Φ} от показателя T/R

Порода	T/R	k_{Φ} , м/сут	Порода	T/R	k_{Φ} , м/сут
Пески	0,0015	50—5	Суглинки	0,025—0,04	0,1—0,001
Супеси	0,016—0,022	2—0,1	Глины	0,05	0,001

Для ГК и ННК переход, как правило, расположен в точке диаграммы, находящейся на $\frac{1}{3}$ разности величин записи в смежных слоях. При записи объемной массы пород положение кровли нижнего слоя, если его мощность не менее 40 см, находят по началу перегиба диаграммной кривой. Корректировка положения контактов выделенных слоев должна производиться по всем диаграммам комплекса.

При решении вопроса о положении границ при разделе инженерно-геологического элемента кроме приемов, обусловленных спецификой пенетрационно-каротажных методов, следует учитывать также факторы, рекомендуемые ГОСТ 20522—75.

ПРОВЕРКА ПРИ ПОМОЩИ СТАТИСТИЧЕСКИХ КРИТЕРИЕВ. Нормативные и расчетные значения показателей вычисляют после выделения инженерно-геологических элементов.

За единый инженерно-геологический элемент допускается принимать грунты, представленные часто сменяющимися тонкими (менее 20 см) слоями и линзами грунтов (различного номенклатурного вида). Слои и линзы, сложенные рыхлыми песками, глинистыми грунтами с консистенцией более 0,75 и заторфованными грунтами, рассматриваются как отдельные инженерно-геологические элементы независимо от их мощности.

При закономерном изменении показателей грунта по площади (в плане) или глубине инженерно-геологического элемента дальнейшее расчленение его не проводят, если коэффициент вариации закономерно изменяющегося показателя не превышает следующих величин: для коэффициентов пористости и влажности 0,15, для удельного лобового сопротивления и трения 0,30. Если коэффициенты вариации превышают эти величины, дальнейшее расчленение инженерно-геологического элемента проводят так, чтобы для вновь выделенных инженерно-геологических элементов эти коэффициенты не превышали указанных значений. Определение коэффициентов вариации производится в соответствии с ГОСТ 20522—75.

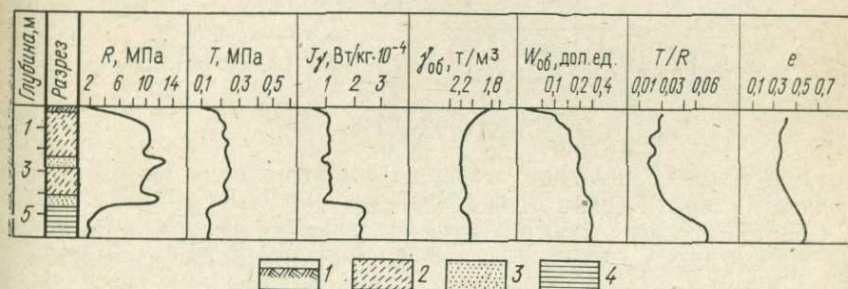


Рис. 63. Диаграммы пенетрационного каротажа.

1 — почва; 2 — супесь; 3 — песок; 4 — глина

Распределение значений R_i по глубине

Глубина h , м	R_i , МПа	$\bar{R} - R_i$, МПа	$(\bar{R} - R_i)^2$, МПа ²
0,5	8,3	1,9	3,61
0,75	9,8	0,4	0,16
1,00	10,1	0,1	0,01
1,25	10,7	0,5	0,25
1,50	10,2	0	0
1,75	10,5	0,3	0,09
2,00	9,8	0,4	0,16
2,25	10,0	0,2	0,04
2,50	12,8	2,6	6,76
2,75	10,9	0,7	0,49
3,00	10,3	0,1	0,01
3,25	9,9	0,9	0,09
3,50	9,7	0,5	0,25
3,75	9,2	1,0	1,00
4,00	9,9	0,3	0,09
4,25	11,0	0,8	0,64
Всего:	163,1	—	13,65

Расчленение инженерно-геологического элемента можно производить также на основе сравнения средних значений показателей грунтов вновь выделенных инженерно-геологических элементов.

В качестве примера рассмотрим статистическую обработку слоя грунта на глубине от 0,5 до 4,5 м (рис. 63). Слой грунта разбивается на интервалы по 25 см. Для каждого интервала выделяется среднее значение показателя (например, R_i). Эти значения, принимаемые за отдельные частные значения, записывают в таблицу (табл. 16).

Вычисляются \bar{R} и σ :

$$\bar{R} = \Sigma R_i / 16 = 10,2 \text{ МПа}; \quad (39)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{16} \sum_{i=1}^{16} (\bar{R} - R_i)^2} = \sqrt{\frac{1}{16} 13,65} \sqrt{0,85} = 0,92 \text{ МПа}, \quad (40)$$

где R — среднее значение лобового сопротивления по слою; σ — среднее квадратическое отклонение.

В пределах исследуемого слоя выделяются два пика на глубинах 2,50 и 4,25 м. В данном случае диаграмма ГК дает возможность трактовать эти пики как песчаные прослои, содержащие меньшее количество глинистых частиц по сравнению с вмещающей породой. В том случае, когда интерпретатор не может найти подтверждения по другим диаграммам, необходимо проверить вы-

Распределение значений R по глубине

Глубина h , м	R_i , МПа	$\bar{R} - R_i$, МПа	$(\bar{R} - R_i)^2$, Мпа ²
0,50	8,3	1,62	2,62
0,75	9,8	0,12	0,014
1,00	10,1	0,18	0,032
1,25	10,7	0,78	0,61
1,50	10,2	0,28	0,078
1,75	10,5	0,58	0,34
2,00	9,8	0,12	0,014
2,25	10,0	0,08	0,00064
Всего:	79,4	—	3,71

деленные значения на принадлежность к рассматриваемой совокупности. Проверку производим согласно ГОСТ 20522—75. Критерий v для 16 определений равен 2,67 (прил. 1 к ГОСТ 20522—75):

$$\text{для } h = 2,5 \text{ м } (\bar{R} - R_{2,5}) = 2,6 > 2,46;$$

$$\text{для } h = 4,25 \text{ м } (\bar{R} - R_{4,25}) = 0,8 < 2,46.$$

Таким образом, результаты проверки позволяют выделить в отдельный слой интервал на глубине около $h = 2,5$. Поэтому рассмотренный слой распадается на три части, по каждой из них подсчитываются средние значения и другие статические параметры совокупностей (в табл. 17 дан пример для слоя 0,5—2,25 м).

Среднее значение рассматриваемого показателя, его среднеквадратическое отклонение и коэффициент изменчивости определяются по следующим формулам:

$$\bar{R} = \frac{1}{n} \sum_1^8; \quad R_i = \frac{79,4}{8} = 9,92 \text{ МПа}; \quad (41)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_1^n (\bar{R} - R_i)^2} = \sqrt{\frac{3,71}{7}} = \sqrt{0,53} = 0,73; \quad (42)$$

$$v = \frac{\sigma}{\bar{R}} = \frac{0,73}{9,92} = 0,073 < 0,3. \quad (43)$$

Следовательно, коэффициент вариации не превышает величин, допускаемых ГОСТом для инженерно-геологического элемента.

Для расчета среднего значения показателя и его дисперсии в пределах выделенного инженерно-геологического элемента желательно применять графоаналитические методы. По участку, выделенному в интервале границами рассматриваемого элемента высотой h , подсчитывают площадь S_i , ограниченную слева нулевой

линией, а справа — линией диаграммы. Среднее значение показателя определяется из выражения $\bar{A} = S_i/h$. Затем в пределах интервала h проводят линию (в масштабе диаграммы), соответствующую вычисленному значению \bar{A} , и определяют площадь участка S_θ , заключенного между линией \bar{A} и диаграммой, находящейся справа от нее.

Среднее абсолютное отклонение показателя от среднего значения определяют из выражения $\theta = 2S_\theta/h$. При нормальном распределении приближенное значение среднего квадратического отклонения можно определить по формуле

$$\sigma = \theta\sqrt{\pi/2} = 1,253\theta. \quad (44)$$

Следующим этапом после определения среднего значения показателя и среднего квадратического отклонения является проверка существенности различия дисперсий и средних значений для двух соседних элементов, разделение которых вызывает сомнение. Для этого используют критерий Фишера F :

$$F = \sigma_{\max}^2/\sigma_{\min}^2 > F_{\text{табл}}, \quad (45)$$

где σ_{\max} — большая из двух сравниваемых дисперсий; σ_{\min} — меньшая.

По таблице из прил. 2 к ГОСТ 20522—75 в зависимости от надежности выводов P и чисел степеней свободы $K_1 = n_1 - 1$ и $K_2 = n_2 - 1$ проверяют полученное значение F . Если $F < F_{\text{табл}}$, то расхождение между дисперсиями несущественно. Проверка существенности различий средних значений \bar{A}_1 и \bar{A}_2 производится в соответствии с прил. 2 к ГОСТ 20522—75.

Если $|t| > t(P)$, то расхождение средних не случайно. В противном случае нет оснований считать расхождение значимым. Если проверка показывает несущественность различия между элементами, то их объединяют в один и вычисляют обобщенные показатели.

Для примера можно привести сравнение по критерию Фишера и средним значениям двух выделенных выше слоев в интервалах глубин 0,5—2,5 и 2,75—4,25 м. Первый слой имеет $R = 9,92$ МПа и $\sigma = 0,73$; второй — $R = 10,0$ МПа и $\sigma = 0,57$.

По критерию Фишера

$$F = \frac{\sigma_{\max}^2}{\sigma_{\min}^2} = \frac{0,73^2}{0,57^2} = \frac{0,53}{0,325} = 1,63. \quad (46)$$

Далее, по таблице прил. 2 ГОСТ 20522—75, считая $K_1 = 7$ и $K_2 = 5$, интерполируя, определяем критическое значение $F_{\text{табл}} = 5,4$ и $F = 1,63$, т. е. расхождение между дисперсиями несущественно.

$$t = \frac{\bar{R}_1 - \bar{R}_2}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}} = \frac{9,92 - 10,0}{\sqrt{\frac{0,73^2}{8} + \frac{0,57^2}{6}}} = 0,05 \ll 2,5. \quad (47)$$

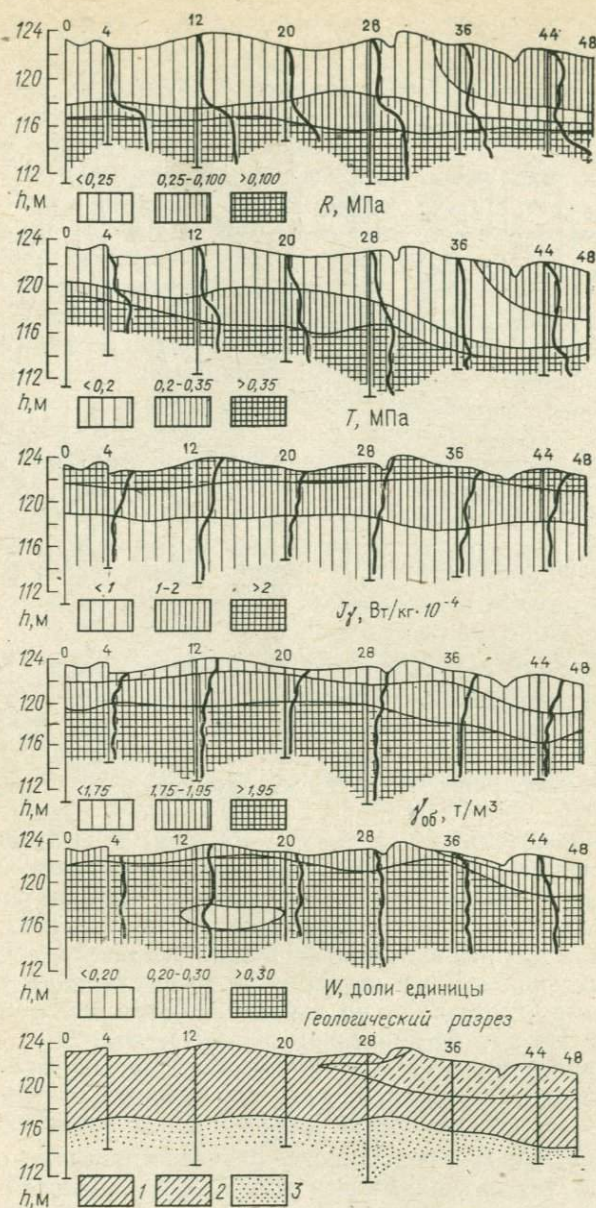


Рис. 64. Поля показателей свойств пород, полученные с помощью пенетрационного каротажа. Цифрами над условными знаками даны величины соответствующих показателей.

1 — суглинок; 2 — супесь; 3 — песок

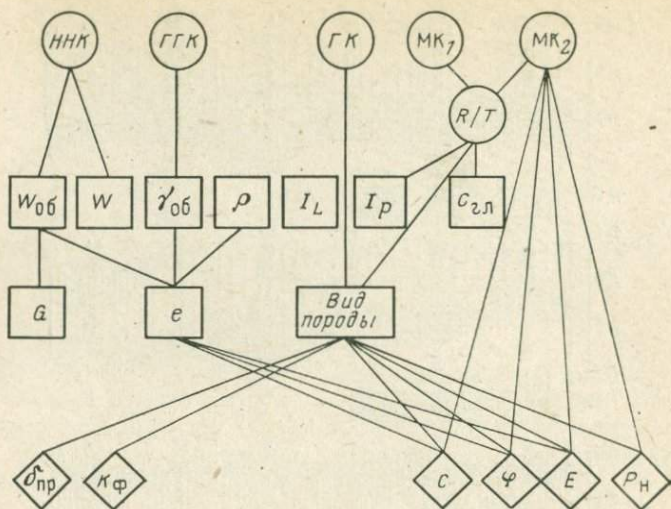


Рис. 65. Блок-схема определения показателей свойств пород по комплексу методов

Следовательно, сравнение средних значений также показывает несущественность их расхождения. Поэтому рассматриваемые слои можно считать одним слоем, имеющим включение в виде песчаного прослоя. Для окончательного подтверждения этого вывода необходимо провести такую же проверку по показателям ГК, e и T/R .

После окончательного решения вопроса о выделении слоев пород для оценки усредненных характеристик каждого слоя могут быть построены поля распределения соответствующих показателей свойств пород по исследуемому разрезу. С этой целью на разрез наносят линии равных значений данного показателя, соединяющие точки разных значений на диаграммах. Конфигурация этих линий определяет структуру поля по связям показателей и методов их определения. На рис. 64 приведены подобные поля.

Для интерпретации свойств пород наиболее важны совмещенные поля таких показателей, как отношение R/T (или удобнее T/R) и ГК с полем изменения коэффициента пористости e и I_V . Показатели T/R и I_V в большинстве случаев позволяют определить вид пород. В тех случаях, когда между ними имеются различия, предпочтение приходится отдавать показателю T/R (за исключением лёссов). Наложение на поле T/R и ГК поля со значением e в границах 0,45; 0,55; 0,65; 0,75; 0,85; 0,95; 1,05 позволяет выделить однородные свойства породы. При необходимости сюда же можно нанести и поле изменения влажности.

На рис. 65 приведена блок-схема определения показателей свойств пород по данным, получаемым с помощью пенетрационно-

каротажных станций, а также после дополнения комплекса методами термометрии, электрометрии, микроакустики.

В ряде организаций были разработаны программы по обработке результатов пенетрационного каротажа. Каждая из этих программ имеет свою специфику, отражающую направление работ в организации: в одном случае это чисто геологоразведочные работы, во втором — обоснование для строительства.

Назначение первой программы — расчет физико-механических свойств и выделение литологических слоев пород по данным пенетрационного каротажа. В результате использования этой программы получают следующие показатели: объемную массу скелета породы, весовую влажность, степень влажности, пористость, коэффициент пористости, показатели консистенции, отношение лобового сопротивления к удельному трению, положение границ пород и определение видов пород. Во второй программе к ним добавляются модуль деформации, сопротивление грунта под острием сваи и сопротивление трению боковой поверхности свай.

Для расчленения разреза на однородные слои по данным пенетрационного каротажа и сопоставления разрезов в двух опробованных точках решаются задачи по определению статистической однородности и выбору модели геологического объекта, проверке гипотезы о нормальности распределения исследуемых величин, определению корреляционных связей между исходными физико-механическими параметрами в пределах однородного слоя, выбору шага разрядки исходного материала.

Следует отметить, что, несмотря на то что упомянутые программы имеют очень высокое качество, необходимо их дальнейшее совершенствование, базирующееся на исследовании происходящих в породах процессов.

СОЧЕТАНИЕ МЕТОДОВ И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ В ПОЛЕВЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Сочетание полевых методов

Одной из первостепенных задач, стоящих перед организациями, проводящими изыскания, является разработка таких комплексов методов, которые, будучи реализованы в виде специальных технических средств, обеспечивали бы в конечном счете получение объективной стандартной максимально полной информации много-разового пользования, достаточной для проектирования объектов, расположенных в различных геолого-географических условиях.

Под понятием объективная информация подразумевается информация, получаемая и обрабатываемая преимущественно с помощью технических средств от ее сбора в природе до построения прогноза по специальным, научно обоснованным и проверенным на практике программам с заранее заданной чувствительностью метода к тем или иным нормированным показателям состава, состояния и свойств пород. В данном случае вопрос заключается в промышленных методах получения информации, являющейся результатом инженерно-геологических и гидрогеологических исследований.

Эта задача решается различными организациями по-разному. В подавляющем большинстве сочетание методов осуществляется путем объединения в один технологический цикл исследований, выполняемых последовательно или одновременно различными методами и техническими средствами, дополняющими друг друга. В этом случае для подбора методов и технических средств за основные факторы принимают их назначение, вид, класс и характер технологического процесса. И. В. Дудлер [7] подчеркивает важность очередности испытаний грунтов на ключевых участках и рекомендует следующую цепочку: сейсмоакустические методы; статическое и динамическое зондирование; радиоактивные методы исследования; проходка скважины и описание ее; испытание пород прессиометром, вращательным срезом, штампом; проходка шурфа и испытания полевыми методами в нем. Эта последовательность, как указывает автор, необходима для того, чтобы исключить возможность изменения напряженного состояния и нарушения структуры грунтов при испытании их очередными методами. С этой целью нужно соответствующим образом устанавливать и расстояние между точками испытаний грунтов разными методами. В качестве примера приведем изучение одного из объектов комплексом методов.

В процессе проведения инженерно-геологических изысканий при

гидротехническом строительстве на стадии технического проекта необходимо было оценить комплекс основных свойств грунтов при минимальных затратах средств и времени. Так, например, для песчаных грунтов в ряде случаев требуется определить их плотность, сжимаемость и динамическую устойчивость.

В связи с некоторыми недостатками лабораторных методов исследования песчаных грунтов (сложностью отбора образцов песка ненарушенной структуры ниже уровня грунтовых вод, сохранения естественных структурно-текстурных особенностей и напряженного состояния песков при перенесении их в лабораторные приборы и, как следствие, занижение расчетных показателей или недооценка последствий нарушения структуры песка), в последнее время все большее значение приобретают полевые методы исследования грунтов. К ним относятся испытания пробными нагружениями штампов, динамическим и статическим зондированием, вращательным срезом и ядерными методами.

Однако в связи с недостаточной разработкой теоретических основ отдельных методов, сложностью интерпретации результатов (для получения общепринятых расчетных показателей) или из-за трудоемкости работ и необходимости значительных затрат средств и времени на их осуществление многие полевые методы еще не получили широкого распространения. В частности, это связано и с попытками применять некоторые методы, например зондирование, для решения всех без исключения инженерно-геологических проблем независимо от вида грунта, что, естественно, не приводит к желаемым результатам.

По нашему мнению, для эффективного использования полевых методов необходимо, во-первых, для каждого метода установить четкие границы его применимости; во-вторых, определить оптимальное соотношение объемов работ, выполняемых этими методами, и, в-третьих, установить целесообразную очередность их применения.

Ниже приведен пример комплексного применения методов динамического и статического зондирования пробными нагружениями песков штампами и испытания их камуфлетными взрывами в соответствии с указанными принципами.

Характерной особенностью опытного участка являлось развитие в его пределах всех фаций аллювия: пойменного (маловлажные суглинки, супеси, мелкие и пылеватые пески), старичного (маловлажные и очень влажные пылеватые пески, супеси и мягкопластичные суглинки и глины), руслового (мелкие насыщенные водой пески).

Основным объектом изучения являлись пылеватые и мелкие пески с содержанием фракций 0,25—0,10 мм: для мелких песков 70—80 % и для пылеватых песков 50—60 %. Содержание частиц диаметром менее 0,1 мм составило 5—10 и 30—40 % соответственно. Пески кварцевые, зерна их окатаны. Уровень грунтовых вод в период исследований находился на глубине 0,5—5,0 м от поверхности участка.

Для опытных работ применялась установка УБП-15, укомплектованная стандартным зондировочным оборудованием (масса молота 60 кг, высота падения его 80 см, диаметр конуса с углом раскрытия 60° — 74 мм, диаметр штанг 42 мм при длине звеньев 1,4 м).

В подавляющем большинстве случаев зондирование производилось с поверхности участка без разбуривания скважин. Условным показателем плотности, прочности и сжимаемости песков служило число ударов молота N , необходимое для погружения зонда на 10 см и исправленное с учетом изменения массы зонда и сил трения его о песок с увеличением глубины зондирования.

Для статического зондирования использовался станок статического вдавливания зонда (конструкции Гидропроекта), погружение зонда в котором осуществлялось винтовым домкратом (максимальное осевое усилие 10 кН, диаметр наконечника зонда 35,7 мм при угле раскрытия 60° , диаметр штанг зонда 33,5 мм).

Станок закрепляется в пункте зондирования четырьмя анкерными сваями, завинчиваемыми в грунт. Аппаратура для регистрации усилия вдавливания зонда состояла из струнного динамометра, вмонтированного в нижнюю часть зонда, и центральной станции прослушивания ЦС-2.

Погружение зонда производилось под действием постоянно приложенной силы с одновременным измерением сопротивления грунта вдавливанию зонда. В большинстве случаев статическое зондирование осуществлялось до глубины 10 м с поверхности без разбуривания. Условным показателем прочности и сжимаемости грунта являлось его удельное сопротивление внедрению конуса R , определяемое по отношению общего усилия вдавливания к площади конуса и выражаемое в паскалях.

Испытания песков пробными нагружениями штампов выполнялись в шурфах сечением $1,5 \times 1,5$ м. Площадь квадратного штампа равнялась 5000 см^2 . Давление передавалось гидравлическим домкратом ступенями по 0,025 или 0,05 МПа. Осадки штампа фиксировались прогибомерами ПМ-3.

Испытания песков производились на глубине до 3 м при максимальном давлении на штамп, доходившем в ряде опытов до 0,7 МПа. В процессе проходки шурфов до отметки установки штампа и углубления их после окончания опыта через каждые 0,25—0,5 м по глубине шурфа режущим цилиндром объемом 1000 см^3 отбирались образцы песка для лабораторных исследований.

Некоторые результаты исследований

В пределах значительной площади изучаемого участка вначале было проведено массовое испытание песков динамическим зондированием. Глубина исследований грунтов достигала 20 м, а общий объем работ превысил 1500 м. Полученные данные позволили построить пенетрационные (зондировочные) профили по участку,

на котором оказалось возможным выделить отдельные горизонты, отличающиеся различной плотностью (прочностью).

По данным ударного зондирования был выбран ряд характерных пунктов, в которых затем было произведено контрольное статическое зондирование грунтов на глубину до 15 м. Общий объем этих работ составил около 200 м. Результаты статического зондирования подтвердили справедливость выделения указанных выше горизонтов.

Сопоставление результатов динамического и статического зондирования с данными бурения показало, что отмеченное расчленение грунтов по плотности (прочности) не только отражает особенности их состава, но и позволяет детализировать разрез в пределах выделенных литологических разностей с точки зрения различия их физико-механических свойств.

Таким образом, данными зондирования было установлено, что в пределах изучаемого участка пылеватые пески, слагающие верхнюю пяти—девятиметровую часть разреза, отличаются неоднородным распределением плотности (прочности), характеризующейся значениями $N=1-7$, а подстилающие их мелкие пески более прочны — для них получены значения $N>8$.

Указанное расчленение изучаемых грунтов по данным зондирования не только послужило основой для общей инженерно-геологической оценки участка, но и позволило выбрать наиболее характерные пункты для проходки шурфов и испытания песков пробными нагружениями штампов. Целью проведения этих испытаний было не только определение общепринятых характеристик плотности и сжимаемости, но и установление соответствующих градуировочных зависимостей, расшифровывающих результаты зондирования по всему участку в целом. В связи с этим в пунктах проходки шурфов и установки штампов по определенным схемам производилось динамическое и статическое зондирование.

Сопоставление данных зондирования с показателями плотности песков, определенной методом отбора образцов режущим цилиндром, производилось в пяти пунктах, в каждом из которых были пройдены шурфы глубиной до 4 м.

Предварительная обработка полученных материалов показала, что пылеватые пески при значениях $N<3$ находятся в рыхлом сложении ($\gamma_{ск}<1,45$ т/м³, $D<0,33$), при $N=3-8$ — обладают средней плотностью ($\gamma_{ск}=1,45-1,65$ т/м³, $D=0,33-0,66$). Мелкие пески при значениях $N>8$ характеризуются средней плотностью ($\gamma_{ск}=1,50-1,70$ т/м³, $D=0,33-0,66$).

Сопоставление данных динамического зондирования с результатами испытаний песков штампами производилось в шести пунктах, причем в первых трех штамп устанавливался на двух горизонтах шурфа (1,5 и 3,0 м), а в остальных — на одном горизонте (от 0 до 2,5 м). Большая часть опытов была выполнена в песках, гранулометрический состав которых позволяет отнести их к пылеватым или к мелким на грани с пылеватыми.

В результате обработки данных испытаний песков штампами

и динамическим зондированием была выявлена взаимосвязь этих показателей. Величины модуля общей деформации песка вычислены в интервале давления 0—0,3 Па. Сопротивление песков при забивке зонда определено как среднее для сжимаемой зоны под штампом, принятой равной удвоенной стороне штампа.

Между E и N в интервале значений N 3—6 существует достаточно четкая связь. Эти результаты подтверждают принципиальную возможность использования динамического зондирования для оценки сжимаемости песков.

Принимая во внимание, что указанный диапазон значений N характеризует пылеватые пески средней плотности, следует считать, что модуль их деформации изменяется в пределах от 10 до 60 МПа. Экстраполируя тарифовочный график, можно отметить также, что рыхлые пылеватые пески при значениях $N < 3$ обладают $E < 10$ МПа, а для мелких насыщенных водой песков при $N > 8$, по-видимому, $E \geq 60$ МПа.

Результаты проведенного в значительном объеме динамического зондирования, подтвержденные данными ограниченного числа испытаний грунтов статическим зондированием и бурением, позволили четко расчленить грунты изучаемого участка по физико-механическим свойствам и обоснованно выбрать контрольные пункты для проведения в малых объемах опытно-тарифовочных работ (проходка шурфов, испытание песков штампами). Последние дали возможность не только определить плотность, сжимаемость и динамическую устойчивость песков в опытных пунктах, но и оценить те же свойства песков для всего участка.

Часть в этот комплекс для оценки влажности и плотности пород на ключевых участках вводят ядерные методы испытания пород (ННК, ГГК).

При изучении крупных массивов (под мелиоративные работы) Н. Н. Шаропанов и Г. Я. Черняк [16] рекомендуют проводить прежде всего электроразведку методом сопротивлений на постоянном токе в различных модификациях, сейсморазведку методом, позволяющим однозначно определить глубину залегания уровня грунтовых вод. Однако сочетание только этих двух методов в большинстве случаев не позволяет проводить однозначное литологическое расчленение песчано-глинистого разреза, а также не дает информации о фильтрационных свойствах водонасыщенных пород зоны аэрации. Поэтому необходима проходка параметрических скважин с отбором образцов и испытанием пород в скважинах методами вызванной поляризации.

Эта схема применяется при сочетании полевых геофизических методов с комплексом аэрокосмических и других методов. Естественно, что неотъемлемой частью такого комплекса, точнее его основой, являются значительные объемы лабораторных исследований, связанные с выполнением горно-буровых работ и опробованием полевыми методами.

СОЧЕТАНИЕ ПЕНЕТРАЦИОННОГО КАРОТАЖА С ИСПЫТАНИЕМ ПОРОД ПРЕССИОМЕТРОМ. Как правило, испы-

тания прессиометром выполняются для определения величины модуля деформации при проектировании различных сооружений. Сочетание их с пенетрационным каротажем позволяет не только правильно выбрать места установки прессиометров, но и накопить материал, необходимый для интерпретации результатов пенетрационного каротажа относительно модуля деформации. Во ВСЕГИНГЕО эти работы ведутся с 1974 г.

Методика этих работ следующая.

На намеченной площадке производится пенетрационный каротаж в одной-трех точках, отстоящих друг от друга на расстояние не более 1,5 м. На расстоянии около 1,5 м от точек зондирования проходится скважина с помощью грунтоноса, вдавливаемого СПК-Т, в которой проводятся прессиометрические испытания. В опытах использовался электропневматический прессиометр ИГП-21.

Испытания проводились в соответствии с требованиями ГОСТ 20276—74 «Грунты. Метод полевого определения модуля деформации прессиометрии». Давление на грунт наращивалось ступенями по 0,05—0,1 МПа и доходило до 0,5—1,0 МПа. Расчет модуля деформации производился по формуле Лямэ.

Как известно, сопоставление значений модуля деформации, определенных штампами и прессиометрами, показывает, что значения модуля, определенные штампами, выше соответствующих значений, полученных прессиометрами. Поэтому рекомендуется вводить в значения прессиометрического модуля повышающие коэффициенты, которые у разных авторов различны и зависят от многих факторов, в том числе от глубины испытания, вида грунта и пористости. В ГОСТе рекомендуют определять корректирующий коэффициент по результатам сопоставительных параллельных испытаний данной разновидности грунта штампом и прессиометром. Так как у нас не было возможности проводить параллельно штамповые испытания, корректирующий коэффициент не вводился. Можно только отметить, что полученные с помощью прессиометра значения модуля деформации в большинстве случаев оказались меньше (в 1,2—2 раза) средних значений, указанных для этих грунтов в архивных и литературных источниках, а также определенных по таблицам СНиПа.

По диаграммам зондирования были вычислены средние значения R и T в интервалах опробования прессиометром. Соответствующие значения параллельных испытаний приведены в табл. 18.

В различных районах страны испытаниям были подвергнуты грунты различного вида, возраста и происхождения. Здесь супеси, суглинки и глины морских отложений Волгоградской области; лёссовидные суглинки и глины, неогеновые глины Крыма; элювиально-делювиальные глины Черноморского побережья Кавказа и Молдавии; флювиогляциальные пески и моренные суглинки и супеси Московской области, моренные отложения Литовской ССР.

Полученные результаты полевых испытаний использованы для

Данные, полученные СПК-Т и прессиометрией

Местоположение	Номер скважины	Глубина, м	R, МПа	T, МПа	RT, МПа ²	R/T	E _{пр} , МПа	$\alpha = E_{пр}/R$	E _{расч} , МПа	Вид грунта
Волгоградская обл.	1	2,40—2,90	6,3	0,19	1,20	33	16,4	2,6	36,5	Супесь
	1	3,45—3,95	1,3	0,094	0,122	14	5,8	4,5	12,5	Суглинок
	2	2,30—2,80	3,8	0,169	0,64	22	25,8	6,8	28,1	Супесь
	2	3,30—3,80	3,0	0,115	0,34	26	20,0	6,7	20,1	Суглинок
	3	1,30—1,80	10,8	0,307	3,32	35	78,4	7,2	61,6	»
	3	2,30—2,80	12,4	0,400	4,96	31	90,0	7,3	75,6	»
	4	1,30—1,80	5,2	0,162	0,84	32	21,5	4,1	31,2	»
	4	2,30—3,80	4,7	0,116	0,545	40	29,2	6,2	24,9	Супесь
	4	3,30—3,80	4,0	0,103	0,41	39	21,6	5,4	21,2	»
	5	1,30—1,80	8,0	0,285	2,28	28	54,5	6,8	51,2	Глина
	5	2,30—2,80	3,8	0,113	0,43	34	22,1	5,8	22,0	»
	5	1,80—2,30	6,3	0,061	0,38	103	6,9	1,1	19,5	Песок
	5	2,40—2,90	1,2	0,078	0,09	15	7,0	5,2	11,1	Суглинок
	5	4,30—4,80	3,0	0,125	0,38	24	9,8	3,3	21,0	Супесь
	Новый Афон	1	1,23—1,73	0,8	0,076	0,06	10	4,7	5,9	9,3
2		2,30—2,80	0,4	0,078	0,03	5	11,9	29,8	6,9	»
3		1,30—1,80	0,8	0,116	0,09	7	40,0	50,0	11,5	»
4		1,30—1,80	0,9	0,113	0,10	8	1,2	1,3	11,9	»
5		0,90—1,40	0,2	0,067	0,01	3	1,9	9,5	4,6	»
Крым	1	1,05—1,35	8,5	0,34	2,89	25	30	3,5	58,7	Суглинок
	1	2,35—2,65	11,2	0,44	4,93	25	86	7,7	78,0	»
	1	3,85—4,15	7,2	0,43	3,10	17	60	8,3	61,3	»
	2	1,45—1,75	9,0	0,30	2,70	30	30	3,3	56,0	»
	2	2,65—2,95	7,1	0,46	3,27	15	44	6,2	65,4	»
	2	3,85—4,15	4,2	0,32	1,34	13	35	8,4	41,5	»
	3	1,45—1,75	11,4	0,31	3,55	37	42	3,7	62,5	»
		3	4,85—5,15	5,8	0,43	2,50	14	35	6,1	55,7
	4	1,50—1,80	6,2	0,46	2,85	14	44	7,1	59,4	Глина
	4	2,85—3,15	5,6	0,42	2,30	13	41	7,3	55,4	»
	5	1,65—1,95	5,4	0,44	2,37	12	46	8,5	56,1	»
	5	3,65—3,95	3,5	0,24	0,84	15	31	8,9	32,2	»
	6	2,05—2,35	7,4	0,48	3,55	15	36	4,9	68,0	Суглинок
	6	3,35—3,65	7,6	0,52	3,95	15	46	6,1	69,8	»
	6	4,45—4,75	4,0	0,36	1,44	11	23	5,8	43,6	»
	7	4,85—5,15	5,2	0,31	1,61	17	49	9,4	44,8	»
Московская обл.	1	1,85—2,15	9,3	0,09	0,84	103	10	1,12	27,9	Песок
	2	1,35—1,65	2,3	0,15	0,35	15	3	1,3	21,1	Суглинок
	3	1,15—1,45	2,6	0,14	0,36	19	12	4,6	20,8	Супесь
Молдавская ССР	1	1,85—2,15	2,0	0,09	0,18	22	3	1,5	14,8	Глина
	2	1,85—2,15	0,4	0,20	0,08	2	5	12,5	11,6	»
Литовская ССР	1	1,35—1,65	6,4	0,08	0,512	80	10,7	1,7	22,4	Песок
	2	1,35—1,65	8,9	0,10	0,89	89	7,5	0,8	29,3	»
	3	0,85—1,15	1,2	0,09	0,11	13	3,8	3,2	11,8	Глина
	4	3,65—3,95	5,4	0,26	1,41	21	32,5	6,0	41,1	Суглинок
	5	2,65—2,95	6,9	0,32	2,21	22	34,4	5,0	51,0	»
	6	1,65—1,95	4,2	0,14	0,59	30	17,5	4,2	26,0	»
	7	3,85—4,15	4,0	0,12	0,48	33	31,2	7,8	23,3	Супесь
	8	2,65—2,95	2,3	0,08	0,18	29	25,3	11,0	14,5	Глина
	9	1,75—2,05	2,8	0,12	0,34	23	15,7	5,6	20,1	»
	10	2,35—2,65	13,5	0,16	2,16	84	15,6	1,2	45,9	Песок
	11	1,35—1,65	6,4	0,08	0,51	80	6,3	1,0	22,4	»
	12	1,95—2,25	6,8	0,10	0,68	68	9,8	1,4	26,5	»
	13	2,65—2,95	8,3	0,07	0,58	118	10,4	1,3	23,3	»
	14	1,65—1,95	6,5	0,07	0,45	93	13,7	2,1	21,5	»
	15	0,95—1,25	3,8	0,09	0,34	42	8,3	2,2	19,4	»
	16	2,85—3,15	7,3	0,06	0,44	123	4,6	0,6	20,4	»
	17	1,85—2,15	8,1	0,07	0,57	116	7,7	1,0	22,6	»
	18	2,35—2,65	2,6	0,07	0,26	37	14,5	5,6	14,3	Суглинок
	19	1,35—1,65	1,4	0,09	0,13	16	5,6	4,0	12,5	»
	20	2,55—2,85	1,0	0,07	0,07	14	8,8	8,8	9,6	»
	21	1,55—1,85	1,5	0,06	0,09	25	7,5	5,0	10,2	»

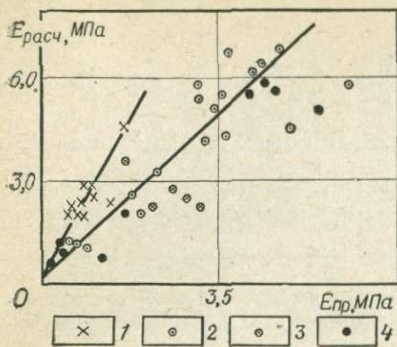


Рис. 66. График зависимости E от R и T для:
 1 — песка; 2 — суглинка; 3 — супеси; 4 — глины

проверки и уточнения зависимости между модулем деформации E и показателями статического зондирования R и T .

Как известно, удельное лобовое сопротивление R связано с модулем деформации грунта прямой зависимостью $E = aR$. Коэффициент a зависит в первую очередь от глинистости пород и может аппроксимироваться в виде $a = nC^a$. Кроме того, совершенно определено установлено, что глинистость C связана с показателем R/T . В конечном счете после замены глинистости показателем R/T первоначальное выражение модуля деформации принимает вид

$$E = \frac{43}{(R/T)^{0,52}} R.$$

На рис. 66 представлен график сопоставления значений модуля деформации, рассчитанных по формуле с величинами определенными с помощью пресснотрии. Несмотря на значительный разброс точек, в котором несомненную роль играют естественная неоднородность грунтов и ошибки испытаний, между $E_{расч}$ и $E_{прес}$ наблюдается достаточно тесная связь, коэффициент корреляции получается равным 0,78. Значения модуля деформации, определенные пресснотром, в большинстве случаев меньше расчетных (в глинистых грунтах в среднем в 1,43 раза, в песках — в 2,86 раза). В какой-то степени это может быть объяснено тем, что при обосновании расчетной формулы были использованы средние значения коэффициента a , определенные при штамповых испытаниях, при этом значение a должно быть в 1,5—3 раза больше, чем при определении пресснотромом.

Можно сделать вывод, что между параметрами статического зондирования R и T и модулем деформации грунтов E существует достаточно тесная зависимость. Окончательно установить характер и параметры расчетной формулы можно после накопления достаточного фактического материала по параллельным испытаниям различных грунтов статическим зондированием и с помощью опытных штампов.

Сочетание методов в морских условиях

Как правило, до начала детального проектирования, будь то буровая платформа или другой объект, производится сбор и анализ всех имеющихся материалов о верхнем слое разреза до глубины примерно 200 м, включая результаты каротажа в скважинах, про-

Объем подводного зондирования

Платформы	На исследуемом участке		На месте установки платформы	
	число буровых скважин	число пунктов СРТ	число буровых скважин	число пунктов СПТ
Экофиск	2	—	2	—
Берил А	5	12	1	2
Брент В	7	13	1	1
Брент D	4	30	1	8
Статф А	11	8	3	3
Фригг ТСП 2	4	9	1	3
Дуплин А	5	13	1	3

Примечания. СРТ — пенетрационное испытание конусом; СПТ — стандартные пенетрационные испытания.

буренных на нефть, сейсмоакустическую съемку, а также анализ региональных геологических и глубинных карт.

Исследования пород под буровые платформы обычно состоят исключительно из буровых работ с отбором проб и пенетрационных испытаний конусом (СРТ). На основе предварительной съемки выбирают наиболее подходящий участок размером 200×200 м. Под гравитационные платформы бурение производят на глубину, равную 1,5 диаметра основания платформы, под свайные платформы — на глубину погружения конца сваи плюс ширина свайной колонны.

В табл. 19 дается примерный объем исследований для семи гравитационных конструкций в Северном море [25].

До тех пор пока на буровых судах не удалось совместить бурение с пенетрационными испытаниями конусом, как правило, выполняли все пенетрационные испытания и только затем производили бурение. Созданные к 1978 г. технические средства («Визон») позволили чередовать отбор проб и пенетрационные испытания конусом (сокращая тем самым время на установку и анкерение судов), а также улучшить интерпретацию результатов испытаний.

В настоящее время имеется несколько установочных систем для работ в море. На разных стадиях исследований применяются различные системы. Сейсмическая съемка производится с использованием радиосистем по установленным на берегу станциям. При такой съемке на небольших глубинах устанавливаются три или четыре акустических передатчика, которые посылают сигналы приемникам на судне. Эта же система используется для последующих исследований участка и для окончательной установки платформы. Ее относительная точность ± 3 м на участке площадью свыше нескольких квадратных километров.

Большинство буровых судов во время съемки закрепляют на точке четырьмя или шестью анкерами. На одном комплекте анке-

ров буровое судно может обработать участок радиусом около 200 м на воде глубиной до 150 м в зависимости от направления ветра, мощности крепления и других факторов. Применение буровых судов с динамической стабилизацией экономичнее, но они сами и их обслуживание гораздо дороже.

При исследованиях в открытом море основные расходы приходятся на аренду судна. Поэтому очень важен выбор такого типа судов, которые отвечают времени года и виду планируемых исследований.

Суда, используемые для работ на море, подразделяются на три основные группы: мелкие (длиной 30—50 м, как правило, переоборудованные траулеры), используемые в основном для сейсмических съемок, пробоотбора трубками, т. е. для таких операций, которые не требуют закрепления судов анкерами; средние (длиной 40—60 м), снабженные в центре колодцем диаметром 60 см и четырьмя анкерами, не могут использовать оборудование типа «Сикалф» или «Стингрей» и выполняемые на них операции ограничиваются погодными условиями (высотой волны до 2,5 м); большие (длиной 70—100 м), представляющие собой сухогрузы, переоборудованные в буровые суда.

В качестве примера может служить «M/S Фердер», который имеет шесть анкеров с 2000 м тросов на отдельно управляемых лебедках. Время, необходимое на укрепление анкеров, составляет 2 ч. Максимальная глубина воды 180 м (1978 г.), максимальная глубина бурения 238 м ниже уровня дна моря. При закрепленных анкерах на данных судах можно работать при ветре силой 5—6 баллов. Почти все суда этой группы снабжены компенсаторами вертикального смещения судна, с максимальным смещением около 4 м. Потеря анкеров происходит крайне редко. Суда такого типа не имеют датчиков для измерения напряжения в анкерных кабелях.

Лучшим буровым судном для исследования донных отложений является «Али Амиров», используемый для буровых работ в Каспийском море. Оно имеет динамическую стабилизацию и работает по принципу отбора пробы с помощью шлангокабельного бурения *IFP*. Суда такого типа, как правило, оборудуются целым комплексом технических средств, позволяющих вести бурение, пенетрацию с помощью подводных установок, выполнять работу из подводного колокола и т. д.

В настоящее время в Северном море наиболее широко распространен метод пенетрационных испытаний конусом (СРТ).

Другие методы, такие как испытания прессиометром и каротаж буровых скважин, изучаются в целях их практического применения в открытом море.

ПЕНЕТРАЦИОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ КОНУСОМ. Используемые конусные пенетрометры имеют площадь поперечного сечения 10 см². При этом сопротивление конусу и боковое трение (на стакане с площадью боковой поверхности 150 см²) измеряются с помощью манометра. Применяются также пенетрометры с пло-

щадью поперечного сечения 5, 15, 20 и 40 см². Максимальная мощность конусных пенетрометров с площадью поперечного сечения 10 см² достигает 150 кН. Такая мощность необходима из-за высокого сопротивления конусу, наблюдаемого в плотных песчаных отложениях. Поскольку эти же пенетрометры используются для измерения сопротивления в мягких глинах, чувствительность их может оказаться недостаточной.

Фирмой «Фугро-Кеско» была разработана подводная пенетрационная установка, известная под названием «Стингрей», нашедшая в настоящее время широкое применение. В своей современной форме установка «Стингрей» показана на рис. 31. «Стингрей» состоит из домкратного устройства, опускаемого на дно моря, которое позволяет захватывать штангу в любом месте и передвигать ее вверх и вниз на 1 м посредством дистанционного управления, при максимальной нагрузке 100 кН. Пенетrometer с помощью специальных зажимов захватывается и вдавливается с забоя предварительно пробуренной скважины. Усилие пенетрации 200 кН создается гидравлически. Управляется она с судна, а реактивная сила компенсируется ее собственным весом. При благоприятных условиях за 24 ч зондирование выполняется примерно в 11 смежных точках до глубины 15 м.

Для пенетрации на общую глубину до 450 м фирма «Фугро-Кеско» разработала приспособление «Визон» (см. рис. 32), которое выдавливается из нижнего конца буровой штанги. Возможности этого приспособления ограничивались усилием подачи и небольшой глубиной пенетрации. Намечено преодолеть эти ограничения при разработке нового приспособления, у которого анкерная колонна штанг будет закрепляться за стенки буровой скважины. Недостатком установки «Визон» является то, что до начала пенетрационного испытания конусом штангу нужно вдавливать на определенную глубину.

В отдельных случаях применяются: водолазный колокол, с помощью которого можно проводить пенетрационные испытания конусом и непрерывный пробоотбор, прессиометрия в обычном варианте или подводный самозабуривающийся прессиометр.

Для исследования грунта дна моря используется также каротаж буровых скважин (естественный гамма-фон в целях классификации грунтов, нейтрон-нейтронный каротаж для определения пористости грунта, гамма-каротаж для определения объемной массы грунта).

Как и при работах на суше, при морских исследованиях роль лабораторных исследований очень высока. При этом исследования делятся на выполняемые на борту судна и на берегу.

БОРТОВЫЕ ЛАБОРАТОРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ. Полевая лаборатория, в которой пробы грунта можно обезвоживать, классифицировать, испытывать и уплотнять, требуется на судне по нескольким причинам: 1) непрерывная регистрация грунтовых условий важна для правильной корректировки программы пробоотбора и бурения; 2) из-за несовершенства используемых способов отбора

проб и сложных условий работы качество проб должно постоянно контролироваться. При их низком качестве может возникнуть серьезное искажение информации по глубине скважины; 3) бортовая лаборатория должна гарантировать быстрый и правильный анализ, так как качество лабораторной работы на берегу зависит от правильного описания и обработки образцов грунта на борту.

Процесс бортовой обработки проб следующий.

Пробу породы сразу после поступления в лабораторию прессуют, чтобы визуально оценить и принять решение, продолжать ли бурение или отбирать повторную пробу. Затем пробу описывают и решают, какие части ее испытывать на берегу, а какие — на борту. Образцы, предназначенные для испытания на берегу, упаковывают и консервируют. Остальной грунтовой материал помещают в пластиковые мешки и маркируют. Если из одного и того же слоя грунта взято значительное количество проб, то некоторые из них можно оставлять в пробоотборной трубе для прессования на берегу после тщательной очистки от бурового раствора.

В лаборатории на берегу пробы подвергают специальным исследованиям. Здесь кроме обычных классификационных испытаний иногда проводят исследования на содержание органического вещества, на обогащение, минералогические исследования, способность катионного обмена, анализ порового раствора (на Na, K, Mg, Ca, Cl, SO₄), на фораминиферную биостратиграфию, определение возраста ¹⁴C. Кроме того, оценивается водопроницаемость, проводится испытание на трехосное сжатие.

Таким образом, в морских условиях так же, как и при работах на суше, комплексирование методов и технических средств обеспечивает в первую очередь надежность и представительность получаемого материала. Невозможность использования полевых методов механических исследований свойств пород, слагающих морское дно (штампы, прессиометрия), в какой-то степени компенсируется бортовыми исследованиями и детальным изучением отобранных проб на берегу. Тем не менее, как указывалось выше, увязка полученных данных затруднена из-за недостаточной разработки технологии исследований.

Раздельное бурение и опробование породы конусом, а затем прессиометром или каротажными методами требуют длительного времени и не обеспечивают основных требований сочетания методов (единовременность опробования, идентичность объема исследуемой породы). Отсюда повторность операций и большие затраты времени и средств.

Кроме того, в комплексе могут быть использованы фотоустановки, позволяющие получать черно-белые или цветные снимки поверхности донных отложений, но для этого необходимо искусственное освещение. Значительное поглощение света ограничивает сферу охвата камерой полосой до 15 м.

Тяжелые пробоотборники. Наибольшее применение находят открытые или поршневые тяжелые пробоотборники. Их опускают на тросе и заглубляют в донный грунт под действием собственного

веса. Они снабжены взрывным механизмом, который определяет предварительную высоту свободного падения для пенетрации дна моря.

Диаметр трубы пробоотборника колеблется от 50 до 150 мм. Многие тяжелые пробоотборники снабжены пластичными вкладышами. В мягких глинах глубина вдавливания может достигать 6 м, однако в твердых глинах она составляет менее 1 м. Мягкие слои грунта могут при внедрении выдавливаться, и длина образца из-за этого меньше, чем глубина опробования. Нижний конец трубы пробоотборника снабжен кернорвателем, что вызывает нарушение грунта, но гарантирует извлечение пробы.

Виброкерноотборники и другие приспособления с дистанционным управлением. Виброкерноотборники применяют для крупнозернистых грунтов и твердых глин. Пробоотборный цилиндр вдавливается в грунт с помощью вибрации. Однако она вызывает нарушение грунта, и поэтому получать образцы из мягких грунтов этим способом может быть даже труднее, чем тяжелыми пробоотборниками. Проблемой при использовании виброкерноотборников является то, что их погружение занимает 20—30 мин, в течение которых судно должно оставаться строго на точке.

Сочетание методов на одной основе — способе проходки

В данном разделе речь идет о сочетании ряда экспресс-методов на базе одного метода, который одновременно является и способом проходки пород. Наиболее типичен для этого направления пенетрационный каротаж. Рассматривая его возможности для оценки показателей состава, состояния и свойств пород, отметим следующее. Как уже говорилось, пенетрационно-каротажный комплекс методов является полевым. Он включает в себя пять методов, позволяющих получать пять прямых показателей: объемную массу (ГГК), объемную влажность (ННК), естественный гамма-фон (ГК), удельное сопротивление породы внедрению наконечника зонда R и удельное трение по элементу трения T (тензодатчики).

Для характеристики вида пород используются методы ГК и T/R ; по отношению к оценке состава породы они оба косвенные. Первый больше характеризует химический состав, второй — гранулометрический. Обращает на себя внимание еще один фактор, влияющий на качество оценки показателя, — объем опробуемого грунта. Для ГК он измеряется сферой с радиусом 30—50 см. Для статического зондирования основные напряжения регистрируются наконечником в полусфере, расположенной непосредственно у зонда в радиусе 8—12 см.

Примерно в этом же объеме, но только в горизонтальной плоскости регистрируются напряжения, вызывающие трение пород по зонду. Отсюда и значения R/T условно можно отнести к полусфере с радиусом 10—15 см. Таким образом, объем породы, опробованной с помощью ГК, в 50 раз больше, чем T/R , так же, как, впрочем, и по сравнению с ГГК и ННК (для водонасыщенных

грунтов). Отсюда следует, что этот метод как бы выделяется из общей гаммы методов. Его результаты практически трудно сопоставлять с результатами других методов в том виде, в каком они есть. Для сопоставления необходимо взять их средние значения по всему объему ГК, что представляет значительные трудности. Частично это же относится и к методу ННК. Возвращаясь к оценке возможности применения методов ГК и T/R для определения состава пород, отметим, что предпочтительнее использовать метод T/R : во-первых, он относится к небольшому объему, а, следовательно, его разрешающая способность выше, во-вторых, он зависит практически только от содержания глинистой фракции породы.

Выполненные экспериментальные работы показывают перспективность использования показателей в комбинациях R и T для расчленения песка по крупности, а глинистых грунтов — по пластичности. И в том и в другом случае имеются материалы, подтверждающие эту возможность.

Говоря о составе пород, нельзя обойти вопросы, касающиеся пробоотборников, входящих в комплекты СПК-Т. Необходимо отметить, что они не полностью удовлетворяют требованиям, предъявляемым к ним в настоящее время. Желательно, чтобы пробоотборник был многосекционным и обеспечивал отбор пробы вместе с поровыми водами в процессе одного вдавливания и извлечения. Наличие такого пробоотборника обеспечивает в случае необходимости возможность отбора пробы породы. На данном этапе развития пенетрационно-каротажного комплекса для оценки состава пород вполне достаточно применения показателя T/R в сочетании с контрольным отбором образцов и определением вида породы по гранулометрическому составу или пластичности.

Группа показателей, определяющих состояние породы, наиболее полно может быть определена методом пенетрационного каротажа. Объемная масса и влажность определяются практически на уровне значений, данных в ГОСТах. Все остальные показатели группы — расчетные и поэтому довольно просто определяются (в том числе и консистенция, если известны границы пластичности). Исключение составляет плотность скелета породы. Пока она определяется только лабораторным способом, и в ближайшее время это положение, очевидно, не изменится. В группу показателей свойств пород входят несущая способность свай — сжимаемость, сдвиговые характеристики, фильтрационные, просадочные свойства пород и др. Как уже отмечалось, эти свойства можно оценить двумя путями: 1) непосредственно определением или косвенной оценкой показателя, обуславливающего свойства; 2) сопоставлением нескольких показателей, характеризующих состав и состояние исследуемых пород.

Как известно, только одно свойство — несущая способность свай — может быть определено прямо по результатам статического зондирования, а следовательно, и по результатам пенетрационного каротажа. Все остальные свойства можно оценить с помощью

пенетрационного каротажа по косвенным признакам или по показателям состава и состояния. Сжимаемость пород — модуль деформации — может быть оценена по косвенным показателям (удельному сопротивлению породы наконечнику зонда и удельному трению). Здесь следует отметить, что полученная по многочисленным данным устойчивая связь между E и R (с привлечением значений T) позволяет по данным каротажа определять непрерывно по глубине исследования значения модулей деформации пород. Оценка сжимаемости по этим данным вполне пригодна не только для построения полей сжимаемости пород при съемке, но и для оценки модуля деформации на отдельных стадиях проектирования. Контролировать модуль деформации, определенный по результатам зондирования, если это необходимо, следует прежде всего с помощью штампов или компрессионных испытаний (в ограниченных количествах). Кроме того, сжимаемость пород можно оценить по показателям состава и пористости, но для этого необходимо наличие определенного фактического материала. В этом отношении пенетрационно-каротажный комплекс очень удобен. Во-первых, показатель T/R дает возможность оценить вид породы, во-вторых, с помощью ГГК и НКК можно определить объемную массу и коэффициент пористости и, таким образом, используя таблицы СНиПа, установить механические характеристики пород. Комплексное использование этих показателей дает возможность взаимоконтролировать результаты пенетрационного каротажа и оценивать свойства с большой достоверностью.

Прочностные свойства пород могут быть оценены с помощью пенетрационно-каротажного комплекса двумя путями: косвенно (только для песков) по результатам статического зондирования или путем использования, как уже указывалось выше, показателей состава T/R , состояния и таблиц СНиПа. Здесь же следует отметить, что сложности в интерпретации сдвиговых показателей пород по данным полевых методов кроме всего прочего объясняются еще и тем, что сдвиг характеризуется двумя показателями φ и c , изменяющимися в зависимости от генезиса состава и состояния пород.

Просадочные свойства пород также могут быть оценены с помощью пенетрационно-каротажного комплекса. Усовершенствование этой методики будет сведено к выявлению наиболее чувствительных показателей и классификации в зависимости от вида породы и глинистости. К ним относятся в первую очередь объемная масса скелета, влажность естественная и на пределе текучести. Но и в настоящее время комплекс можно использовать для площадной оценки просадочности пород. Естественно, что на более детальных стадиях изысканий просадочность следует оценивать по имеющимся методикам лабораторных или полевых опытных работ. Но и в этом случае изменчивость показателя просадочности оценивается с привлечением результатов пенетрационного каротажа. Соотношение количества определений ПК и гостированных

методов обусловлено сложностью геологических условий и класса сооружений.

До настоящего времени попыток определения коэффициента фильтрации по данным пенетрационного каротажа не было. Правда, его результаты использовались для определения границ зоны промачивания пород при наливах в шурфы или котлованы, которая затем использовалась для расчета коэффициента фильтрации. Между тем физические основы для оценки коэффициентов фильтрации пород с помощью пенетрационно-каротажного комплекса имеются. Прежде всего это возможность определить показатели состава и состояния пород по данным СПК, которые непосредственно влияют на величину коэффициента фильтрации. Здесь мы лишь рассмотрим возможности комплекса в настоящее время и перспективные пути определения этого показателя. Основными показателями, влияющими на величину k_f , являются пористость и величина пор исследуемой породы.

Играет роль и однородность частиц, а отсюда однородность пор и их ориентация. Оба эти показателя, хотя и с разной степенью точности, могут быть определены с помощью пенетрационного каротажа. Пористость оценивается по данным радиоактивного каротажа, а вид породы — по данным T/R и ГК. Существующие таблицы позволяют по этим данным оценить порядок величины коэффициента фильтрации. Этот путь может быть реализован уже в настоящее время. Он позволяет оценивать фильтрационные свойства массива как в целом, так и по интервалам, в то время как обычно в разрезе выделяют довольно мощные обобщенные слои рыхлых, плотных или средних песков, суглинков, глин. Естественно, что такой подход приемлем только для общей обзорной оценки массива и выделения аномалий, что также немаловажно. При сочетании лабораторных методов и пенетрационного каротажа, как правило, используют точечные определения k_f с помощью трубок (типа Каменского) и сопоставляют результаты водопроницаемости с данными ПК. Говоря об определении k_f по данным откачек, следует иметь в виду, что k_f в этом случае будет характеризовать значительный объем разнородных пород, усреднение показателей плотности которых практически ограничено.

Оценивая методы пенетрационно-каротажного комплекса в целом по отношению к существующим методам определения свойств пород, следует отметить, что комплекс позволяет полно характеризовать показатели состояния пород, в первом приближении — состав и свойства пород. Дальнейшее совершенствование комплекса следует направить в первую очередь на совершенствование методов, определяющих показатели состава пород, и на уточнение связей между показателями свойств пород и первыми двумя группами показателей. Такой подход не противоречит тенденции введения в комплекс методов, позволяющих непосредственно в процессе пенетрационного каротажа оценивать в отдельных точках показатели свойств пород (датчик нормального давления, поровое давление и др.).

Сочетание различных методов для определения тех или иных показателей пород применяется в практике инженерно-геологических изысканий практически повседневно. Однако проблемы в разработке теоретических основ такого сочетания, а отсюда и сложности при оценке результатов комплексирования, не позволили до настоящего времени достаточно далеко продвинуться в этом вопросе.

Мы остановимся лишь на вопросе сочетания пенетрационного каротажа и смежных с ним комплексов — геофизических исследований, с одной стороны, и горно-буровых (и лабораторных) — с другой. Следует сразу же заметить, что, говоря о сочетании методов, мы подразумеваем в конечном счете комплексирование показателей, позволяющих нам получить с наименьшими затратами средств и времени поля свойств пород, необходимые для проектирования тех или иных мероприятий.

Прежде чем переходить к оценке возможностей сочетания пенетрационно-каротажного комплекса с другими видами работ, следует коротко остановиться на вопросе специфики результатов комплекса. В данном случае приходится иметь дело не с образцами породы, отобранными в скважине, или дискретными сведениями о них по разрезу, а с поступающей непрерывно по глубине проходки информацией о пяти показателях (ГГК, НК, ГК, R , T). Отличительной чертой пенетрационного каротажа по отношению к традиционным методам является именно то, что комплекс позволяет получать по глубине исследования непрерывную информацию об изменении конкретных показателей свойств пород.

При использовании всех методов комплекса получают картину изменчивости по нескольким показателям, характеризующим физические, механические и водные свойства исследуемых пород. Таким образом, пенетрационный каротаж позволяет оценить изменчивость свойств пород как по глубине исследования, так и в плане на очень детальном уровне.

В отличие от изменчивости, которую можно получить по результатам статического или динамического зондирования, а также по результатам геофизических исследований, которые являются в большинстве случаев комплексными показателями, результаты пенетрационного каротажа позволяют получить не какую-то общую изменчивость, зависящую от суммы многих показателей, а конкретную изменчивость показателей пород — влажности, сжимаемости, глинистости и т. д. Это качество пенетрационного каротажа используется пока не полностью. Между тем оно позволяет на новом, более высоком уровне подойти к решению многих традиционных задач.

Остановимся на одном из важнейших, на наш взгляд, вопросов применения любого метода вообще, и пенетрационного каротажа в частности. Это вопрос об определении места метода в общем комплексе изысканий. Место метода или комплекса методов, а также время его применения в общем комплексе изысканий должны регламентироваться в зависимости от его разрешающей

способности по отношению к показателям пород, экспрессности, стоимости единицы измерения, а также возможности обеспечения взаимосвязи по оценке одноименных показателей с предыдущими и последующими комплексами. В общем пенетрационный каротаж по перечисленным критериям по своей сути занимает промежуточное положение между площадными геофизическими методами исследования пород и практически точечными традиционными исследованиями грунтов, включающими горно-буровые работы и лабораторные испытания образцов пород.

С одной стороны, благодаря своей непрерывности он позволяет воссоздать пространственную картину общей инженерно-геологической ситуации исследуемого объекта и поэтому может быть относительно просто увязан с результатами геофизических исследований; а с другой — он позволяет в любой точке разреза получить ряд целых конкретных показателей свойств пород, которые могут быть соотнесены с результатами лабораторного опробования образцов пород.

Таким образом, появляется возможность более полно использовать возможности каждого из названных трех комплексов: 1) геофизического — для оценки ситуации выбора направлений и расстояний между пенетрационно-каротажными скважинами, а также распространения обратной информации, исходящей от пенетрационного каротажа и традиционных методов; 2) пенетрационного каротажа, позволяющего получать непосредственно в естественных условиях основные физико-механические показатели пород, скорректировать результаты лабораторных определений и передать их с помощью геофизических методов на большие площади; 3) традиционных методов, функции которых сводятся к контролю за показателями, не определяемыми двумя предыдущими комплексами. В соответствии с этим должна находиться и очередность проведения работ. Геофизические работы должны предшествовать пенетрационно-каротажным, а пенетрационно-каротажные — традиционным. Естественно, что конкретные задачи, а также сложность геологических условий накладывают отпечаток на сочетание этих комплексов, но в принципе такая очередность должна сохраняться.

Проведенные в октябре 1973 г. в г. Ташкенте и в 1975 г. в г. Симферополе школы передового опыта по применению пенетрационно-каротажных станций в общем комплексе инженерно-геологических работ показали, что в большинстве случаев пенетрационно-каротажные станции используются именно так, как об этом говорилось выше.

Используются и двухступенчатые варианты. Наиболее распространенные из них следующие: сочетание пенетрационного каротажа и геофизического комплекса, сочетание пенетрационного каротажа и традиционного комплекса.

В первом случае пенетрационный каротаж используется как основа, во втором случае — как несущий более детальную информацию, чем традиционные методы. Такое использование пенетра-

ционного каротажа позволяет получать максимальную эффективность как в геологическом, так и в экономическом отношении.

Говоря об эффективности в геологическом отношении, мы в большинстве случаев подразумеваем получение объема информации, превышающего традиционный. Она позволяет выбрать наиболее оптимальный вариант решения того или иного сооружения и, таким образом, удешевляет проектируемое сооружение. Естественно, что в момент проведения изысканий она не может быть оценена и подсчитана в качестве экономической эффективности.

Тенденция комплексирования нескольких методов исследования на базе одного зонда используется не только при выполнении пенетрационного каротажа, но и при создании геофизических комплексных скважинных каротажных зондов. Современный этап развития геофизических исследований в скважинах (ГИС) характеризуется комплексным использованием нескольких различных методов или их модификаций. Соответственно создаются новые способы и устройства для их осуществления. Как показывает анализ патентной литературы, число изобретений по комплексированию методов ГИС возрастает с каждым годом и, следовательно, именно это направление должно рассматриваться как одно из наиболее прогрессивных, определяющих техническую вооруженность отрасли в ближайшем будущем.

В табл. 20 приведены комплексы геофизических методов.

Варианты состава комплексов

Таблица 20

Вид каротажа	Частота использования метода, %	Использование методов в зондах, содержащих различное число первичных преобразователей					
		1	2	3	4	5	6
Акустический	50	2	11	6	—	1	1
Гамма	26	—	2	6	—	2	1
Нейтронный	26	2	4	5	—	—	—
Спротивление	21	—	4	3	—	1	1
Индукционный	16	1	4	1	—	1	—
Гамма-гамма	16	—	3	3	—	—	1
Электрический	16	—	3	3	—	1	—
Нейтронный-гамма	12	1	—	3	—	—	1
Радиоактивный	12	—	3	2	—	—	—
Ядерно-магнитный	10	—	2	2	—	—	—
Спектрометрический	7	1	1	1	—	—	—
Термический	5	—	—	—	—	1	1
Нейтрон-нейтронный	5	—	2	—	—	—	—
Кавернометрия скважин	5	—	1	1	—	1	—
Каротаж потенциалов самопроизвольной поляризации	5	—	—	1	—	1	—
Магнитный	2	—	—	—	—	1	—

Требования и основные правила сочетания полевых методов

Решение задач, связанных с комплексным применением полевых и лабораторных методов, а также способов исследования инженерно-геологических свойств пород является узловым моментом при выборе рациональной схемы для построения модели исследуемых объектов. При этом подразумевается, что время, необходимое для получения данных результатов, затраченные средства, а также объем информации должны быть увязаны между собой таким образом, чтобы они представляли оптимальный вариант по сравнению со всеми остальными комплексами.

Повседневная деятельность геологов производственных организаций, проводящих съемочные работы (гидрогеологическая, инженерно-геологическая или какая-либо другая съемка) различных масштабов, постоянно связана с сочетанием тех или иных технических средств, методов или их комплексов. В работах Н. В. Коломенского, И. С. Комарова, Г. К. Бондарижа, В. И. Ферронского и других исследователей можно найти общие оценки и рекомендации по ведению инженерно-геологических съемок, а также комплексированию.

Существующие в настоящее время схемы инженерно-геологических исследований основаны и довольно тесно увязаны с существующими техническими средствами, с помощью которых они осуществляются. Появление новых технических средств требует прежде всего найти им место среди уже имеющихся и увязать в методическом плане результаты, получаемые с их помощью, с общей схемой.

И. С. Комаров все методы наблюдений, применяемые при инженерно-геологических съемках рекомендует подразделять на аэрофотометоды и методы наземных исследований [2]. Он подчеркивает, что аэрометоды в отличие от наземных могут быть использованы независимо от проходимости исследуемого района в очень короткие сроки на обширных площадях. Обычно они дополняются разнообразными методами наземных исследований.

Отсюда формулируются следующие основные задачи, решаемые с их помощью: 1) определение информационных возможностей и пределов применимости отдельных частных методов исследований; 2) оценка точности и достоверности получаемой информации; 3) установление экономических показателей, характеризующих эффективность применения отдельных методов; 4) выработка рациональных форм сочетания отдельных методов.

Предложенные И. С. Комаровым принципы по сути являются основой научного подхода к комплексированию. Однако они требуют дальнейшей разработки методик для практического приложения этой схемы.

Место пенетрационного каротажа в общем следует считать определенным: он должен быть связующим звеном между площадными геофизическими методами и традиционными методами оценки

свойств пород, базирующимися на бурении, лабораторных исследований и полевых испытаниях грунтов. Поэтому мы и наблюдаем в настоящее время две разновидности использования ПК — в сочетании с геофизическими методами и в сочетании с бурением и лабораторными испытаниями. К этому же подводит нас работа Ю. Т. Филимонова, Л. А. Островского и др. [23], в которой отражена общая тенденция подхода к решению этой задачи. Так, для комплексной гидрогеологической и инженерно-геологической съемки масштаба 1 : 50 000 для целей мелиорации дается такое определение целевого назначения: детальное изучение гидрогеологических и инженерно-геологических условий с целью обоснования технического проекта мелиорации строительства, постановки разведочных работ для водоснабжения и определения перспективы на отдельных участках заложения наземных инженерных сооружений. К основным задачам, решаемым съемкой, они относят характеристику: 1) гидрогеологических и гидрохимических условий водоносной толщи; 2) гидрогеологических параметров водоносной толщи; 3) количественной взаимосвязи грунтов и поверхностных вод; 4) верховодки и условий ее формирования; 5) морфогенетических типов рельефа и их отдельных элементов; 6) физико-механических и водно-физических свойств пород, слагающих зону аэрации; 7) современных физико-геологических процессов и явлений; 8) режима подземных и поверхностных вод; а также детальное изучение и картирование водоносной толщи, залегающей до первых регионов или местного водоупора.

Основные методы и последовательность решения задач при этом рекомендовались следующие: дешифрирование аэрофотоснимков; комплекс геофизических методов ВЭЗ, ВЭЗ ВП, ЭП и сейсмика; ландшафтно-индикационный метод; пенетрационный каротаж; ядерно-физические методы; опорное бурение с гидрогеологическим опробованием; поисковое бурение с гидрогеологическим опробованием; картировочное бурение с инженерно-геологическим и гидрогеологическим опробованием; картировочные горные выработки в зоне аэрации с инженерно-геологическим опробованием; опытные навалы: режимные наблюдения.

Обращает на себя внимание также логика построения ряда последовательности методов: от методов пространственных к методам точечным. При этом имеется в виду, что каждый следующий метод несет информацию, которую не дают предыдущие методы и которая дополняет модель воссоздаваемого объекта. Однако при анализе схемы, при движении по этому ряду от общего к частному, затушевывается и общая оценка сложности исследуемого участка, характеризующая сложность исследуемого объекта в целом, поэтому возникает вопрос о разработке методики перехода от одного класса к другому, которая позволила бы дать общую оценку исследуемого объекта — его сложности, но не абстрактной сложности, а относительно следующего за ним метода. В качестве примера возьмем пенетрационный каротаж. Для этого рассмотрим ряд: геофизические методы — пенетрационный каротаж — бурение — от-

бор проб — лабораторные и полевые исследования пород. При этом не исключено, что более обобщенный метод может нести по отдельным показателям более точную информацию, чем последующий. Но в общем порядок расположения в ряду не меняется. При рассмотрении геофизических методов пенетрационного каротажа связь между этими комплексами будет обратной.

Однако не хватает какого-то звена, с помощью которого можно передавать информацию от одного комплекса к другому. Этим звеном должен быть один и тот же метод (в данном случае им может быть электрометрия или скорость звуковых колебаний), который фигурирует в том и другом комплексе. Это позволяет не только определить количественную сторону задачи, но и провести взаимокорректировку. Так, при введении метода электрометрии в комплекс пенетрационного каротажа при совместной работе комплексов значительно облегчится обоснование геоэлектрических основ для ВЭЗ. Это один из возможных путей комплексирования методов.

При введении в комплекс пенетрационного каротажа термометрии появляется возможность наземного обеспечения инфракрасной съемки. Важным является то положение, что в рассматриваемом ряду каждый предыдущий комплекс должен давать ответ на вопрос, с какой детальностью должен выполняться последующий комплекс; так, например, аэрофотосъемка должна позволять производить общую оценку геологической сложности территории применительно к геофизическим работам, а последние — давать густоту сети для пенетрационного каротажа.

Следует отметить, что связь между традиционными комплексами и пенетрационным каротажом настолько тесна, что трудно провести границу, которая бы четко делила комплексы на несущий и опорный. Принимая во внимание большую экспрессность пенетрационного каротажа и ограниченное число методов комплекса, несущим считается ПК.

При исследовании донных отложений громадную роль играют сейсмоакустические методы исследования пород. Отсюда следует, что в комплексе пенетрационного каротажа должен присутствовать аналогичный метод. Желательно также, что такие опорные методы использовались при лабораторных исследованиях пород, так как только этим путем можно получить достаточное количество данных для статистической обработки и смоделировать различные состояния пород.

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ПЕНЕТРАЦИОННОГО КАРОТАЖА

К настоящему времени накоплен значительный опыт применения сухопутных и подводных пенетрационно-каротажных станций в европейской части СССР, Среднеазиатских республиках и Казахстане. Начато опробование станций на крупнейших народно-хозяйственных объектах.

Опрос производственных организаций позволил сделать следующие выводы. Пенетрационно-каротажные станции применяются для решения таких задач, как: 1) крупномасштабные гидрогеологические, инженерно-геологические и мелиоративные съемки; 2) поиски и разведка строительных материалов; 3) исследование инженерно-геологических свойств пород в массиве; 4) изучение экзогенных геологических процессов с целью их прогнозирования (оползни, овраги) при разведке месторождений глин; 5) исследование грунтов как оснований зданий и сооружений; 6) контроль за состоянием плотин и противодиффузионных стенок; 7) исследование в ложах рекультивированных оврагов; 8) линейные изыскания, строительство дорог, газопроводов, теплопроводов, ЛЭП; 9) оценка проработанности пород в массиве; 10) изучение подтопления территорий; 11) оценка показателя несущей способности свай.

Пенетрационный каротаж применяется в рыхлых талых отложениях для исследования пород до глубины 30 м, а в отдельных случаях и до 50 м.

Ниже приведены средние значения глубин пенетрационного каротажа, достигнутых в различных районах СССР.

<i>Районы</i>	<i>Глубина, м</i>
Север Центра европейской части СССР	7,6
Белорусская ССР	9,8
Северное Поволжье	10,1
Юг Центра европейской части СССР	14,2
Молдавская и Украинская ССР	15,1
Южное Поволжье	16,3
Долины крупных рек Средней Азии и Казахстана	7,9
Предгорные и межгорные долины	8,8
Аллювиально-эоловые равнины	23,0

Ниже приведены три примера использования пенетрационного каротажа в комплексе инженерно-геологической съемки в Прибалтийских республиках, при исследовании донных отложений и комплексном исследовании вскрыши и верхних пластов угольных месторождений.

При инженерно-геологической съемке

Использование в процессе инженерно-геологической съемки пенетрационно-каротажного комплекса методов дает большую экономию времени и средств при достаточно высокой точности получаемых результатов. С помощью пенетрационного каротажа решаются следующие задачи: изучение геолого-литологического разреза и физико-механических свойств горных пород, оценка однородности и выдержанности свойств пород по разрезу.

Ниже приведен пример использования пенетрационного каротажа при инженерно-геологической съемке в Прибалтийских республиках (Литовской и Латвийской ССР).

Результаты работы СПК-Т в Литовской ССР

Район работ располагался в южной и юго-западной части республики. В географическом отношении основная часть территории принадлежит к Средне-Литовской низменности, а южная и юго-восточная часть территории — соответственно к юго-западной части Балтийской возвышенности и Южно-Литовской песчаной равнине.

Район относится к бассейну нижнего течения р. Нямунас и целиком входит в пределы распространения последнего оледенения, характеризуется преимущественно равнинным рельефом с отдельными невысокими грядами. В юго-западной части Балтийской возвышенности рельеф слабо- и среднехолмистый.

Преобладающие типы рельефа созданы аккумулятивной деятельностью ледника, его талых вод и денудационными процессами после освобождения территории от ледникового покрова. Наибольшая часть территории занята озерно-ледниковыми равнинами времени отступления ледника. В северной, северо-восточной и западной частях территории средне- и слабохолмистый рельеф обусловлен конечноморенными и флювиогляциальными образованиями. В послеледниковое время часть конечных морен была подвергнута эрозионной и аккумулятивной деятельности озерно-ледниковых вод. В результате этого формы рельефа были сглажены и приобрели плавные очертания. На остальной территории конечноморенные образования наблюдаются в виде полосы, протягивающейся на юго-восток. По долинам р. Нямунас и ее притоков прослеживаются комплекс террас и поймы.

В геологическом строении территории принимают участие отложения верхнечетвертичного и современного возраста. Верхнечетвертичные образования имеют повсеместное распространение; они представлены моренными флювиогляциальными и озерно-ледниковыми отложениями. Мощность верхнечетвертичных отложений достигает 100 м.

Моренные отложения распространены по всей территории, за исключением ее южной части. С поверхности они покрыты образованиями других генетических типов и более поздними отложениями, но на отдельных участках выходят на поверхность. Представлены

Физико-механические свойства грунтов

Грунт	W _L , доли единицы	W _p , доли единицы	I _p , доли единицы	I _L	γ _S , т/м ³	γ _{об} , т/м ³	W, доли единицы	e	G	C, МПа	φ°	E, МПа
Супесь:												
твердая	0,17	0,12	0,6	-0,47	2,70	2,25	0,9	0,32	0,82	0,64	35	300
пластичная	0,17	0,11	0,6	0,23	2,69	2,24	0,12	0,35	0,95	0,46	32	240
Суглинок:												
твердый	0,22	0,12	0,10	-0,18	2,71	2,24	0,10	0,34	0,84	0,82	30	270
полутвердый	0,21	0,11	0,10	0,15	2,71	2,23	0,13	0,37	0,93	0,48	28	240
тугопластичный	0,20	0,10	0,10	0,36	2,71	2,22	0,14	0,39	0,96	0,32	29	180
мягкопластичный	0,22	0,11	0,11	0,60	2,73	2,18	0,17	0,46	1,0	0,28	29	200
171 Песок ледниковый:												
пылеватый плотный	—	—	—	—	—	1,95	0,9	0,50	—	—	—	450
мелкий рыхлый	—	—	—	—	—	1,56	0,4	0,77	—	—	—	270
мелкий средней плотности	—	—	—	—	—	1,58	0,4	0,75	—	—	—	320
пылеватый рыхлый	—	—	—	—	—	1,72	0,4	0,61	—	—	—	410
плотный	—	—	—	—	—	1,50	0,7	0,89	—	—	—	340
плотный	—	—	—	—	—	2,06	0,20	0,56	—	—	—	510
Песок аллювиальный:												
средней плотности	—	—	—	—	—	1,68	0,4	0,64	—	—	—	310
средней крупности	—	—	—	—	—	1,68	0,4	0,64	—	—	—	210
средней крупности	—	—	—	—	—	1,68	0,4	0,64	—	—	—	190
Песок эоловый:												
средней плотности	—	—	—	—	—	1,63	0,4	0,70	—	—	—	150
мелкий средней плотности	—	—	—	—	—	1,56	0,4	0,71	—	—	—	120
мелкий рыхлый	—	—	—	—	—	1,55	0,5	0,83	—	—	—	90

моренные отложения бурыми, красно-бурыми, реже серыми и темно-серыми моренными суглинками, супесями с включением гравия, гальки, валунов. В моренных отложениях часто встречаются карманы и линзы внутриморенных песков, прослойки ленточных глин. Мощность моренных отложений 10—15 м, местами до 20 м.

Флювиогляциальные отложения широко развиты в южной части района работ; на остальной территории они местами покрывают моренные отложения. В литологическом отношении эти отложения представлены разнозернистыми песками и песчано-гравийными отложениями, реже супесями и алевритами. Мощность отложений составляет 5—6 м, местами до 40 м.

Озерно-ледниковые отложения имеют широкое распространение в северо-западной и восточной частях района работ. Они залегают непосредственно под почвенно-растительным слоем над моренными отложениями. Среди озерно-ледниковых отложений преобладают ленточные глины, супеси, суглинки. Пески встречаются реже, в основном в береговых образованиях. Это тонко-мелкозернистые пески, реже разнозернистые. Мощность озерно-ледниковых отложений колеблется от 1 до 20 м.

Современные образования представлены аллювиальными и эоловыми отложениями. Аллювиальные отложения выделяются по долинам рек, слагают надпойменные террасы и пойму. Представлены они песчано-гравийным материалом, песками от мелко- до крупнозернистых разностей, реже суглинками и глинами. Мощность отложений 2—10 м. Эоловые отложения развиты в центральной части района работ, где они тесно связаны с лимногляциальными отложениями. В литологическом отношении они представлены хорошо отсортированными тонко-мелкозернистыми песками полевошпатово-кварцевого состава. Мощность эоловых песков составляет от 2 до 10 м.

По данным некоторых авторов, грунты Литовской ССР характеризуются физико-механическими свойствами, представленными в табл. 21.

ТЕХНИКА И МЕТОДИКА ПЕНЕТРАЦИОННО-КАРОТАЖНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ. Пенетрационно-каротажные исследования проводились на различных геолого-генетических комплексах пород, выделенных по геологической съемке масштаба 1:200 000. Часть пенетрационно-каротажных скважин приходилась вблизи опорных буровых скважин.

Интерпретация результатов пенетрационно-каротажных исследований заключалась в расчленении песчано-глинистых отложений на отдельные слои, установлении положения границ, определении вида пород и оценке их физико-механических свойств. Остановился лишь на тех моментах, которые характерны для конкретных условий Литовской ССР.

Анализируя материалы пенетрационного каротажа, следует в первую очередь отметить высокую степень дифференциации регистрируемых кривых практически по всем измеряемым параметрам. Так, лобовое сопротивление грунтов варьирует в пределах 1—

16 МПа, боковое трение — 0,02—0,4 МПа, объемная масса — 1,55—2,30 т/м³ и объемная влажность — 0,04—0,40. Дифференциация кривых наблюдается как на одной отдельно взятой диаграмме, так и между диаграммами.

Важное значение имеет наличие коррелируемости пенетрационно-каротажных кривых, которая также наблюдается как на отдельно взятой диаграмме, так и между ними.

Большая дифференцированность пенетрационно-каротажных диаграмм и наличие корреляции между кривыми позволяют практически однозначно определять положение границ пластов в разрезе скважины по характерным точкам перегиба, не привлекая для этих целей трудоемкого математического аппарата.

Установление литологического строения разрезов в скважине по данным пенетрационно-каротажных исследований проводилось на основании сопоставления с результатами бурения и лабораторных определений. Анализ этих материалов позволил оценить эффективность каждого из методов пенетрационно-каротажного комплекса и получить критерии для определения вида пород. Основным методом пенетрационно-каротажного комплекса при установлении вида пород для изучаемой территории является гамма-каротаж. Пески характеризуются значениями минимальной естественной гамма-активности, которая в два раза ниже, чем у тяжелых глин. Количественное определение процентного содержания глинистости проводится по графику зависимости естественной гамма-активности от глинистости.

Использование данных тензометрии R и T дает дополнительную информацию для определения вида породы. Значение удельного лобового сопротивления колеблется (в МПа): для глин до 2, суглинков 2—6, супесей 4—8 и песков — более 8. Однако в связи с развитием в районе работ уплотненных глин и суглинков ледникового происхождения или наличия в них различного количества пещано-галечникового материала, значения R в этих отложениях часто оказываются завышенными. Тем не менее, используя величину показателя R в комплексе с ГК, с достаточной уверенностью можно определить литологическое строение разреза скважины. Особенно большое значение для определения вида пород величина удельного лобового сопротивления приобретает в маломощных пластах, поскольку разрешающая способность этого метода по мощности значительно выше, чем ГК.

В качестве дополнительного критерия при установлении вида пород использовались данные нейтрон-нейтронного каротажа. В зоне аэрации значениями $W_{об}$ меньше 0,10—0,15 характеризуются пески, 0,15—0,25 — супеси и более 0,25 — суглинки и глины.

Наличие геологической основы масштаба 1 : 200 000 и архивных данных позволило выявить комплекс признаков для генетической характеристики пород по результатам пенетрационного каротажа. Анализ полученного пенетрационно-каротажного материала показал, что практически однозначно по значениям $\gamma_{об} \geq 2,2$ т/м³ выде-

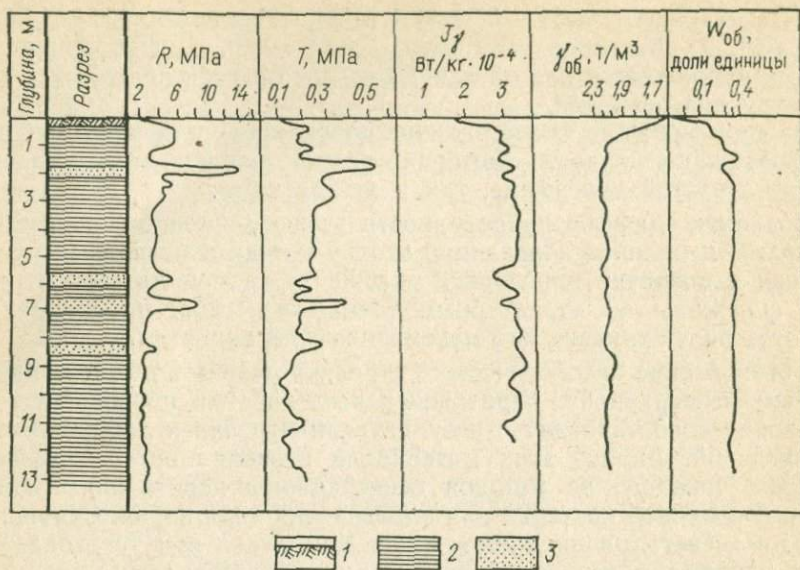


Рис. 67. Пример выделения на диаграммах ПК моренных отложений.
1 — почва; 2 — глина; 3 — песок

ляются отложения, представленные преимущественно глинами и суглинками (рис. 67).

По характеру диаграмм R , T ГК моренные отложения отличаются большой неоднородностью состава как в плане, так и по глубине разреза. Для них характерны относительно низкие значения $W_{об}$, составляющие обычно 0,17—0,25.

В толще этих отложений отмечаются прослои тяжелых глин со слабыми прочностными показателями, а также внутриморенные водоносные песчаные прослои и линзы. Для моренных песков значения объемной массы несколько ниже, чем для глинистых пород, а влажности — выше 0,30—0,40.

Залегающие на моренных озерно-ледниковые отложения, по данным пенетрационного каротажа ГК, представлены в подавляющем большинстве суглинками и глинами. Причем практически на всех диаграммах в подошве этих отложений (на контакте с моренными) отмечается слой тяжелых глин. От моренных отложений озерно-ледниковые отложения отличаются пониженными значениями объемной массы, равными в среднем 2,05 т/м³, и повышенными значениями объемной влажности — 0,30—0,40. Значение удельного лобового сопротивления для озерно-ледниковых глинистых отложений обычно не превышает 2,2 МПа и повышается только из-за наличия песчаных прослоев. Мощность озерно-ледниковых отложений, как правило, невелика и колеблется от 1 до 3 м, реже достигает 14 м.

На части территории над моренами залегают флювиогляциаль-

ные отложения. По данным пенетрационного каротажа ГК, они характеризуются чередованием небольших пропластков песков или супесей с суглинками, объемная масса которых в зависимости от влагонасыщения колеблется от 1,55 до 2,1 т/м³, а влажность от 0,05 до 0,4. Этим, а также отсутствием тяжелых глин они отличаются от озерно-ледниковых отложений. От моренных отложений флювиогляциальные отличаются так же, как и озерно-ледниковые. Мощность флювиогляциальных отложений колеблется от 1,5 до 8 м.

Относительно небольшую часть района работ занимали эоловые и аллювиальные отложения. По данным пенетрационного каротажа ГК, они представлены песками, в подошве часто заиленными (о чем свидетельствует уменьшение R до 2 МПа и некоторое повышение ГК до 0,5 относительных единиц).

Анализ данных, полученных с помощью комплекса пенетрационных каротажных методов в районе распространения ледниковых отложений Литовской ССР, позволяет сделать ряд выводов. Данные пенетрационного каротажа дают возможность не только определить вид пород, положение границ отдельных литологических разностей, но и установить границы генетических типов пород и выявить качественные и количественные данные о закономерностях распределения физико-механических свойств в разрезе для различных генетических типов пород. Учитывая, что при гидрогеологической и инженерно-геологической съемках масштаба 1 : 200 000 тщательному изучению подлежат геолого-генетические комплексы пород, характер распространения, условия залегания, общие закономерности изменения фациальных условий, состава пород и мощности в пределах каждого выделенного геолого-генетического комплекса, применение пенетрационно-каротажных исследований возможно и экономически целесообразно, так как проходка пенетрационно-каротажных выработок значительно дешевле буровых и горнопроходческих работ.

Результаты пенетрационно-каротажных работ на объектах Латвийской ССР

На территории Латвийской ССР для целей инженерно-геологического районирования масштаба 1 : 50 000 пенетрационно-каротажные исследования проводились на участках с разнообразными геологическими условиями в районах городов: Юрмалы, Риги, Вентпилса и Баркавы. В геологическом разрезе данных районов присутствуют аллювиальные, морские, озерно-ледниковые и моренные отложения. Объем пенетрационно-каротажных работ составил 50 точек опробования с глубиной от 3 до 17 м.

Анализ пенетрационно-каротажных диаграмм с учетом материалов опорных буровых выработок и результатов лабораторных анализов позволил установить основные критерии для расчленения геолого-литологического разреза данного района, выявить степень однородности свойств пород и получить количественную оценку физико-механических характеристик пород.

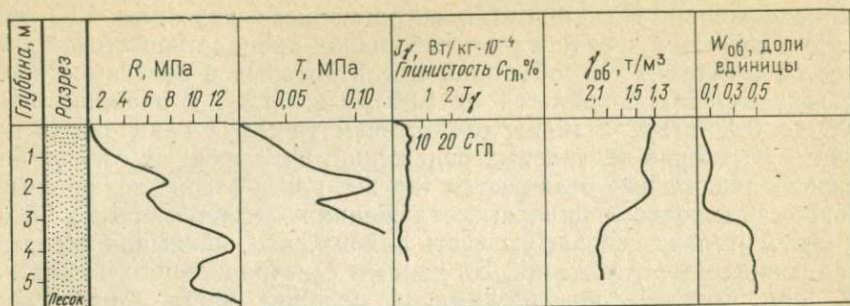


Рис. 68. Диаграммы пенетрационного каротажа на участке г. Юрмала

На диаграммах гамма-каротажа максимальной гамма-активностью обладают глины, минимальной — пески, промежуточной — суглинков и супеси. На диаграммах лобового сопротивления пород закономерность изменения величины R (в МПа) в зависимости от глинистости сохраняется: глины до 2, суглинки 2—6, супеси 4—8, пески — более 8. Значения R могут быть завышены у моренных отложений или при наличии в породах включений гравия, гальки и валунов.

Выделение в разрезах моренных отложений, а также илов или заиленных грунтов возможно практически по данным ГГК. Так, первые однозначно определяются по значениям объемной массы грунтов $\gamma_{об} > 2,1$ т/м³, а по величинам $\gamma_{об} < 1,8$ т/м³ (при условии полного водонасыщения грунтов) уверенно выделяются илы или заиленные грунты. В зоне аэрации по данным нейтрон-нейтронного каротажа ННК объемная влажность составляет: для песков менее 0,1; супесей — 0,15—0,25; суглинков и глин — более 0,25. Кроме того, как правило, в моренных отложениях наблюдается синхронное с ГГК снижение уровня записи по каналу ННК, которое позволяет оценить их объемную влажность в 0,20—0,30.

Участок г. Юрмала. Разрезы пенетрационных скважин на этом участке представлены песком (рис. 68). Наличие последнего уверенно устанавливается по результатам ГК, согласно которым величина содержания глинистой фракции колеблется около нуля. Кроме того, для этих отложений характерны высокие значения лобового сопротивления; имеющиеся на диаграммах R небольшие по мощности понижения значений указывают на неоднородность этих песков, обусловленную скорее всего заиленностью или различным содержанием в песке пылеватой фракции. Объемная масса песков в водонасыщенном состоянии колеблется в пределах 1,95—2,0 т/м³, а в зоне аэрации (в зависимости от влажности она составляет 1,6—1,4 т/м³).

Участок г. Рига. Для этого участка характерно значительное развитие илов различной плотности и глинистости (рис. 69). На диаграммах пенетрационного каротажа они уверенно выделя-

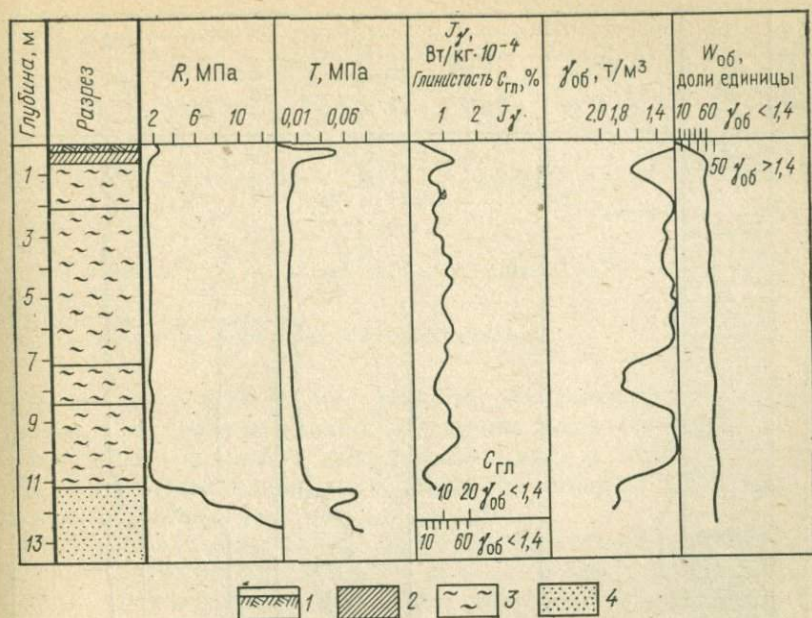


Рис. 69. Диаграммы пенетрационного каротажа на участке г. Рига.
1 — почва; 2 — суглинок; 3 — илы; 4 — пески

ются по низким значениям R (обычно менее 2 МПа) и объемной массы грунта (от 1,7 до 1,2 т/м³).

Участок г. Вентспилс. Отложения этого участка характеризуются большим разнообразием. По диаграмме пенетрационного каротажа выделяются практически все основные литологические различия грунтов: от песков до тяжелых глин и илов. Интерпретация результатов не вызывает каких-либо затруднений (рис. 70). На пенетрационно-каротажной диаграмме приведены записи по радиометрическим каналам при вдавливании и извлечении зонда, что позволяет судить о надежности работы аппаратуры. Затруднения в интерпретации полученных данных сводятся к следующему. При вдавливании зонда в интервалах глубин 3,4—4,2 и 14,6—15,5 м наблюдаются аномальные уменьшения величин $\gamma_{об}$ объемной массы грунтов, которые характеризуются в верхнем горизонте неизменной (или даже несколько повышенной) влажностью, примерно 0,40—0,55, а в нижнем горизонте — резким уменьшением ее. Интерпретация верхнего горизонта не вызывает осложнений и сводится к выделению в этом интервале водонасыщенных илов. Значительное уменьшение величины ННК в нижнем интервале можно объяснить, например, повышенным содержанием в отложениях горизонта (обозначенных как илы) или в насыщающем его растворе аномальных поглотителей тепловых нейтронов типа бора или хлора. Учитывая, что пройденные грунты относятся

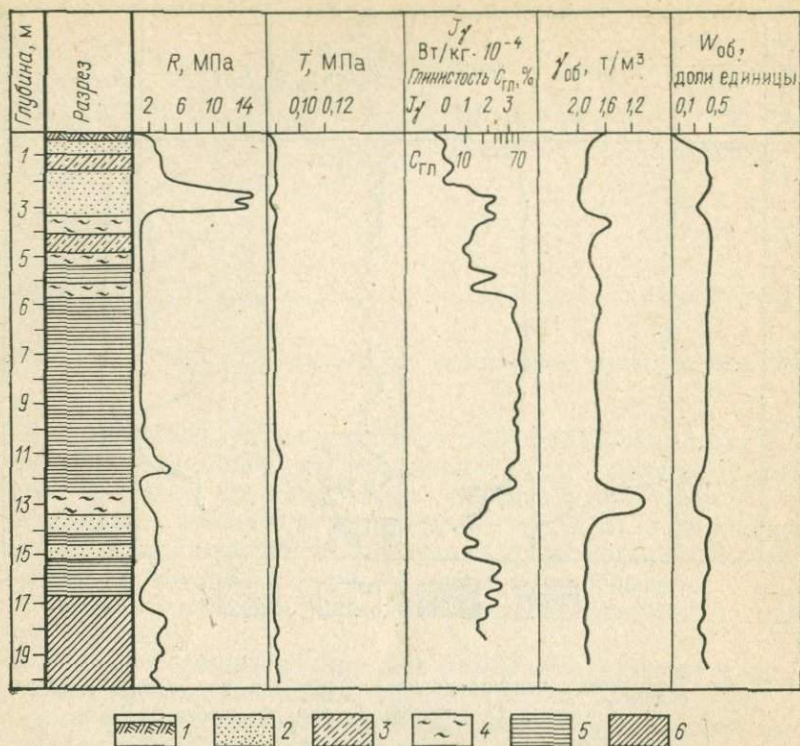


Рис. 70. Диаграммы пенетрационного каротажа на участке г. Вентспилс.
 1 — почва; 2 — песок; 3 — супесь; 4 — илы; 5 — глина; 6 — суглинок

к морским отложениям, можно предположить наличие рассола. Однако при извлечении зонда в указанных интервалах на ГКК наблюдалось значительное увеличение амплитуды аномальных изменений записи, в ННК — в нижнем интервале запись повторилась, а в верхнем появился минимум. Кроме того, в интервалах глубин 4,8—5,2 и 17,9—18,4 м на записях ГКК и ННК появились синхронные экстремумы, аналогичные отмеченному ранее в интервале 14,6—15,5 м. Для объяснения этого явления можно принять следующую рабочую гипотезу: учитывая, что в разрезе встречено достаточно много органических остатков, можно предположить наличие в интервале 14,6—15,5 м газа (возможно, сероводорода). Вскрытие водоупора при проходке пенетрационной скважины и перемещение газа за счет эффекта «насоса» позволяют объяснить увеличение при извлечении зонда амплитуды аномальных значений ГКК и появление новых экстремумов на графиках ГКК и ННК за счет внедрения газа в высокопористые торфяные пропластки.

Участок г. Баркава. Геологический разрез данного участка представлен двумя генетическими типами отложений: озерно-ледниковыми и моренными. Озерно-ледниковые отложения,

Грунт	Глинистость по данным ГК, %	R, МПа	T/R	$\gamma_{об}$, т/м ³	$W_{об}$, доли единицы
Глины озерно-ледниковые	40—78	0,8—2,0, реже до 3,0*	0,045—0,20	1,85—2,0	0,40—0,44
Суглинки моренные	20—28	2,4—6**	0,05—0,033	2,1—2,3	0,23—0,28

* Индикационная линия — плавающая.

** Индикационная линия — изрезанная, с отдельными пиками.

вскрытые в верхней толще разреза, представлены в основном глинами, местами в подошве с прослоями песка. Подстилаются они моренными суглинками с включением гравия и гальки. Характеристика глин и суглинков, полученная по данным пенетрационно-каротажных диаграмм, приведена в табл. 22.

Положения границ между двумя генетическими типами отложения в пенетрационно-каротажных скважинах на участке г. Баркава определяются в основном по точкам перегиба графиков ГК и ГКГ, а при благоприятных условиях они уверенно определяются по точкам перегиба всех методов комплекса R, T, ГК, ГКГ и НК.

Таким образом, применение комплекса пенетрационного каротажа при изучении рыхлых отложений позволяет решать следующие задачи: расчленять разрез песчано-глинистых отложений на слои, представленные различными видами пород; определять вид пород и показатели их физико-механических свойств; выявлять характер изменчивости свойств пород непрерывно по всей глубине зондирования. Пенетрационный каротаж может быть использован и для решения одной из главных задач инженерно-геологических исследований четвертичных отложений — для расчленения толщи рыхлых отложений на генетические типы.

Использование пенетрационного каротажа совместно с ландшафтно-индикационными исследованиями

Работы были проведены на территории Белоруссии в районе д. Морино. В пределах опытных участков аэроландшафтными методами по профилю, пересекающему флювиогляциальную равнину, пойму, I и II надпойменные террасы правого берега р. Неман (рис. 71), выделены природно-территориальные комплексы: IIIб — пологоволнистая флювиогляциальная равнина. Холмы и гряды с превышением 2—4 м, с комплексами сосново-еловых и сосново-березовых лесов и сплошными распашками. I-3а — II надпойменная терраса, пологоволнистая, с дюнами, местами разрезаемыми, с комплексами елово-сосновых лесов с примесью мелколиственных. I-2а — I надпойменная терраса, пологоволнистая, осложненная не-

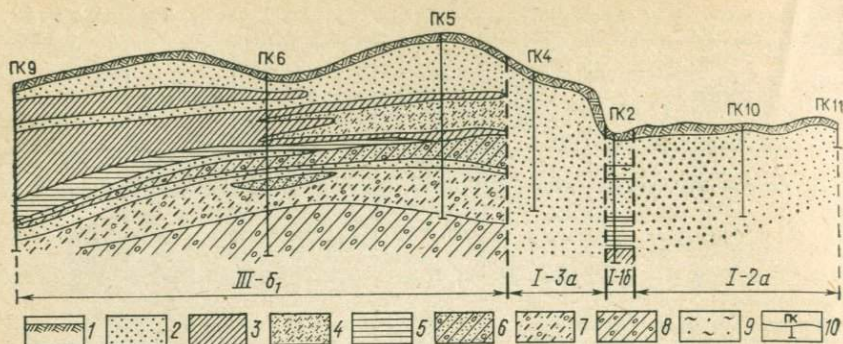


Рис. 71. Природно-территориальные комплексы на правобережном участке р. Неман.

1 — почва; 2 — песок; 3 — суглинок; 4 — пылеватый песок; 5 — глина; 6 — гравелистый песок; 7 — моренная супесь; 8 — моренный суглинок; 9 — пески иловатые; 10 — номер пикета

большими холмами с превышением 5—7 м, с комплексами хвойных лесов с примесью лиственных. I-1б — пойма низкого уровня с веерами блуждания, старицами и болотными комплексами.

На выделенных по профилю природно-территориальных комплексах пройдены пенетрационно-каротажные скважины глубиной от 2,3 до 22,5 м с интервалами между ними от 250 до 1000 м.

Геологический разрез участка представлен песчано-глинистыми пойменными, аллювиальными, флювиогляциальными и моренными отложениями современного, верхне- и среднечетвертичного возраста. С поверхности повсеместно развит почвенно-растительный слой мощностью от 0,3 до 0,5 м.

Пойменные отложения представлены водонасыщенными песками, с глубины 2 м заиленными; мощность пойменных отложений 4,5 м. Пески подстилаются глинами (по данным колонкового бурения) озерно-ледникового происхождения мощностью 2,1 м. В интервале глубин 6,6—7,0 м прослежен прослой песка. Глубже 7 м залегают моренные отложения. Эти породы по данным пенетрационного каротажа характеризуются следующими значениями.

Грунт	I_V	R , МПа	T , МПа	$\gamma_{об}$, т/м ³	$W_{об}$
Пески	20—25	До 6,7	До 0,15	1,85—1,94	>0,40
Глины	>55	1,2—3,2	0,08—0,14	1,85—1,95	>0,40
Песок (мощность прослоя до 0,5 м)	—	До 10,6	До 0,18	—	—

В заиленных песках значения R , T и объемной массы снижаются до 1,76 т/м³, а объемная влажность увеличивается.

Аллювиальные отложения верхнечетвертичного возраста, слабые I и II надпойменные террасы, представлены песками с прослоем супеси; мощность их до 0,25 м. Вскрытая мощность песков колеблется от 1,7 до 10,5 м. Аллювиальные пески однозначно выделяются по диаграммам R , T и ГК.

Грунт	I_V	R , МПа	T , МПа	$W_{об}$, т/м ³	$W_{об}$
Пески					
аллювиальные	20—30	6,6—15,6	0,14—0,31	—	—
маловлажные	—	—	—	1,63—1,68	0,5—0,11
водонасыщенные	—	—	—	1,91—1,95	0,50

Флювиогляциальные отложения среднечетвертичного возраста прослежены на флювиогляциальной равнине в верхней части разреза по пенетрационно-каротажным скважинам 5, 6, 9. Они характеризуются сложным литологическим разрезом, не выдержанным по глубине и простираению. Под почвенно-растительным слоем до глубины 1,5 м залегают пески. Глубже по разрезу выделяются суглинки и глины с прослоями песка и супеси. Мощность суглинков колеблется от 3,4 до 6,5 м, глин от 2,7 до 4,5 м. Супеси отмечены ГК 5 в интервале глубин 4,9—7,5 м. Значения R , T для флювиогляциальных отложений приведены ниже.

Грунт	R , МПа	T , МПа
Пески	До 10,0	До 0,24
Супеси	До 16,0	До 0,50
Суглинки	0,4—4,0	} 0,065—0,18 реже 0,18
Глины	—	

Объемная масса флювиогляциальных отложений преимущественно меньше 2 т/м³. По диаграмме ННК глинистые породы не расчленяются, вследствие слабой чувствительности метода и высокой влажности $W_{об} > 0,3$.

Моренные отложения среднечетвертичного возраста, прослеженные пенетрационно-каротажными скважинами ГК 2, 5, 6, 9 с глубины 5,5—10,0 м, подстилают пойменные и флювиогляциальные отложения. По значению I_V — это преимущественно суглинки (за исключением ГК 6, где в интервале глубин 5,6—7,6 м встречены супеси с линзами глин). Моренные отложения обладают повышенной плотностью, их объемная масса больше 2 т/м³, а объемная влажность чаще всего ниже, чем у глинистых пород пойменных и флювиогляциальных отложений; $W_{об} = 0,25—0,39$. Индикационная линия на диаграммах R и T характеризуется пилообразной формой записи за счет включения гравия, гальки и валунов.

Пенетрационно-каротажные исследования позволяют не только расчленить литологический разрез на природно-территориальные комплексы, но и уточнить правильность их выделения. Например, природно-территориальный комплекс I-3а выделен условно, так как аэроландшафтными методами по данному профилю трудно однозначно интерпретировать, относится ли выделенный участок к комплексу II надпойменной террасы или флювиогляциальной равнины. По данным СПК-Т, значения R/T и литологический разрез для двух этих участков по профилю различны, следовательно, комплекс I-3а выделен правильно. Отсюда следует, что использование пенетрационного каротажа в качестве наземного обеспече-

ния ландшафтно-индикационных работ и совместной интерпретации позволяет значительно повысить информативность общего комплекса исследований даже в таком сложном районе работ.

И все же представляется, что если бы в комплекс аэроландшафтных методов и пенетрационного каротажа был введен метод электропрофилирования, электророндирования, высокочастотного электропрофилирования или радиолокации, то результаты были бы более четкими, так как имелась бы возможность точнее установить границу комплексов в плане.

Исследование оползней

В Абхазской АССР пенетрационно-каротажные работы были проведены на оползневом участке в районе г. Новый Афон. Участок находится на Черноморском побережье Кавказа в 2 км восточнее г. Новый Афон. В геоморфологическом отношении участок расположен на прибрежном склоне с общим уклоном поверхности в сторону моря 5—15°. Рельеф склона типично оползневый. Геологическое строение участка, по данным Черноморской опытно-методической партии, следующее. С поверхности залегают современные делювиальные отложения, представленные глинами мягкопластичной, местами текучепластичной консистенции, бесструктурные, перемятые с линзами и гнездами в основном водонасыщенного песка. Мощность этих глин составляет 0,5—2,5 м. Ниже прослеживаются смещенные блоки майкопских глин, тугопластичных, участками мягкопластичных, а в нижней части — полутвердых, с прослоями песка. По плоскостям напластований глин отмечены налеты алевритистого песка толщиной до 1 мм. В верхней части отложения перемяты, перетерты, а в нижней — имеют слабо нарушенную структуру и хорошо выраженную слоистость. Коренные

майкопские глины залегают ниже глубины пенетрационно-каротажных исследований.

Исследование разреза на этом участке пенетрационно-каротажными методами проводилось по профилям, прослеживающим и секущим оползневое тело (рис. 72). По данным СПК-Т вся исследуемая толща до глубины 22 м сложена глинами. По диаграмме R и T выделяются три слоя глин с разными физико-механическими свойствами.

Верхний слой, пред-

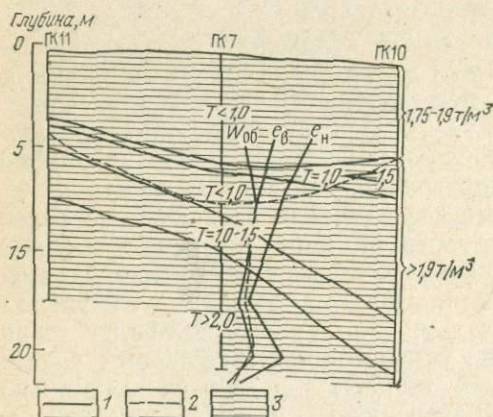


Рис. 72. Профиль оползневого участка вблизи г. Новый Афон.

1 — границы уровней значений T ; 2 — плоскость сдвига; 3 — глины

ставленный мягкопластичной глиной, имеет следующие значения: $R=0,5-2,0$ МПа; $T=0,06-0,15$ МПа; $R/T < 14$. Объемная масса слоя по большинству диаграмм меньше $1,9$ т/м³. Мощность слоя $6,0-8,0$ м. В кровле его до глубин $0,5-3,0$ м по значению $R/T < 7$ (см. рис. 74) выделяются глины с пониженным значением объемной влажности и коэффициентом пористости близким к 1. В подошве слоя на контакте с нижележащим слоем прослеживается ослабленная зона мощностью $0,5-1,0$ м, имеющая минимальные значения R/T . Объемная масса в этой зоне понижается до $1,8$ т/м³.

Второй слой представлен мягкопластичной глиной с прослоями песка, реже с прослоями дресвы или щебня. Слой неоднороден по составу: ослабленные прослои чередуются с уплотненными, на что указывают пестрота не выдержанных по разрезу значений R , T , R/T , а также пикообразная форма кривых R и T . Величины R , T и R/T следующие: $R=1,9-3,8$ МПа (реже до 4,5); $T=0,13-0,25$ МПа (реже до 0,13); $R/T=5-22$. Мощность слоя колеблется от 3,0 до 12,5 м.

Третий слой — глина тугопластичной консистенции — выделяется с глубины $13,0-19,0$ м по значениям $T \geq 0,25$ МПа, $R=3,2-5,5$ МПа (реже $< 3,2$). Объемная масса грунтов слоя $\gamma_{об} > 1,9$ т/м³, средняя объемная влажность ниже, чем у вышележащих слоев. Вскрытая мощность слоя до 5,5 м.

В Молдавии аналогичные работы проводились в 1975 г. на опорном стационаре «Быковец». Целью работ являлась оценка возможности применения СПК-Т в комплексе стационарных исследований оползневого склона. Пенетрационно-каротажные исследования были направлены на решения следующих задач: 1) литологическое расчленение пород оползневого тела по видам пород; 2) оценку изменчивости свойств пород, слагающих оползневый склон.

Опорный оползневой стационар «Быковец» расположен на левом берегу р. Бык, притока р. Днестра. В геологическом строении исследуемого участка принимают участие среднесарматские и четвертичные отложения.

Среднесарматские отложения в оползневом теле и коренном залегании различны: они представлены плотными глинами серого цвета с тонкими (до 2 мм) прослойками алевролита. В коренном склоне, выше по разрезу, они сменяются тонкозернистыми песками с прослойками и линзами глин. В оползневом склоне поверхность (кровля) серых глин является плоскостью скольжения оползня. Оползневые отложения представлены зеленовато-серыми глинами (продукт разрушения серых глин), перемятыми, ожелезненными, опесчаненными с кристаллами и гнездами гипса и с прослоями водонасыщенного песка.

Четвертичные отложения эолово-делювиального происхождения, развитые в коренном ненарушенном склоне гипсометрически выше оползневого тела, залегают на размывтой поверхности среднесарматских глин. Литологически они представлены желтовато-серыми

суглинками, супесями и тонкозернистыми пылеватыми песками с маломощными линзами глин.

В пределах оползневого склона мощность четвертичных отложений составляет 6,0—9,0 м. Объем выполненных пенетрационно-каротажных работ составил 34 точки пенетрационного каротажа при глубине исследования от 3,5 до 23,8 м. Точки пенетрационного каротажа располагались в наиболее активной части оползневого тела по линиям продольных и поперечных профилей и вдоль стенки срыва по краевой части плато. Однако многие характерные участки оползневого тела и коренного склона были недоступны для СПК-Т, и в большинстве скважин глубина зондирования ограничивалась из-за того, что глинистые породы, слагающие исследуемый склон, создавали опасность прихвата зонда. Методы пенетрационного каротажа в комплексе стационарных исследований оползневого склона позволяют выделить различные литологические разновидности пород, проследить структуру оползня и изменение физико-механических свойств пород с глубиной.

Геологическая интерпретация пенетрационно-каротажных диаграмм на участке «Быковец» по ряду причин (не выдержанности слоев по мощности и простираанию, наличия частых прослоев, близости литологических разностей и т. д.) представляет некоторую трудность. Однако с помощью пенетрационного каротажа четко выделяются слои с разными физико-механическими свойствами. Не останавливаясь на детальном выделении слоев по каждой точке пенетрационного каротажа, отметим, что за основу расчленения разреза были взяты величины естественной гамма-активности и удельного сопротивления наконечнику зонда, с учетом всех параметров пенетрационного каротажа.

На диаграммах удельного лобового сопротивления слои песков четко выделяются по значениям $R > 10$ МПа, за исключением маломощных прослоев песков, где R снижается до 4,8—5,5 МПа. В глинистых породах значения R колеблются от 0,5 до 4,0 МПа (реже 4,0) в зависимости от консистенции, плотности и вида породы.

На диаграммах ГГК из-за высокой влажности $W_{об} > 0,3$ нельзя четко дифференцировать виды пород по величине объемной массы, однако при больших колебаниях ее значений средние величины $\gamma_{об}$ по видам пород закономерно повышаются от песков к глинам.

Из анализа пенетрационно-каротажных диаграмм большинства точек зондирования, расположенных в активной части оползня, отмечено понижение значений удельного сопротивления ($R = 0,5—2,5$ МПа) глинистых пород верхней толщи оползневого тела, что указывает на пластичное состояние и низкие прочностные показатели этих пород.

Судя по форме и величине удельного сопротивления ($R = 4,0—11,6$ МПа) и бокового трения (T до 0,5 МПа), на глубинах 8,5—13,2 м отмечаются плотные глины, кровля которых, очевидно, является поверхностью скольжения.

Интересен результат пенетрационного каротажа на коренном склоне. В интервале глубин 15—16 м на контакте с подстилаю-

щими плотными глинами прослежен слой глин со слабыми прочностными связями, в них значение R снижается до 1,8 МПа, а T — до 0,17 МПа. Наличие ослабленного слоя может явиться причиной возникновения пластического течения пород.

Наиболее чувствительным показателем в отношении пород, потерявших структурную прочность, как нами выяснено, является удельное трение. Его значения в плоскости скольжения понижены до минимума.

В заключение следует отметить, что работы на этом оползневом склоне еще раз подтвердили возможность использования пенетрационного каротажа для изучения оползневого тела, что особенно эффективно при условии создания соответствующей транспортной базы станции.

При этом должна быть решена довольно сложная двойная задача: создать легкую пенетрационную установку, способную передвигаться по склонам и внедрять в массив пенетрационно-каротажный зонд на гарантированную глубину не менее 30 м. Представляется, что разработанная шведской фирмой «Борро» установка «Полидрил» во многом соответствует этим требованиям. Однако, что касается измерительного комплекса, он должен быть аналогом МАК-80.

При исследовании донных отложений на шельфе

На первом этапе эксплуатации судно «Геолог-1» выполняло производственные работы в акватории одной из гаваней.

Основной задачей в данном случае было выполнение буровых работ с отбором образцов грунта. Параллельно с бурением было пройдено 16 пенетрационно-каротажных скважин с записью диаграмм по четырем каналам (R , T , ГГК, ГК). Глубина воды в пунктах бурения и пенетрационного каротажа колебалась около 25 м. Всего на этом участке бурения было пройдено 24 скважины. Бурение производилось с отбором образцов для лабораторных исследований. Глубина бурения и пенетрационного каротажа ограничивалась кровлей флишевой толщи. Достижение кровли флишевой толщи определялось по резкому возрастанию удельного сопротивления до 26 МПа, после чего зонд останавливался. Достоверность литологической колонки, построенной по пенетрационно-каротажным диаграммам, контролировалась на первых порах параллельными скважинами.

Отложения в верхней части разреза представлены илами мощностью до 6 м. Илы характеризуются малыми значениями удельного лобового сопротивления (до 0,6 МПа) и трения (0,01—0,02 МПа). Величина объемной массы возрастает к подошве слоя до 1,6 т/м³. В нижней части слоя четко прослеживается пропласток ила с растительными остатками мощностью около 1 м, который хорошо выделяется на диаграмме ГГК и имеет плотность 1,4—1,45 т/м³. В некоторых скважинах ниже ила имеется слой мягкопластичного суглинка, который характеризуется плотностью до

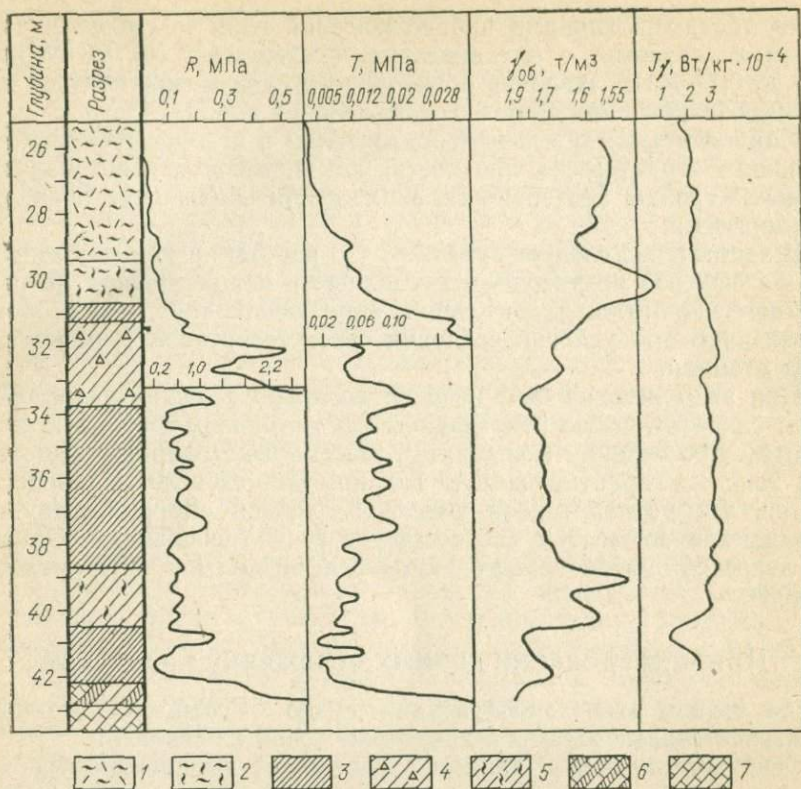


Рис. 73. Диаграммы пенетрационного каротажа донных отложений.

1 — ил; 2 — глинистый ил; 3 — суглинок; 4 — суглинок с ракушкой; 5 — тяжелый суглинок; 6 — разрушенный мергель; 7 — мергель

1,8 т/м³, удельным сопротивлением R до 3 МПа и трением T до 0,4 МПа. Слой выделяется на диаграммах R и T монотонным характером нарастания этих значений. В большей части точек сразу под илами отмечен слой щебня с пластичным суглинистым заполнителем, характерным признаком которого является пилообразный характер диаграмм R и T , значения которых изменяются в пределах: R от 0,5 до 7 МПа и T от 0,03 до 0,05 МПа. В пределах слоя происходит нарастание плотности от 1,7 до 2,0 т/м³ и некоторое увеличение гамма-фона. С глубин от 9,0—9,5 до 16—17 м в некоторых скважинах (рис. 73) прослеживается слой мягкопластичного суглинка с незначительными включениями супесчаных пород. Для этого слоя характерны низкие значения $R=0,5—1,0$ МПа; $T=0,02—0,08$ МПа. Плотность пород изменяется от 1,9 т/м³ в верхней части до 1,7 т/м³ в нижней. В пределах этого слоя от глубины 12 м до отметки 15 м на диаграмме ГГК хорошо выделяется слой мощностью до 2 м, имеющий плотность, пониженную до 1,5 т/м³. Диаграмма ГГК в пределах этого слоя имеет

чаще всего двугорбый характер, что свидетельствует о наличии в середине его плотного материала. По данным бурения в пределах этого слоя обнаружены растительные остатки. На диаграммах R и T этот слой ничем не выделяется. С глубины 15,5—17,0 м начинается резкое увеличение значений удельного сопротивления (до 25 МПа), трения (до 0,2—0,35 МПа) и плотности (до 2,1 т/м³). Такое высокое значение удельного сопротивления соответствует кровле толщи мергелей, что подтверждается данными, полученными при параллельном бурении. Зона нарастания значений R , T и $\gamma_{об}$, имеющая мощность 1,0—1,5 м, является зоной разрушения кровли отложений мергеля.

Приведенный анализ относится к скважинам, расположенным в голове проектируемого сооружения. Здесь кровля флишевых толщ располагается на глубине 17,0—18,5 м. Для группы скважин, расположенных ближе к голове существующего сооружения, положение кровли мергелей колеблется от 8,8 до 11,5 м. Понижение кровли идет в направлении моря. На этом участке илы прослеживаются до глубины 7 м.

Ниже илов до кровли мергеля расположен слой щебня с тугопластичным суглинистым заполнителем. Диаграммы R и T в пределах этого слоя имеют пилообразный характер. Удельное сопротивление колеблется от 8,0 до 25,0 МПа, а трение — от 0,1 до 0,3 МПа. Плотность этого слоя выдержана в пределах 1,9—2,0 т/м³.

Анализ результатов полученных на данном участке показывает, что с помощью пенетрационно-каротажного комплекса можно провести качественное литологическое расчленение разреза с оценкой плотности исследуемых пород.

Еще более сложными для оценки показателей состава, состояния и свойств донных отложений были условия в одном из районов Черноморского побережья. Донные отложения здесь были представлены породами четвертичного и неогенного возраста: илами, суглинками, щебенкой. Илы, как правило, глинистые, очень текучие, с глубиной переходят в слаботекучие; содержат большое количество неравномерно распределенной ракушки (рис. 74).

В средней части слой илов достигает максимальной мощности около 25 м. Илы подстилаются мягко-тугопластичными суглинками

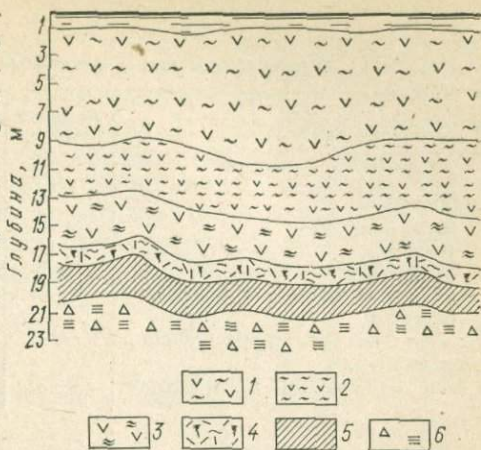


Рис. 74. Геологический разрез одного из участков Черноморского побережья.

1 — ил разжиженный с ракушей; 2 — ил текучий с ракушей; 3 — ил слаботекучий с ракушей; 4 — ил текучий с органическими остатками; 5 — суглинок мягкопластичный с песчаными прослойками; 6 — щебень с глинистым заполнителем

Физико-механические показатели донных отложений

Грунт	Мощность слоя, м	$\gamma_{об}$, т/м ³	R , МПа	T , МПа
Ил глинистый:				
очень текучий	8—9	1,4—1,5	0—0,4	0—0,03
текучий	4—5	1,5—1,6	0,4—0,5	0,03—0,035
слаботекучий	~3	1,6—1,65	0,5—0,6	0,025—0,045
с включением органических остатков	~1,5	1,53—1,6	0,6—0,8	0,02—0,045
Суглинок с песчаными прослойками, мягкопластичный	2—2,5	1,75—1,85	0,2—0,9	0,02—0,06
Щебень с глинистым заполнителем	>2,5	1,85—1,95	1—3	0,04—0,15

мощностью 6—8 м. Ниже залегают щебеночные отложения — продукт размыва и переотложения понтических известняков. Заполнителем в них являются туго- и мягкопластичные глина и песок. Мощность щебня составляет 1,5—3,5 м. По склонам участка залегают континентальные четвертичные отложения, представленные лёссовидными и делювиальными суглинками.

В результате выполнения пенетрационного каротажа были получены подробные материалы (диаграммы по ГГК, ГК, R , T) на глубину исследований около 25 м. По ним были определены границы различных по консистенции и составу илов, слагающих донные отложения лимана, а также уточнены значения плотности и прочности этих отложений (табл. 23).

При поисках полезных ископаемых

Применение при изысканиях сложных высокоэффективных технических средств предполагает максимальное использование их для получения информации; не только для оценки инженерно-геологических свойств пород в разрезе, но и для регистрации признаков, характеризующих наличие полезных ископаемых. Выполненные в этом направлении работы показывают перспективность и высокую эффективность комплекса пенетрационного каротажа.

Использование результатов пенетрационного каротажа непосредственно для регистрации имеющихся в разрезе полезных ископаемых очень перспективно. Собственно говоря, в этом плане некоторые организации уже используют пенетрационный каротаж. Например, СПК-Т используют при детальном исследовании залежей песков, предполагаемых для использования в качестве строительного материала. При этом пункты пенетрационного каротажа сгущаются на участке до расстояния 10—15 м друг от друга. Пенетрационный каротаж позволил получать детальную информацию о составе и состоянии слоев песков на исследуемом участке. Таким же образом выделялись глины и другие разновидности пород, используемые в качестве строительных материалов.

Еще больший эффект, чем на суше, может дать подводный пенетрационный каротаж при поисках и детальных исследованиях строительных материалов в руслах рек и на озерах.

Не представляет никаких трудностей однозначное выделение и исследование с помощью пенетрационного каротажа торфяных залежей, погребенных торфяников, сапропелей и других отложений, насыщенных органикой. То же относится и к четкому выявлению водонасыщенных песков, водоупоров и других элементов геологических разрезов, определяющих возможную водоотдачу в исследуемых районах.

При работах на угольных месторождениях

Как отмечает В. В. Гречухин, «способы геологической документации разрезов скважин по керну являются несовершенными и весьма трудоемкими. В первую очередь это связано с тем, что бурение, как правило, не обеспечивает полного выхода керна. Особенно мал выход керна из слабо сцементированных пород и, в первую очередь, угольных пластов и их кровли (...) В изучении геологии угольных месторождений важное место занимают геофизические методы. Однако применение современных геофизических методов для исследования разрезов угольных скважин в отрыве от геологических данных имеет существенные недостатки» [9].

В табл. 24 приведены значения физических параметров углей и вмещающих пород. Эти значения — как набор самих показателей, так и их количественные величины — свидетельствуют о возможности эффективного применения пенетрационно-каротажного комплекса для регистрации углей в разрезе. Это было подтверждено и последними работами, выполненными на объектах КАТЭКа.

Таблица 24

Физические характеристики углей и вмещающих пород (по В. В. Гречухину)

Порода	Общая пористость $k_{п}$, %	Плотность $\delta_{п}$, т/м ³	Удельное электрическое сопротивление $\rho_{п}$, Ом·м	Скорость распространения упругих продольных волн v , км/с	Радиоактивность I_{γ}
Аргиллит	3,0—25,0	2,4—2,80	10—400	1—5	12—30
Алевролит	3,0—20,0	2,4—2,75	15—600	1—5	8—18
Глина и глинистый сланец	5,0—25,0	1,9—2,40	0,8—20	0,800—2	12—30
Известняк	2,0—2,5	2,3—2,90	10—5·10 ³	2—6	0,5—12
Изверженная порода	1,0—3,0	2,5—3,70	5·10 ² —10 ⁵	5—7	1—25
Песчаник	3,0—15,0	2,4—2,75	2—3·10 ³	1,5—5,5	5—12
Уголь					
бурый	12,0—25,0	1,2—1,30	10—200	2,6—2,7	3
каменный	2,0—12,0	1,2—1,35	10 ² —10 ⁶	1,7—2,6	3
Антрацит	1,0—2,0	1,4—1,80	10 ⁻³ —10,0	2,5—3,5	3

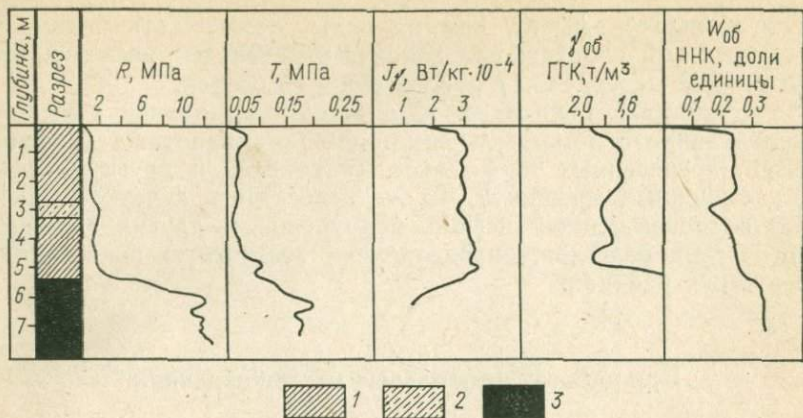


Рис. 76. Диаграммы пенетрационного каротажа на месторождении фосфоритов. 1 — песок; 2 — супесь; 3 — желваки фосфоритов; 4 — глина; 5 — гравийно-галечные отложения

Работы выполнялись на Назаровском месторождении КАТЭКа серийной станции СПК-Т с целью получения информации по разрезам, включающим пласты угля и исследования золоотвалов и обвалочных дамб.

Остановимся на пенетрационно-каротажных скважинах, расположенных на технологическом уступе восточного борта Назаровского разреза, представляющего собой площадку после удаления четвертичных пород. Глубина вдавливания зонда составляла 10 м с заглублением в угольный пласт до 2,6 м (рис. 75). На всех точках пласты угля выделялись однозначно по комплексу диаграмм пенетрационного каротажа на фоне вмещающих пород — в различной степени опесчаненных суглинков.

Так, при входе зонда в уголь резко возрастают значения R и T до величин 11—14 МПа и 0,15—0,20 МПа соответственно (по сравнению с вышележащими суглинками). Отношение показателя R/T соответствует уровню песков, а значения естественной радиоактивности даже ниже, чем в песках. Влажность углей возросла до 0,35, резко увеличилась интенсивность рассеянного гамма-излучения (ГГК), указывая на снижение объемной массы скелета ниже 1,15 т/м³. Таким образом, показатели R/T в сочетании с данными ГГК однозначно выделяют уголь в разрезе. Из-за различных примесей естественный фон ГК может колебаться в широких пределах.

Использование СПК-Т на золоотвалах позволяет однозначно выделять шлак цементированный, золу (уголь сажистый), наличие загрязнения, обводненность и другие показатели.

При работах на месторождениях фосфоритов

Начиная с 1980 г. пенетрационно-каротажные станции СПК-Т были опробованы на некоторых месторождениях фосфоритов с целью определения содержания P_2O_5 в естественном залегании и литолого-стратиграфического расчленения пород. Работы выполнялись для изучения возможности замены буровых и каротажных работ в скважинах малого диаметра. Кроме типового комплекса методов пенетрационного каротажа в этом случае выполнялся еще и токовый каротаж. На рис. 76 приведены результаты пенетрационного каротажа по одному из пунктов месторождения. Пенетрационный каротаж выполнялся в точках, расположенных рядом со скважинами, которые исследовались с помощью спектрометрического гамма-каротажа (СГК) и гамма-каротажа и из которых были отобраны образцы для стандартного опробования на P_2O_5 .

Путем обработки полученных материалов и сравнения результатов оценки точности в определении содержания P_2O_5 по данным геологического и геофизического исследования (СГК, ГК) была установлена их хорошая сходимость. Точность определения содержания P_2O_5 в фосфоритах комплексом пенетрационного каротажа не хуже СГК и ГК. Кроме того, очень точно определяется мощность фоссерии с литолого-стратиграфическим расчленением всех слоев фоссерии и вмещающих пород.

Полученные результаты открывают широкую возможность применения пенетрационного каротажа на месторождениях фосфоритов с получением значительного экономического эффекта за счет полного отказа от бурения скважин малого диаметра.

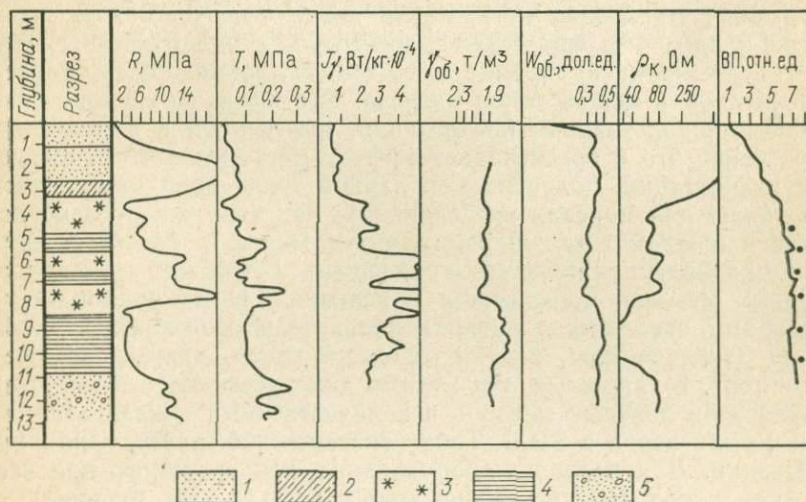


Рис. 75. Диаграммы пенетрационного каротажа в Канско-Ачинском районе на участке Назарово.

1 — суглинок; 2 — супесь; 3 — уголь

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПОЛЕВЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СВОЙСТВ ПОРОД. Как отмечалось выше, эффективность полевых методов по сравнению с лабораторными проявляется прежде всего в более быстром получении количественных показателей свойств пород, возможности получать их непосредственно в массиве, в том числе ниже уровня грунтовых вод и в морских условиях.

В качестве примера можно сравнить два способа определения объемной массы, влажности и других показателей в морских глинах: традиционным (бурение и отбор проб с лабораторными анализами) и пенетрационным каротажем. Только на бурение скважин и отбор проб при глубине воды около 30 м и проходке по грунту 25 м в условиях Цемесской бухты требуется около двух суток (без разводки якорей), а на выполнение подводного пенетрационного каротажа в тех же условиях — два часа. Отсюда большая зависимость первого варианта от погодных условий, подводных течений и других явлений и большая мобильность второго варианта.

А если принять во внимание то обстоятельство, что затраты на получение информации прямо пропорциональны времени нахождения судна на точке (амортизация судна), то становится очевиден и экономический эффект. Отсюда следует, что комплекс должен давать возможность получать максимум информации о показателях состава, состояния и свойств пород, которые желательно определять одновременно в одном и том же объеме пород.

Второй отличительной особенностью полевых методов группы зондирования и пенетрационного каротажа, обеспечивающей их эффективность, является возможность получения информации непрерывно по глубине погружения зонда (прессиометра, дилатометра и др.), что гарантирует, во-первых, стандартность получаемой информации по глубине и, во-вторых, возможность получения информации в любой точке разреза. Это очень важно при многократном использовании информации, полученной в данной точке. Собственно это и обеспечивает эффект многократного использования информации, полученной в данной точке один раз. Особенно это важно для морских исследований; при этом желательно получение в каждой точке информации не только о свойствах пород, но и о проявлениях полезных ископаемых. В-третьих, преимущество полевых методов проявляется в условиях, когда традиционными способами невозможно оценить показатели состояния и свойств пород (текучие илы, водонасыщенные пески, донные отложения водоемов). В-четвертых, эти методы дают возможность выражения результатов полевых методов в количественных показателях, пригодных для ввода в ЭВМ. Такая система практикуется, например, в Швеции. Для полевого оборудования, используемого при исследовании пород (зондирование, вращательный срез, бурение), создана единая приставка, которая одновременно с аналоговой регистрацией результатов обеспечивает ее запись на магнитную ленту, которая в последующем используется для ввода информации в

ЭВМ. Значительный эффект достигается при сочетании различных видов полевых работ. Как показала практика, комплекс полевых геофизических методов (ВЭЗ, ВП, ЭП и др.) используется при съемке для оценки общей ситуации и выбора характерных участков для более детальных исследований, пенетрационный каротаж — для определения непосредственно в полевых условиях основных показателей физико-механических свойств пород на этих участках, и лишь те показатели, которые не определяются геофизическими и пенетрационно-каротажными методами, оцениваются с помощью лабораторных исследований. Площадные геофизические работы, как правило, предшествуют пенетрационно-каротажным, а последние — традиционным. Естественно, что в зависимости от геологических условий может меняться сочетание указанных комплексов, но в принципе такая очередность должна сохраняться.

Пенетрационный каротаж, особенно при наличии связи, служит основой для интерпретации геофизических данных и дополнением к традиционным методам, что дает наибольший геолого-экономический эффект. Такое сочетание по сравнению с традиционным дает возможность в более короткие сроки получать большее число показателей, необходимых для решения инженерно-геологических задач, выбора оптимального варианта проектных решений, сокращения сроков инженерно-геологических изысканий и ускорения ввода в строй проектируемых объектов. Следует учитывать также, что применение пенетрационного каротажа сокращает в среднем до 50% число буровых скважин, которые нужно было бы пробурить при инженерно-геологических исследованиях.

В то же время современное оборудование, используемое для полевых исследований, как правило, имеет высокую производительность и должно быть обеспечено широким фронтом работ, т. е. эффективное использование техники зависит от форм организации работ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Успех дальнейшего развития полевых методов, позволяющих непрерывно по глубине получать комплексную информацию о породах в массиве, пригодную для многоцелевого и многоцветного использования, во многом зависит от уровня разработки технических средств.

В настоящее время ведутся работы по созданию установок типа СПК, СПК-Т и ПСПК, в которых базовыми способами проходки будут бурение или сочетание его с зондированием, что позволит изучать породы на глубинах до 500 м. Это особенно важно для работ на море. Планируемая разработка модульного варианта установок подобного типа решит проблему исследования оползневых склонов и труднодоступных районов Севера и Сибири.

Такие установки можно будет применять на всех стадиях инженерно-геологических изысканий для определения степени однородности пород и выделения инженерно-геологических элементов с оценкой показателей состава, состояния и свойств пород.

Одной из важнейших задач развития этого направления является совершенствование комплекса методов. Дополнение его электрометрическими методами даст возможность установить минерализацию порового раствора и выявить наличие металлоидов.

Акустическими методами можно более точно определить разновидность пород и оценить напряженное состояние их в массиве. Сочетание крыльчатки с датчиками нормального и порового давления позволит точнее прогнозировать устойчивость склонов, бортов карьеров, дамб, плотин и т. п.

Обработка первичной информации и ее интерпретация в настоящее время невозможны без применения электронно-вычислительной техники. Поэтому уже сейчас на судах, предназначенных для изучения шельфа, предусмотрена установка мини-ЭВМ для обработки данных подводного пенетрационного каротажа, то же самое планируется и на новой сухопутной буровой установке информационного назначения СБИ-120/100.

Важное место в общем комплексе исследовательских работ занимают метрологическое обеспечение и стандартизация. В настоящее время разработан и утвержден ГОСТ 25260—82 «Породы горные. Метод полевого испытания пенетрационным каротажом». Он регламентирует как методические, так и технические требования к пенетрационному каротажу и в сухопутном, и в подводном вариантах. Его направленность — обеспечить получение информации многоцветного использования на промышленной основе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Архангельский И. В.* Морское бурение инженерно-геологических скважин. Л., Недра, 1980.
2. *Бондарик Г. К., Комаров И. С., Ферронский В. И.* Полевые методы инженерно-геологических исследований. М., Недра, 1967.
3. *Бурдэ А. И.* Принципы и методика определения рационального комплекса исследований. Л., Недра, 1972.
4. *Васильев А. В.* Об изменении влажности глинистых грунтов в приствольной зоне буровых скважин. — В кн.: Материалы третьего межведомственного совещания по вопросам прогнозирования гидрогеологических, инженерно-геологических и почвенно-мелиоративных условий. М., 1977, с. 31—40. (Тр. ВНИИГИМ; вып. 3).
5. *Гречухин В. В.* Геофизические методы исследования угольных скважин. М., Недра, 1970.
6. *Грязнов Т. А.* Методические рекомендации по применению пенетрационного каротажа, обработке и интерпретации результатов. М., 1980.
7. *Дудлер И. В.* Комплексные исследования грунтов полевыми методами. М., Стройиздат, 1979.
8. *Зиангиров Р. С.* Нормирование и стандартизация инженерно-геологических изысканий. — Инженерная геология, 1980, № 4, с. 15—20.
9. *Инструкция по применению каротажных методов при инженерных изысканиях для строительства (РСН 46—49)/Под ред. В. В. Лисицына и Н. П. Кудрина.* — М., 1979 (ЦТИСИЗ).
10. *Итенберг С. С.* Интерпретация результатов каротажа скважин. М., Недра, 1978.
11. *Корчагин Г. П., Коренева С. Л.* Прессиометрия и вращательный срез в инженерной геологии. М., Недра, 1976.
12. *Ломтадзе В. Д.* Инженерная геология (инженерная петрология). Л., Недра, 1970.
13. *Маслов Н. Н., Котов М. Ф.* Инженерная геология. М., Стройиздат, 1971.
14. *Огильви Н. А.* Физические и геологические поля в гидрогеологии. М., Наука, 1974.
15. *Приймачук А. К.* Компенсационный измеритель пластового давления. Приборы для гидрогеологических и инженерно-геологических исследований. М., 1981, вып. 140, с. 55—59. (Труды ВСЕГИНГЕО).
16. *Рациональный комплекс полевых геофизических исследований при гидрогеологических и инженерно-геологических съемках масштаба 1:50 000 для целей мелиорации/Н. Н. Шарапанов, Г. Я. Черняк, Н. Н. Горяинов, А. В. Шавырина.* — М., 1974 (ВСЕГИНГЕО).
17. *Руководство по испытанию грунтов лопастными прессиометрами и прессиометрами-сдвигомерами/Л. С. Амарян, А. В. Васильев и др.* — М., 1981, (Госстрой СССР, ПНИИИС).
18. *Сергеев Е. М., Голодковская Г. А., Трофимов В. Т.* Грунтоведение. 3-е изд. М., Изд-во МГУ, 1971.
19. *Сергеев Е. М.* Инженерно-геологические аспекты рационального использования и охраны геологической среды. М., Наука, 1981.
20. *Терцаги К., Пек Р.* Механика грунтов в инженерной практике. М., Госстройиздат, 1958.
21. *Трофименков Ю. Г., Воробков Л. Н.* Полевые методы исследования строительных свойств грунтов. 2-е изд., М., Стройиздат, 1974.
22. *Ферронский В. И., Грязнов Т. А.* Пенетрационный каротаж. М., Недра, 1979.
23. *Филимонов Ю. Т., Островский Л. А., Дугина Н. Я.* Рекомендации по составлению геологических заданий на гидрогеологические и инженерно-геоло-

гические работы и поэтапному планированию их выполнения. М., 1973 (ВСЕГИНГЕО).

24. Юркиштович Ю. А. Полевые геотехнические методы и приборы для экспресс-определений физико-механических свойств и состояния грунта. Обзорная информация, 1980, № 10 (ЦБНТИ Минводхоза).

25. Kerisel I. Deformations et contraintes au voisinage des picux. Communication Soc. Int. belge mecanique sols, publ. par Assoc. belge pour l'essai et l'emploi des materiaux (ABEM). Bruxelles, 1953.

26. Procedures used to obtain soil parameters for foundation engineering in the North Sea. Marine Geotechnologie/Andersen A., Berre T., Kleven A. and Lunne T. III 1979, pp. 201—266.

27. Silvano Marchetti. In situ tests by flat dilatometer. Journal of the Geotechnical Engineering Division. March, 1980, pp. 299—321.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Введение	4
Глава 1. Показатели свойств пород	6
Глава 2. Методы и технические средства, применяемые для оценки показателей свойств пород	19
Исследование свойств пород в выработках	19
Опробование пород в выработках	31
Механический каротаж	32
Радиоизотопные методы	55
Сейсмоакустические исследования	60
Термометрия	61
Изучение свойств пород в процессе проходки	62
Зондирование	62
Исследование пород методами пенетрационного каротажа	73
Глава 3. Интерпретация и пути повышения информативности результатов полевых исследований	90
Применение электрометрии в пенетрационно-каротажном комплексе	92
Процессы, происходящие в грунтах при вдавлении зондов	105
Влияние параметров наконечников зонда на результаты зондирования	118
Влияние режима нагружения на показатели сжимаемости пород	125
Интерпретация результатов зондирования	130
Приемы интерпретации результатов пенетрационного каротажа	135
Расчленение разреза по диаграммам пенетрационного каротажа	138
Глава 4. Сочетание методов и технических средств в полевых исследованиях	146
Сочетание полевых методов	146
Некоторые результаты исследований	148
Сочетание методов в морских условиях	154
Сочетание методов на одной основе — способе проходки	159
Требования и основные правила сочетания полевых методов	166
Глава 5. Опыт применения пенетрационного каротажа	169
При инженерно-геологической съемке	170
Результаты работы СПК-Т в Литовской ССР	170
Результаты пенетрационно-каротажных работ на объектах Латвийской ССР	175
Использование пенетрационного каротажа совместно с ландшафтно-индикационными исследованиями	179
Исследование оползней	182
При исследовании донных отложений на шельфе	185
При поисках полезных ископаемых	188
При работах на угольных месторождениях	189
При работах на месторождениях фосфоритов	191
Заключение	194
Список литературы	195

Тихон Алексеевич Грязнов

ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ СВОЙСТВ ПОРОД
ПОЛЕВЫМИ МЕТОДАМИ

Редактор издательства О. Л. Виноградова
Обложка художника В. И. Боброва
Художественный редактор Е. Л. Юрковская
Технический редактор М. Е. Карева
Корректор И. Н. Таранева

ИБ № 4402

Сдано в набор 21.12.83. Подписано в печать 22.02.84. Т-06915. Формат 60×90¹/₁₆. Бумага
типографская № 3. Гарнитура «Литературная». Печать высокая. Усл.-печ. л. 12,5.
Усл. кр.-отт. 12,75. Уч.-изд. л. 13,93. Тираж 3900 экз. Заказ 991/8431-2. Цена 70 коп.

Ордена «Знак Почета» издательство «Недра», 103633, Москва, К-12,
Третьяковский проезд, 1/19

Московская типография № 6 Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
109088, Москва, Ж-88, Южнопортовая ул., 24.

ВНИМАНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ «НЕДРА»
ГОТОВЯТСЯ К ПЕЧАТИ НОВЫЕ КНИГИ

**Методическое пособие
по инженерно-геологическому изучению
горных пород
В 2-х томах**

Том I/Под ред. Е. М. Сергеева, В. И. Осипова, В. А. Королева.
2-е изд., перераб. и доп. 1984.
30 л. 2 р.

Изложены полевые методы изучения горных пород в инженерно-геологических целях: математические, наземных наблюдений, инженерно-геологического опробования горных пород, геофизические, аэрокосмические, пенетрационно-каротажные и др. Во 2-м издании (1-е изд. — 1968) учтены новейшие достижения в области инженерно-геологического изучения пород и опыт ряда производственных организаций.

Для специалистов геологических, изыскательских, научно-исследовательских, проектно-конструкторских и строительных организаций. Может быть использована в качестве учебного пособия студентами вузов геологических факультетов.

**Методическое пособие
по инженерно-геологическому изучению
горных пород
В 2-х томах**

Том II/Под ред. Е. М. Сергеева, В. И. Осипова, В. А. Королева.
2-е изд., перераб. и доп. 1984.
30 л. 2 р.

Описаны методы лабораторного изучения горных пород: минерального и химического состава, их структурных и текстурных признаков, плотности, пористости, деформационных прочностных, реологических и других свойств; поровых вод, газов и микроорганизмов и т. д. Во 2-м издании (1-е изд. — 1968) учтены новейшие достижения в области инженерно-геологического изучения горных пород и опыт ряда производственных организаций.

Для специалистов геологических, изыскательских, научно-исследовательских, проектно-конструкторских и строительных организаций. Может быть использована в качестве учебного пособия студентами вузов геологических факультетов.

РУБИНШТЕЙН А. Я., КУЛАЧКИН Б. И.

Динамическое зондирование грунтов

1984. 7 л., ил. — 35 к.

Описана история развития динамического зондирования грунтов, изложены теоретические основы метода, проанализированы основные установки, приборы и оборудование для производства динамического зондирования. Показаны пути и способы обработки и практического использования результатов зондирования. Даны рекомендации по оценке неоднородности грунтов, выделению инженерно-геологических элементов и другим вопросам конкретного использования динамического зондирования для целей инженерной геологии, мелниорации и строительства.

Для инженерно-технических работников геологических, изыскательских, научно-исследовательских, проектно-конструкторских и строительных организаций.

ТОЛСТЫХ Е. А., КЛЮКИН А. А.

**Методика измерения
количественных параметров
экзогенных геологических процессов**

1984. 8 л., — 40 к.

Приводится методика измерения количественных параметров селей, оползней, эрозии, выветривания, плоскостного смыва, движения курумов, необходимых для прогнозирования экзогенных геологических процессов и обоснования защитных мероприятий. Книга не имеет аналогов ни за рубежом, ни в СССР. Рассмотрены принципиально новые методы: косвенные, позволяющие проводить измерения за короткие промежутки времени; разовых измерений среднего-летних данных за современное и геологическое время; региональные. Приведены конкретные примеры из практики работ.

Для специалистов производственных и научных организаций; может быть использована в качестве учебного пособия студентами вузов и техникумов.

Интересующие Вас книги

Вы можете приобрести в местных книжных магазинах, распространяющих научно-техническую литературу, или заказать через отдел «Книга — почтой» магазинов:

№ 17 — 199178, Ленинград, В. О., Средний проспект, 61;

№ 59 — 127412, Москва, Коровинское шоссе, 20.

70 коп.

103
—
1

4256

НЕДРА