© Р.Ю. Жидков, С.А. Пуневский, А.Ю. Панфилов, 2007

УДК 550.38

Р.Ю. Жидков, С.А. Пуневский, А.Ю. Панфилов

ЗОНДИРОВАНИЕ НАМЫВНЫХ МАССИВОВ ТОНКОДИСПЕРСНЫХ ТЕХНОГЕННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

Семинар № 1

Для получения информации о состоянии и свойствах грунтов непосредственно в массиве исследования проводят в горных выработках (скважинах) или путем внедрения в массив специальных зондов. Особенностью методов зондирования является совмещение проходки пород с одновременной регистрацией показателей их состояния и свойств. В зависимости от способа внедрения зонда в массив различают статическое и динамическое зондирование, а также совмещённые и комплексные методы [2, 4, 5].

Сравнительно простым методом изучения состояния намывных масс гидроотвалов и хвостохранилищ является статическое зондирование, при котором в грунт с постоянной скоростью вдавливается специальный зонд с одновременным измерением сопротивления грунта вдавливанию. В результате получается удельное сопротивление грунта зондированию, равное общему усилию, приложенному к наконечнику, отнесенному к площади поперечного сечения наконечника. Конструкции зондов различных установок позволяют одновременно получать другие показатели статического зондирования - сопротивление трению грунта о боковую поверхность зонда или общее сопротивление породы внедрению зонда [1].

Для предварительного оконтуривания зон намывных массивов можно использовать установки динамического зондирования, да детальный анализ состояния намывных масс выполнять по результатам динамического зондирования. Динамическое зондирование конусом заключается в забивке (ударами молота) в грунт зонда, представляющего собой колонну штанг, оканчивающихся инвентарным (извлекаемым по окончании испытания вместе со штангами) или съемным (остающимся в грунте) коническим наконечником-конусом. Диаметр основания конуса обычно больше диаметра штанг. Забивку в грунт колонны штанг с конусом, диаметр основания которого равен диаметру штанг, называют испытанием грунтов стержневым зондом. Глубину погружения (забивки) зонда от определенного числа ударов (залога) и числа ударов, затрачиваемых на интервал погружения зонда (обычно 10 см), принято назы-вать показателями зондирования [1].

Наибольшее распространение получила методика испытаний, разработанная в Гидропроекте. Для, испытания применяют зонд, состоящий из штанг с наружным диаметром 42 мм, соединенных между собой, и конуса с диаметром основания 74 мм и углом раскрытия 60°.

Метод полевого испытания динамическим зондированием предусматривает возможность применения легкого и тяжелого оборудования, которое при одинаковой форме и размерах зонда и

штанг отличается массой ударника $P_{уд}$ и высотой его подъема h (соответственно $P_{уд}$ = 300 кг, h = 0,4 м и $P_{уд}$ = 1200 кг, h = 1 м). В результате испытаний получают показателя динамического зондирования, выраженные в числе ударов молота на каждые 10 см глубины погружения зонда. Путем пересчета эту величину переводят в силу, отнесенную на 1 $см^2$ поперечной площади наконечника зонда,

$$P_д = КП_0Фn/h \qquad (1)$$

где $P_д$ - условное динамическое сопротивление грунтов, К — коэффициент учета потерь энергии при ударе; $П_0$ - показатель удельной кинетической энергии; Ф - коэффициент учета трения штанг о грунт (по эксперименту); n - число ударов; h — глубина погружения зонда.

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 и в первую очередь трения.

За рубежом из методик динамического зондирования наиболее распространен стандартный метод испытания грунтов пенетрацией (SPT), заключающийся в стандартизации размеров забивного грунтоноса, груза и высоты его сбрасывания. 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 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 с подсчетом затраченных на это стандартных ударов.

Для исследования сжимаемости и прочности грунтов довольно широко применяют прессиометры, которые обычно состоят из наземного пульта управления и регистрации и цилиндрического зонда, погружаемого в скважину. На заданной глубине в зонд нагнетают газ или жидкость, измеряя соответствующие деформации стенок скважины. Зависимость в виде диаграмм «напряжение-деформация» интерпретируют относительно показателей сжимаемости пород.

Совершенствование метода 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.

Комплексное зондирование песчано-глинистых пород целесообразно выполнять с помощью самоходных установок, пригодных для вдавливания штанговых пьезодинамометров, пенетрометров-крыльчаток, каротажных зондов. Наиболее совершенной по техническому исполнению отечественной установкой этого типа является телеметрическая пенетрационно-каротажная станция (СПКТ), которая обеспечивает вдавли-

Рис. 1. Общий вид станции СПКТ

вание зондов на глубину более 30 м с осевой нагрузкой до 19 т и позволяет получать данные о влажности и плотности пород, литологическом разрезе, боковом и лобовом сопротивлении задавливанию зонда.

Дальнейшее развитие натурных методов связано с методами пенетрационного каротажа, отличительной особенностью которых является получение информации в ходе задавливания специальных устройств (зондов) в грунтовой массив.

Станция для пенетрационного каротажа (СПКТ) (рис. 1, 2) представляет собой смонтированный на автомобиле агрегат, включающий соответствующие устройства по задавливанию в массив зонда, креплению станции в определенном положении, манипулированию рабочим органом и управлению измерительной и регистрирующей аппаратурой. Станция СПКТ позволяет производить нейтрон-нейтронный каротаж (ННК), гамма-каротаж (ГК), гамма-гамма каротаж (ГГК); пенетрацию, а также (сменным зондом) — крыльчатое зондирование и измерение порового давления. Производительность СПКТ — до 200 м/смену. 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 работы вращательные (или другие) способы внедрения зонда, что дает возможность с принципиально новых позиций решать задачи геомеханического контроля. Сочетание методов пенетрации и радиоактивного каротажа позволяет получить в натурных условиях данные, необходимые, например, для оценки возможностей размещения сухих отвалов на гидроотвалах [1].

Для пенетрационного опробования песчано-глинистых пород в основаниях различных сооружений за рубежом ис-

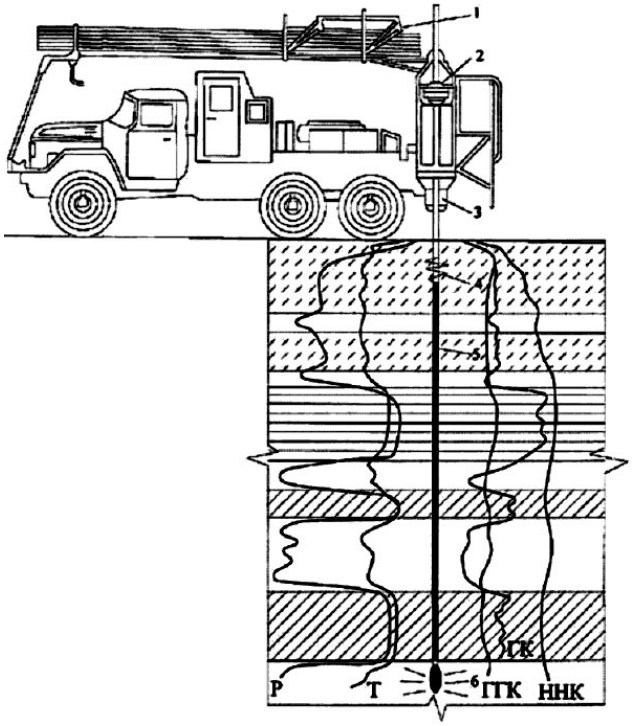

Рис. 2. Устройство станции СПКТ: *1* – манипулятор; *2* – вдавливающее устройство; *3* – проходной защитный контейнер; *4* – анкер; *5* – штанга; *6* – зонд

пользуются установки с усилением задавливания зонда до 200 кН фирм “Gouda”, “Fugro” (Голландия), “Geomil” (Дания), “Borros” (Швеция), “Pagani” (Италия), “A.P. van den Ber” (Голландия-США) и др. Эти установки, наряду с сопротивлением пенетрации, позволяют также оп-ределять поровое давление в водонасыщенных породах, однако существенным их минусом является невозможность бурения, что значительно сужает область их применения, значительно затрудняя их использование в условиях слоистого, в частности, глинисто-песчаного разреза [6, 8-10].

Возможности алмазного, колонкового, шнекового и вибрационного бурения и статического, динамического и шведского весового зондирования эффективно совмещены в модели GM 50 GT (рис. 3) производства финской фирмы “Geomachine Oy” и других станках этого модельного ряда, оснащённой CPTu зондом, позволяющим измерять лобовое сопротивление, боковое трение и поровое давление. Установка GM 50 GT экономична, обладает высокой проходимостью, небольшой массой (в зависимости от комплектации 1300-1800 кг без бурового инструмента) и малыми габаритами, опционально обладает возможностью электронной записи и компьютерной обработки результатов. Всё это позволяет говорить об этой комплексной установке как об оптимальном инструменте для зондирования глинистых намывных отложений [9].

Большое распространение на гидроотвалах получил метод вращательного среза, который для значительной части ядерных зон применяют с непосредственным задавливанием крыльчатого зонда (без бурения скважин).

Глинистые техногенные грунты обладают преимущественно водноколлоидными связями, дополняемыми с течением времени внутренними связями, характеризуемыми величиной сцепления упрочнения. Величина «вторичного» сцепления существенно зависит от состава грунта и уплотняющей нагрузки.

Обобщенной характеристикой сопротивления сдвигу является общее сопротивление сдвигающим напряже-ниям τ при различных нормально действующих уплотняющих напряжениях σ_n. Этот показатель обычно служит для оп-

Рис. 3. Многоцелевая буровая установка Gm 50 GT

ределения значений угла внутреннего трения φ и сцепления грунта С, являющихся прочностными характеристиками, используемыми в инженерных расчетах. Величины С и φ следует рассматривать как математические параметры прямолинейной диаграммы сдвига глинистых грунтов, соответствующие определенной их плотности. В общем виде в соответствии с законом Кулона зависимость между сдвигающими напряжениями и нормально действующим к ним уплотняющим напряжениям:

$$\tau = \sigma_n tg\varphi + C \qquad (2)$$

В жидкой фазе водонасыщенного грунта под действием физических полей возникает поровое давление, создающее напор в воде и соответственно ее фильтрацию, что обусловливает уплотнение грунта. Поэтому регистрация этого показателя может быть использована для прогноза поведения намывного грунта. Так, по величине порового давления $P_и$ возникающего при восприятии поровой водой внешней нагрузки, оценивается нестабилизированное состояние водонасыщенных грунтов в соответствии с принципом эффективных напряжений:

$$\tau = (\sigma_п - P_и)tg\varphi' + C' \qquad (3)$$

где τ — предел прочности на сдвиг $\sigma_п$, — полное нормальное напряжение; С и φ — соответственно сцепление и угол внутреннего трения, определяемые по эффективным напряжениям.

Как видно из выражения (3), по мере уплотнения и уменьшения давления в поровой воде предел прочности на сдвиг возрастает, приближаясь к величине с прочности полностью стабилизированной породы. Натурные измерения порового давления регистрируют и измеряют при помощи специальных первичных преобразователей различного типа. Наибольшее распространение получили датчики порового давления конструкции

Гидропроекта. Датчик представляет собой пьезодинамометр, принцип действия которого основан на струнном методе измерения малых деформаций. Пьезодинамометр состоит из мембраны, струны, натянутой между двумя встроенными в мембрану кронштейнами, и электромагнита и устанавливается в полом корпусе с перфорацией, заполненной фильтром (пористым камнем), обеспечивающим поступление поровой воды к мембране. Прогиб мембраны вызывает поворот кронштейнов, изменяя начальное напряжение в струне и частоте, ее собственных колебаний. Колебания струны вызываются периодически наводимым электромагнитным полем. Вследствие этих колебаний в катушке в свою очередь индуктируется ток, частота которого равна частоте собственных колебаний струны. После усиления ток преобразуется в колебания звуковой частоты. Для регистрации частоты колебаний струны используют частотомер, установленный на поверхности и связанный с датчиком электрическими кабелем. В основу работы частотомера положен принцип слушания затухающих собственных колебаний струны датчика на фоне звука генератора. По собственной частоте струны с помощью градуировочной кривой пьезодинамометра определяется поровое давление.

При установке датчиков в намывные отложения методом задавливания особое внимание следует уделять сохранности приборов от механического повреждения при их внедрении в породный массив. Для защиты датчиков используются как перфорированные металлические капсулы с конусом, так и специальные зондировочные снаряды, содержащие устройства для измерения порового давления. Размещение датчиков в массивах возможно либо с применением специальных задавливающих установок, либо посредством буровой техники, используемой для инженерно-геоло-гических изысканий. Во ВНИМИ Ю.И. Кутеповым разработана легкая зондировочная установка УГК-1, с помощью которой можно опробовать труднодоступные гидроотвальные участки с несущей способностью $P_{доп} \geq 0{,}013\text{-}0{,}015$ МПа. Следует отметить, что современная техника в болотоходном исполнении имеет удельные нагрузки не менее 0,025 МПа. Установка включает в себя два типа задавливающих механизмов: механический и электромеханический. Первый имеет редуктор, позволяющий создавать нагрузку до 2 т при двух скоростях зондирования 0,1 и 0,5 м/мин, а второй обеспечивает нагрузку задавливания до 5 т при тех же скоростях [1, 3].

Для массовых измерений порового давления $P_и$ в глинистых грунтах наиболее пригодны штанговые пьезодинамометры, позволяющие осуществлять как зондирование, так и стационарные измерения порового давления. В процессе экспериментальных исследований была разработана конструкция оголовков штанговых пьезодинамометров, обеспечивающая эффективное извлечение их и многократное использование при стационарных измерениях. Создана также конструкция кассетного зонда для одновременного измерения порового давления в точках, расположенных на различных глубинах, что обеспечивает двух-трехкратное ускорение определения степени уплотнения глинистых слоев благодаря уменьшению затрат времени на стабилизацию показаний штанговых пьезодинамометров после их задавливания. При проведении натурных измерений с применением струнной аппаратуры необходимо производить уточнение с учетом специфики формирования намывных горнотехнических со-

оружений, включающее в себя установку режима зондирования намывных масс и оснований различного литологического состава; оценку инерционности измерений пьезодинамометров и грунтовых динамометров в зависимости от условий их закладки.

Опыт инженерных изысканий показывает, что дальнейшее совершенство-вание натурных исследований и повышение их технико-экономической эффективности могут быть обеспечены на основе новой прогрессивной технологии, предусматривающей возможность сочетания различных методов, их совмещения и взаимного дополнения в едином технологическом процессе. Так в практике инженерных изысканий намывных глинистых грунтов складывается устойчивая тенденция перехода к так называемому комплексному скважинному зондированию, при проведении которого получают информацию о состоянии грунтов (по величине $P_и$), их прочностных (по величинам τ, C, φ) и деформационных (по величине модуля деформации E) свойствах. Для этой цели в МГИ-МГГУ разработан ряд модификаций комбинированных зондов для определения параметров прочностных свойств и величины порового давления.

Зонд для комплексного зондирования включает в себя корпус, продольные лопасти и измеритель порового давления с приемными фильтрами и измерителем давления жидкости с датчиком. В полом корпусе, снабженном коническим наконечником, размещен измеритель давления жидкости и на наружной поверхности закреплены продольные лопасти. Приемные филь-тры выполнены в виде пористого камня, заполняющего расположенные между продольными лопастями радиальные отверстия в корпусе устройства.

Опыт зондирования водонасыщенных техногенных отложений на ряде объектов КМА и Кузбасса показал, что недостатком подобного устройства является существенная инерционность системы измерения действующего порового давления. Подобное явление обусловлено тем, что при задавливании зонда в водонасыщенный глинистый грунт вблизи устройства возникают зоны напряжений и благодаря этому местное повышение порового давления. При низких коэффициентах фильтрации (порядка $1*10^{-8}$ м/с) это дополнительное давление, достигающее десятков процентов от измеряемого, выравнивается с давлением, действующим в невозмущенной устройством зоне только через длительное время (так называемое время консолидации). Последнее находится в квадратичной зависимости от характерного размера (толщины) зоны концентрации, примыкающей к приемным фильтрам. Так как для цилиндра характерный размер равен радиусу, размещение приемных фильтров на наружной поверхности полого корпуса сравнительно большого радиуса ведет к существенному возрастанию времени консолидации, а, следовательно, к инерционности системы измерения порового давления.

Кроме того, инерционность устройства обусловлена потреблением измерителем давления жидкости некоторого объема жидкости, определяемого прогибом его мембраны в процессе измерения. Скорость заполнения этого объема пропорциональна суммарной площади приемных филь-тров, которая на поверхности полого корпуса с закрепленными продольными лопатками оказывается недостаточной. С целью повышения достоверности регистрируемых параметров МГИ совместно с Гидропроектом разработана конструкция подобного устройства.

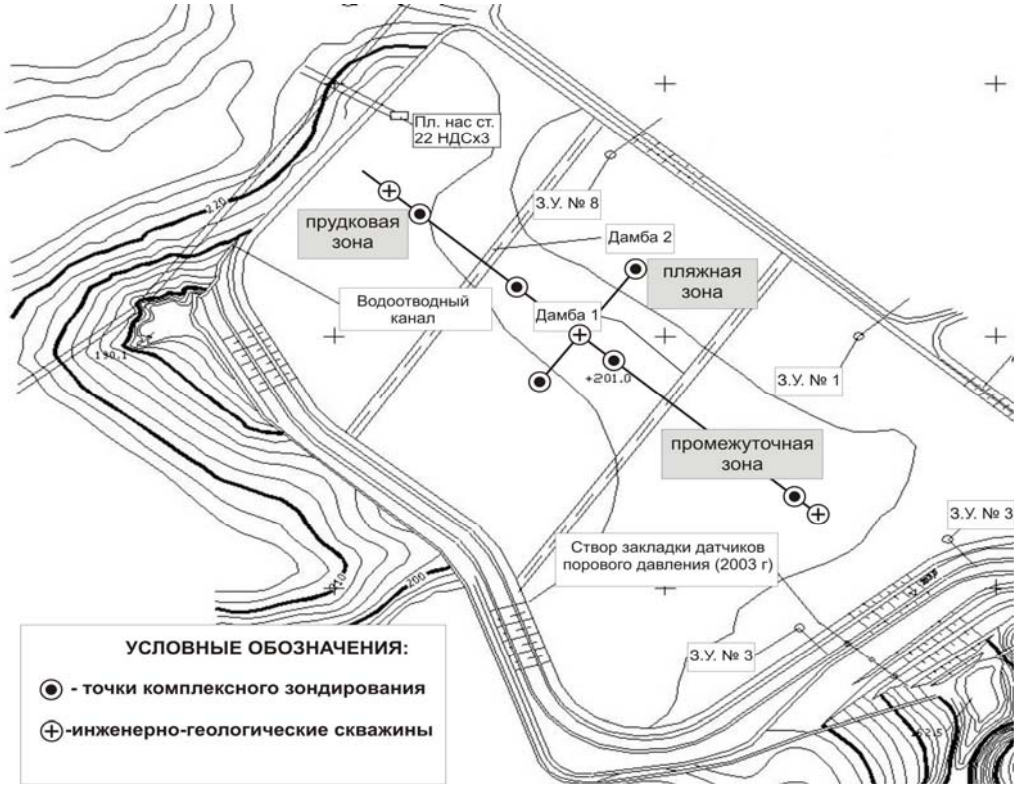

Рис. 4. Схема предварительного инженерно-геологического районирования гидроотвала «Балка Суры» с нанесёнными предполагаемыми профилями комплексного зондирования и инженерно-геологического бурения

Конструктивно зонд выполнен в виде полого корпуса с наконечником, на котором закреплены четыре взаимно перпендикулярные продольные лопасти. Датчик порового давления размещается внутри корпуса и посредством приемных фильтров и каналов в лопастях гидравлически связан с внешней средой, воспринимая давление поровой жидкости. Система каналов и фильтр заполнены невытекающей дегазированной жидкостью, что обеспечивает минимальное время передачи давления в порах грунта на датчик. При изготовлении опытных образцов комбинированного зонда учтены технические требования, изложенные в ГОСТ 21719-80 (Грунты. Метод полевого испытания вращательным срезом), а также метрологические условия, предъявляемые к аппаратуре подобного типа.

Комплексное зондирование выполняется в такой последовательности: 1) комбинированный зонд монтируется на буровой штанге и постепенно, с заданным шагом, задавливается в техногенный массив, измеряется усилие задавливания зонда до точки опробования; 2) выжидается стабилизация колебаний струны датчика порового давления, вызванных механическими напряжениями корпуса зонда в ходе задавливания, время стабилизации изменяется в широких пределах (1—15 мин.) и зависит от кон-

систенции отложений, что учитывается в процессе тарировочного зондирования; 3) измеряется величина порового давления $P_и$ путем под-ключения кабельного вывода датчика к частотомеру (например, типа ПЦП-1 конструкции Спецэнергоавтоматики); 4) производится срез лопастями крыльчатки с измерением усилия среза F и соответствующего l рычага. По регистрируемой величине $P_и$ оценивается нестабилизированное состояние зондируемых отложений, используя для этого зависимость (3).

Опыт зондирования намывных массивов тонкодисперсных техногенных отложений будет использован в процессе уточнения результатов инженерно-геологического районирования территории гидроотвала «Балка Суры» (КМА). Предварительное районирование было основано на данных точечного опробования намывного массива с учётом существующей схемы намыва (рис. 4). Зондирование предполагается производить зондом МГГУ с использованием буровой техники и установки УГК-1 в пляжной зоне. По результатам зондирования будет осуществлено определение физико-механических свойств грунтов и уточнение пространственного положения зон. Материалы инженерно-геологического районирования гидроотвала будут использованы при разработке специальной технологии намывных работ, обеспечивающей ускоренную рекультивацию гидроотвалов и при определении режима возведения дренажных элементов, устанавливаемых дифференцировано для различных зон гидроотвалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гальперин А.М.* Геомеханика открытых горных работ. М., изд-во МГГУ, 2003, 473 с.
2. *Гальперин А.М., Зайцев В.С., Норватов Ю.А.* Гидрогеология и инженерная гидрогеология. М., Недра, 1989, 383 с..
3. *Кутепов Ю.И., Кутепова Н.А.* Изучение порового давления в намывных массивах // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология, 2006, № 2, с 156-166.
4. *Грязнов Т.А.* Оценка показателей свойств пород полевыми методами. М., Недра, 1984, 197 с.
5. *Полевые* методы инженерно-геологических изысканий. В.И. Лебедев, В.В.Ильичев, К.П.Швецов, А.Т. Индюков. М., Недра 1988, 144 с.
6. http://www.apvdberg.nl
7. http://www.geomachine.com
8. http://www.geomil.com
9. http://www.gouda-geo.com
10. http://www.pagani-geotechnical.com

ГИАБ

Коротко об авторах

Жидков Р.Ю., Пуневский С.А., Панфилов А.Ю. – Московский государственный горный университет.