

## **Глава 10. БУРОВОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ГРУНТОВ**

В настоящее время наиболее популярными методами исследований свойств грунтов в полевых условиях являются методы статического и динамического зондирования. Как было показано в предыдущих главах методы статического и динамического зондирования успешно применяются при проведении инженерно-геологических исследований, как в России, так и за рубежом.

Наибольшее применение на практике находит метод статического зондирования. Основным достоинством этого метода является простота и производительность испытаний. К его недостаткам можно отнести сложность или невозможность испытаний в «жестких» грунтах и сложность интерпретации данных измерений вследствие использования корреляционных зависимостей. Поэтому метод статического зондирования используется чаще всего для выделения слоев природных дисперсных грунтов и определения некоторых механических характеристик преимущественно песчаных грунтов.

Как правило, корреляционные связи находятся из результатов испытаний искусственно приготовленных песчаных грунтов на калибровочном стенде или в приборах трехосного сжатия. Например, в программе NovoCPT ([www.novotechsoftware.com](http://www.novotechsoftware.com)) используется 285 корреляционных зависимостей для определения 35 физических и механических характеристик грунтов на основе результатов измерений лобового сопротивления, трения по боковой поверхности и порового давления. В то же время зонды – это дорогие инструменты, имеющие ограниченные ресурсы и подверженные риску преждевременного выхода из строя при наличии в грунте твердых включений, а также при небрежном манипулировании.

В последние годы инструменты зондирования были значительно усовершенствованы – внедрены беспроводные системы передачи данных измерений на поверхность грунта, системы непрерывного наращивания штанг, контроль технического состояния зонда и др. Однако остались проблемы, связанные с ограниченностью ресурсов и риском потери дорогих зондов. Поэтому специалисты с большим опытом изыскательских работ все чаще вспоминают о буровом зондировании (Архангельский, 2012).

В 1989 году специалисты ПНИИИС (Кальбергенов Р.Г. и Кушнир Л.Г.) впервые предложили новый метод – «буровое зондирование». Сущность метода заключается в измерении работы, которая затрачивается на погружение сплошного шнека при бурении скважины. Кроме работы, при бурении регистрируется скорость вращения бурового инструмента, величина

погружения шнека, скорость погружения шнека и усилие задавливания. Работа измерялась с использованием моментомера, конструкция которого показана на рис. 10.1, а результаты его применения на рис. 10.2.

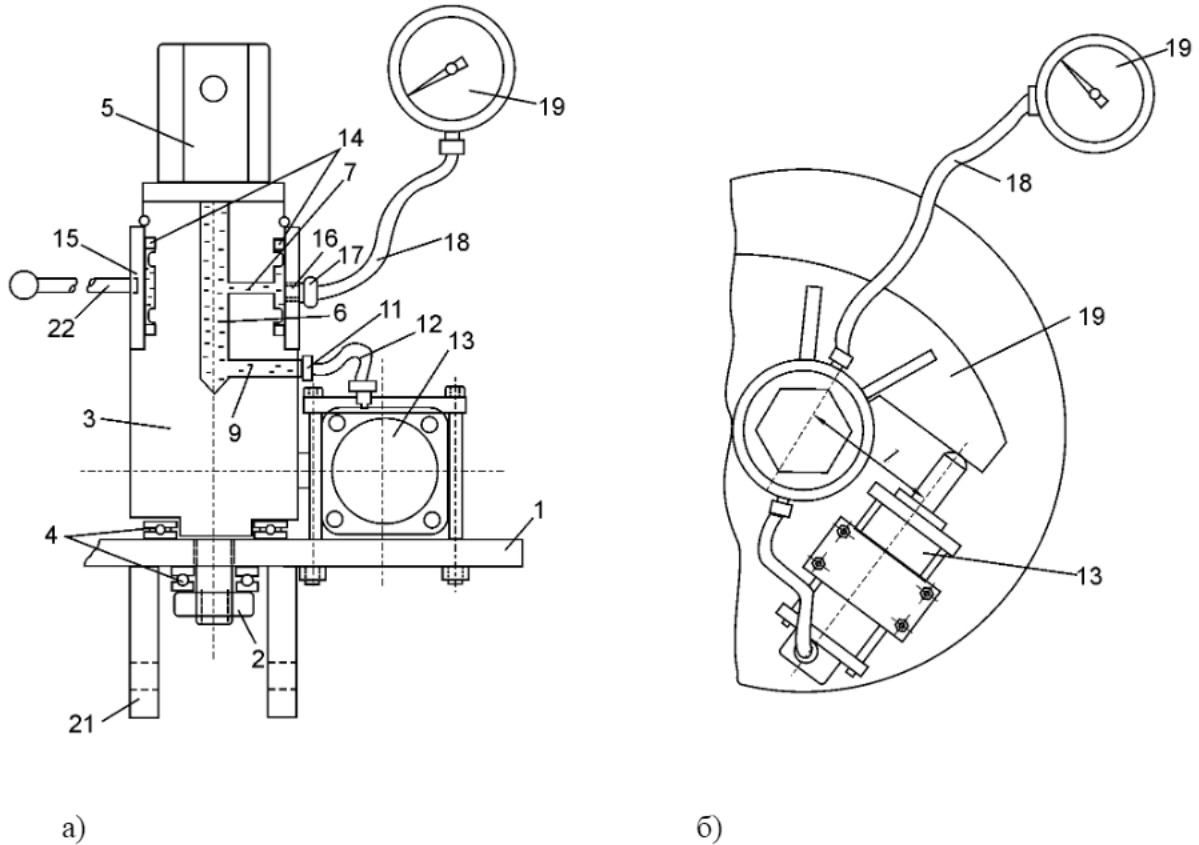


Рис. 10.1. Конструкция моментомера (ПНИИИС, 1989):

а – вид сбоку; б – вид сверху:

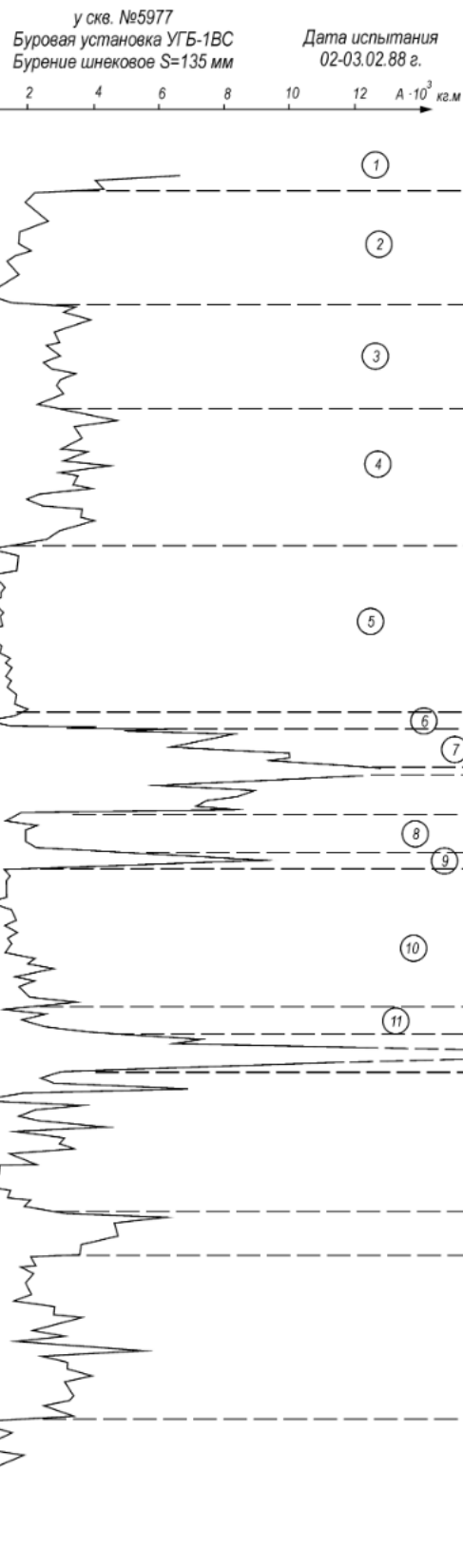
- 1 – днище; 2 – гайка; 3 – шток; 4 – подшипник; 5 – шестигранник;  
 6 – центральная проточка; 8 – круговая выемка; 9 – радиальный канал;  
 12, 18 – магистрали; 13 – гидроцилиндр; 14 – сальник; 15 – втулка;  
 19 – манометр; 21 – переходник

Испытания, выполненные ПНИИИС, показали ряд преимуществ метода бурового зондирования перед другими методами полевых испытаний грунтов, в том числе и перед статическим зондированием. К основным его преимуществам следует отнести:

- высокую производительность;
- большую глубину зондирования;
- высокую защищенность средств измерения: датчики не погружаются в грунт и не страдают от столкновений с твердыми включениями (щебнем, галькой, обломками бетона);

| Подошва слоя, м    |         | Глубина, м | Мощность, м | Описание грунтов  | Геологический разрез | Уровень воды, м |
|--------------------|---------|------------|-------------|---|----------------------|-----------------|
| Абсолютная отметка | Глубина |            |             |   |                      |                 |
| 1257.84            | 1.8     | 1.8        |             | Насыпной грунт: щебенистый грунт с глыбами (обломки) до 70% выветренный гранодиорит. Заполн. - 30% супесь.  |                      |                 |
| 1257.74            | 2.2     | 0.4        |             | Песок пылеватый, сезонномерзлый   |                      |                 |
| 1244.44            | 15.0    | 12.8       |             | Песок пылеватый, светло-серый, с глубины 6,8 м серый с прослойками супеси синевато-серой, твердой. Песок маловлажный с глубины 9,6 м влажный, средней плотности; на глубине 9,4-9,6 м прослой супеси синевато-серой |                      | 15.7            |
| 1242.95            | 16.5    | 1.5        |             | Супесь темно-серая, слоистая, пластичная, до текущей  |                      |                 |
| 1238.44            | 21.0    | 4.5        |             | Песок пылеватый, желто-серый, синевато-серый, слоистый, водонасыщенный с прослойками супеси пластичной  |                      |                 |
| 1235.44            | 14.0    | 3.0        |             | Суглинок синевато-серый, мерзлый, слоистый, влажный.  |                      |                 |
| 1234.04            | 25.4    | 1.4        |             | Песок пылеватый, желтовато-серый, слоистый, влажный   |                      |                 |
| 1233.24            | 26.2    | 0.8        |             | Песок пылеватый, серый, слоистый, прослой мерзлый   |                      |                 |
| 1232.84            | 26.6    | 0.4        |             | Супесь слоистая, пластичная   |                      |                 |
| 1230.14            | 29.3    | 2.7        |             | Песок пылеватый, серый, сильно глинистый, водонасыщенный  |                      |                 |
| 1227.84            | 31.6    | 2.3        |             | Супесь серая, слоистая, пластичная с глубины 31.0 м текучая, с прослойками песка пылеватого, водонасыщенного  |                      |                 |
| 1227.74            | 31.7    | 0.1        |             | Супесь мерзлая, слоистая  |                      |                 |
| 1227.14            | 32.3    | 0.6        |             | Лед прозрачный с алуитом - 10-15%   |                      |                 |
| 1225.24            | 34.2    | 1.9        |             | Песок пылеватый, серый, слоистый, с прослойками супеси, мерзлый, криотекстура массивная, с 33 м шпирювая  |                      |                 |
| 1221.04            | 38.4    | 4.2        |             | Супесь синевато-серая, слоистая, с прослойками песка пылеватого глинистого и прослоем суглинка, твердая (в кровле) до пластичной  |                      |                 |
| 1218.24            | 41.2    | 2.8        |             | Песок пылеватый, серый, темно-серый, глинистый, водонасыщенный с прослойками супеси пластичной  |                      |                 |
| 1211.44            | 48.0    | 4.8        |             | Супесь серая, темно-серая, до синевато-серой, слоистая, пластичная, с прослойками песка пылеватого, водонасыщенного по 1-2 см, иногда 8-12 см   |                      |                 |
| 1208.64            | 60.8    | 2.8        |             | Суглинок серый, темно-серый, слоистый с прослойками песка водонасыщенного   |                      |                 |
| 1208.04            | 51.4    | 0.6        |             | П-р-сл. - суглинок слаботорффов.  |                      |                 |
| 1207.44            | 52.0    | 0.6        |             | Супесь с дресвой до 25%   |                      |                 |

а)



б)

Рис. 10.2. Результаты бурового зондирования ПНИИС (ПНИИИС, 1989): а – литологическая колонка; б – работа, затрачиваемая при погружении шнека

- высокую защищенность средств измерения, что позволяет проводить зондирование в акваториях;
- отсутствие необходимости применять буровые станки с большой массой;
- возможность исследования не только дисперсных, но и скальных и мерзлых грунтов.

### *Технические средства*

Современные технологии – компьютеры, микропроцессоры, лазерная дальнометрия и беспроводная связь – позволяют реализовать преимущества метода бурового зондирования в виде информационно-измерительной системы, предназначенной для оснащения буровых установок и измерения: момента вращения; вертикального усилия, действующего на буровой инструмент; частоты вращения; скорости погружения.

Подобные измерительные системы используются несколько десятилетий при бурении скважин нефтяниками, геофизиками, на карьерах и в ряде других случаев. При бурении скважин собирается информация непосредственно с датчиков бурового станка в процессе бурения скважин, характеризующая энергоемкость процесса бурения. Измеряемые в процессе бурения параметры отражают свойства горных пород, состояние бурового инструмента и скважины.

Буровики используют для этой цели специальные системы сбора данных с датчиков различного назначения. Одной из подобных систем сбора данных является автоматизированная система сбора данных с буровых станков КОБУС® (Коваленко, 2011).

Одним из элементов данной системы является автоматизированная система сбора и передачи данных с бурового станка (АССД БС), включающая:

- контроллер бурового станка;
- датчики;
- оборудование беспроводной передачи данных;
- приемник и антенны глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС);
- GPS/ГЛОНАСС;
- программный пакет для диспетчерского пункта карьера;
- пакет клиентских программ для работы с данными, создаваемыми и накапливаемыми в процессе эксплуатации комплекса.

Оборудование АССД БС устанавливается на буровых станках и способно функционировать при непрерывной круглосуточной и круглогодичной эксплуатации в условиях запыленности и выдерживать значительную вибрацию.

«В основу системы сбора данных с буровых станков положена методика определения прочностных характеристик массива по данным

энергоёмкости бурения. Одним из важнейших энергетических показателей является удельная энергия бурения, которая зависит от нагрузки на долото, сечения скважины, скорости вращения долота, вращающего момента долота, скорости проходки, вибрации бурового станка (рис. 10.3). По этим параметрам можно отслеживать технологические свойства породы, а также идентифицировать породы и крупные трещины. В системе разработана аппаратура регистрации параметров бурения с последующим определением прочностных характеристик породы» (Коваленко и др., 2011).

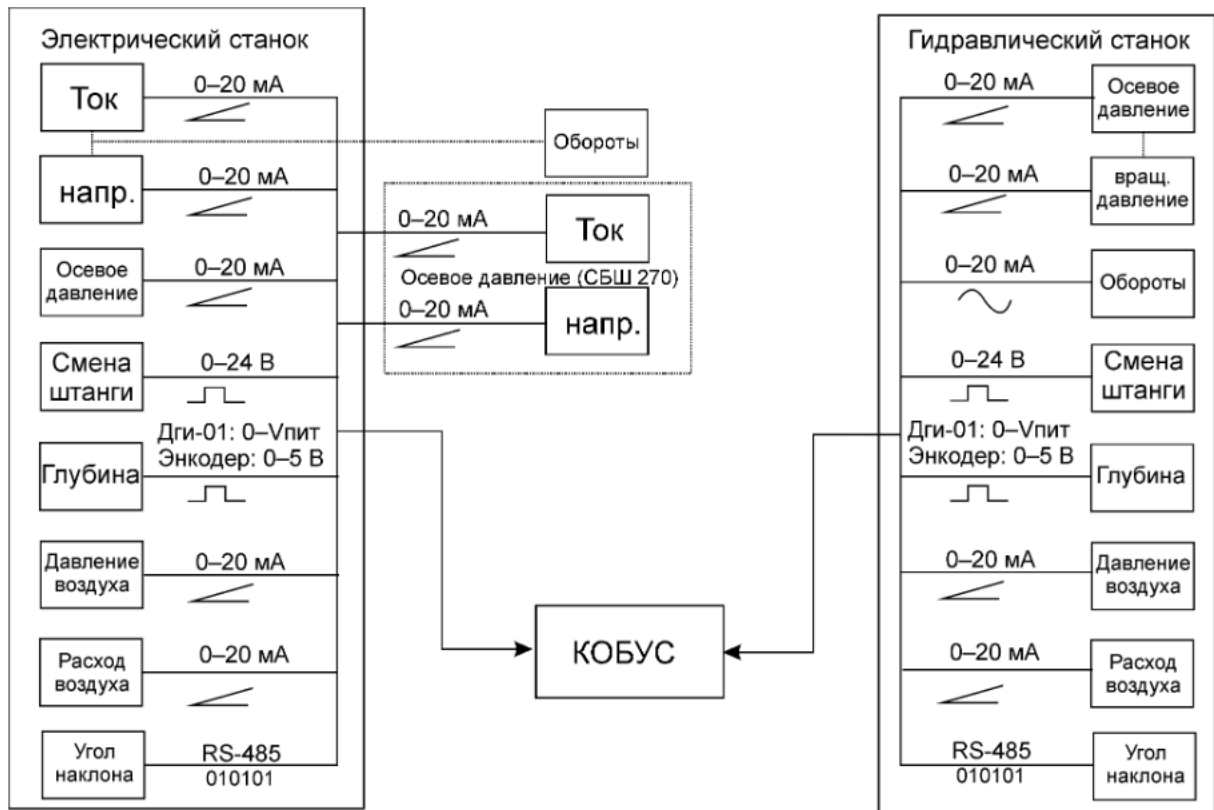


Рис. 10.3. Структурная схема подсистемы сбора данных на буровом станке

Специалистами ООО «НПП «Геотек» в 2012 году была разработана подобная измерительно-информационная система (рис. 10.4, 10.5), которая имеет следующий состав:

- датчик силы вертикальной нагрузки;
- датчик момента вращения;
- датчик поступательного продвижения колонны шнеков в виде лазерного дальномера;
- модуль усиления сигналов с датчиков и их преобразования в цифровой вид;
- модуль беспроводной передачи данных измерений;
- портативный компьютер и программное обеспечение.

Для тарирования датчиков системы предусмотрена специальная стендовая аппаратура.

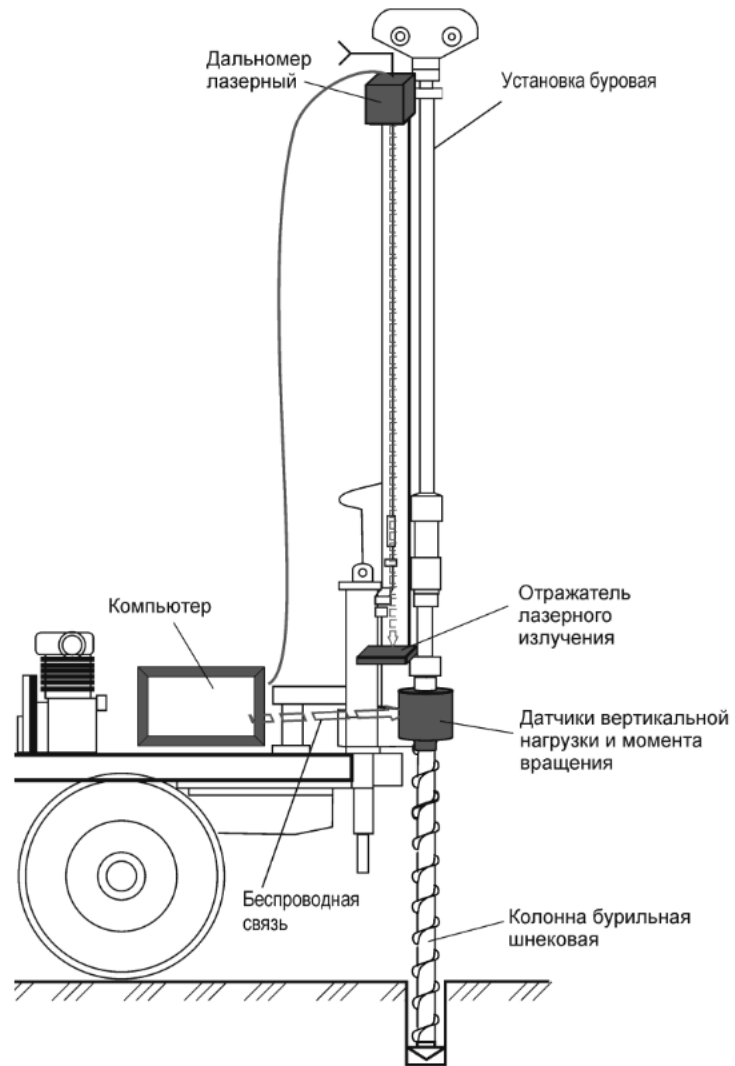
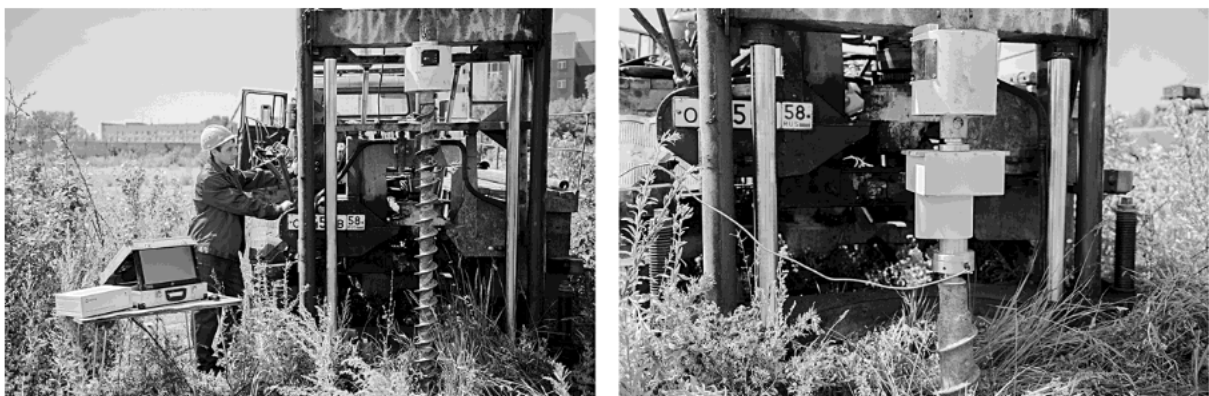


Рис. 10.4. Схема буровой установки, оснащённой информационно-измерительной системой, разработанной ООО «НПП «Геотек»



а)

б)

Рис. 10.5. Полевые испытания:  
а – буровое зондирование; б – буровое зондирование и пенетрация

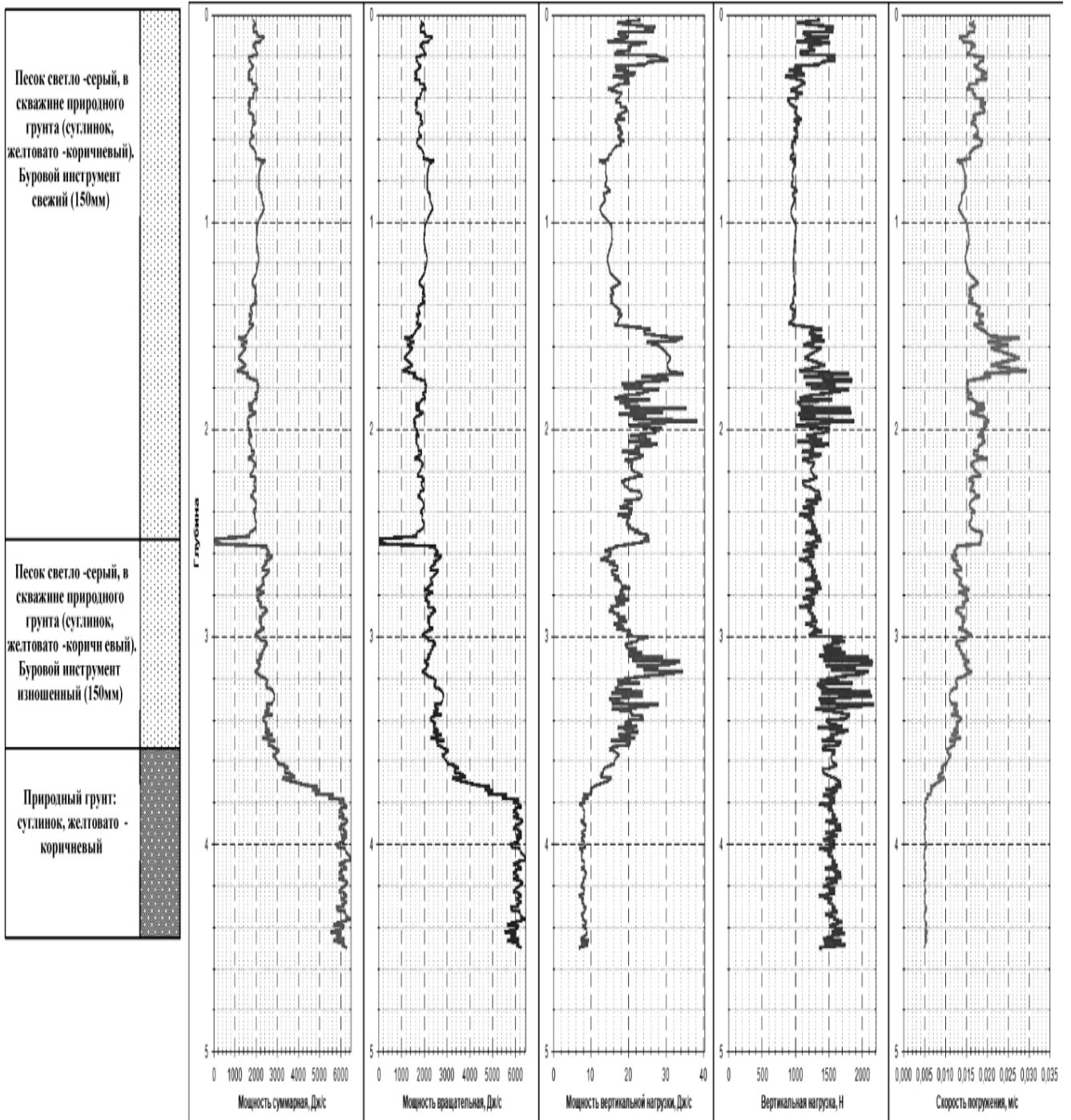


Рис. 10.6. Профиль параметров зондирования

В ООО «НПП «Геотек» были выполнены работы по оценке способности указанной системы расчленять грунтовые толщи на отдельные слои. Бурение проводилось долотами диаметром 150 мм с разной степенью изношенности.

Результаты исследований приведены на рис. 10.6. Из рис. 10.6 видно, что на границе различных слоев грунта наблюдаются изменения значений параметров зондирования.

Измерительная система интерпретирует глубину залегания и плотность слоев грунта в виде зависимости мощности (скорости вращения бурового инструмента и вертикального усилия задавливания) от глубины проходки.

### **Методика испытаний**

Использованная установка для бурового зондирования включает в себя транспортное средство, мачту, вращатель, буровую колонну, бурильное долото, информационно-измерительную систему. Испытания грунтов с ее помощью проводятся следующим образом.

#### *Выделение слоев грунта*

В точке исследований свойств грунтов устанавливают транспортное средство с установкой для бурового зондирования. Производят подъем мачты, на которой расположен вращатель. Хвостовик узла датчиков вставляют в патрон бурового станка, и соединяют с хвостовиком бурового шнека, на нижней части которого закреплено бурильное долото (буровой инструмент). Лазерный дальномер и отражатель закрепляют на мачте. Затем включают компьютер и автономные источники питания лазерного дальномера и измерительного устройства, после чего начинают бурение скважины. Бурение производится с постоянной частотой вращения  $\omega$  бурового инструмента.

В процессе зондирования в базу данных компьютера заносят: время погружения бурового инструмента  $T$ , показания датчика силы вертикальной нагрузки  $F_v$ , показания датчика моментомера  $F_m$  и величину вертикального перемещение буровой колонны  $L$ .

Используя данные измерений, вычисляют:

1) вертикальную нагрузку:

$$N = F_v + G, \quad (10.1)$$

где  $F_v$  – величина нагрузки, измеренная датчиком силы вертикальной нагрузки, Н;  $G$  – вес буровой колонны, Н;

2) скорость продвижения бурового инструмента:

$$V = \Delta S / \Delta T, \quad (10.2)$$

где  $\Delta S$  – вертикальное перемещение буровой колонны с момента предыдущей записи в протокол, м;  $\Delta T$  – время прохождения расстояния  $\Delta S$ , с;

3) мощность вертикальной нагрузки на текущей глубине:

$$P_v = NV, \quad (10.3)$$



где  $N$  – текущая вертикальная нагрузка, Н;  $V$  – текущая скорость продвижения бурового инструмента, м/с;

4) крутящий момент:

$$M = F_m k, \quad (10.4)$$

где  $F_m$  – показание датчика силы, Н;  $k$  – плечо силы, м;

5) мощность вращательной нагрузки на текущей глубине:

$$P_r = M \cdot 2\pi\omega, \quad (10.5)$$

где  $M$  – текущий крутящий момент, Н·м;  $\omega$  – частота вращения бурового инструмента, с<sup>-1</sup>.

Измерение частоты вращения бурового инструмента  $\omega$  основано на способности модуля беспроводной связи измерять мощность радиосигнала и передавать эту информацию на персональный компьютер. Узел осуществляет прием радиосигналов с заданной частотой (10; 25; 50; 100; 250 Гц и т.д.) и передает информацию в пакетной форме. Каждый пакет содержит значение уровня мощности принимаемого сигнала – RSSI (Received Signal Strength Indication) (Поникар и др., 2010). При вращении измерительного устройства происходит периодическое изменение модуляции этой величины. Частота первой гармоники модулированного сигнала соответствует частоте вращения бурового инструмента.

Процедура сбора и обработки данных включает три этапа: (1) накопление выборки RSSI; (2) получение спектра частот путем расчета быстрого преобразования Фурье (FFT); (3) анализ спектра – выявление первой гармоники, частота которой соответствует частоте вращения.

Суммарная мощность на текущей глубине:

$$P_t = P_v + P_r, \quad (10.6)$$

где  $P_v$  – мощность вертикальной нагрузки, Дж/с;  $P_r$  – мощность вращательной нагрузки, Дж/с.

*Определение модуля деформации грунтов*

В точке исследований устанавливают транспортное средство с установкой для бурового зондирования, поднимают мачту с вращателем, вставляют шестигранник узла датчиков в патрон бурового станка, а переходник – в буровую штангу или шнек, закрепляют на мачте лазерный дальномер и отражатель, включают компьютер и автономные источники питания лазерного дальномера и измерительного устройства и начинают процесс бурения.

На заданной глубине определения модуля деформации проводится холостое прокручивание буровой колонны и ее подъем на 10–20 см от забоя скважины, после чего вращатель бурового станка выключается.

Используя датчик силы, измеряют суммарный вес буровой колонны  $G$  и грунта на боковой поверхности буровой колонны  $N_{гр}$ :

$$Q = G + N_{гр}. \quad (10.7)$$

Буровую колонну опускают до касания забоя скважины и, используя узел датчиков, прикладывают первую ступень нормального давления  $p_0$ , величину которой получают из следующего выражения:

$$p_0 = \gamma z - \frac{Q}{B}, \quad (10.8)$$

где  $B$  – площадь поперечного сечения бурильного долота;  $\gamma$  – удельный вес грунта;  $z$  – глубина от поверхности грунта до точки определения модуля деформации.

В процессе нагружения при помощи лазерного дальномера и датчика силы измеряют вертикальное перемещение (осадку) буровой колонны  $s_i$  и контролируют постоянство заданной ступени давления  $p_i$  при помощи шагового двигателя и датчика силы.

После стабилизации осадки от первой ступени нагружения ее значение записывают в базу данных, по команде компьютера включают шаговый двигатель и создают ступень давления

$$p_i = p_0 + \Delta p_i, \quad (10.9)$$

где  $\Delta p = 0,25\gamma z - \frac{\Delta N_i}{B}$ ,  $\Delta N_i$  – вертикальная нагрузка.

Далее продолжают испытания до величины суммарного давления, равной  $p_i = p_0 + \gamma z$ .

На основе результатов измерений строят график зависимости вертикального перемещения буровой колонны от давления  $s = f(p)$  и, используя решение Шлейхера, находят модуль деформации по формуле (7.1).

### ***Сравнение результатов испытаний различными методами***

В 2012 году на площадке ООО «НПП «Геотек» был проведен комплекс полевых и лабораторных испытаний грунтов с целью оценки различных методов испытаний.

Программа исследований включала следующие методы испытаний:

- отбор монолитов грунта на глубину до 20 м;
- определение физических свойств грунтов с построением инженерно-геологического разреза с использованием классификационных показателей грунтов;
- определение прочностных и деформационных свойств грунтов в лабораторных условиях, методами компрессионного сжатия, одноплоскостного сдвига и трехосного сжатия;
- выделение слоев грунта на глубину до 20 м с использованием методов статического, динамического и бурового зондирования;
- испытания винтовым штампом и сплошным шнеком с целью определения модуля деформации и недренированной прочности глинистого грунта;
- нахождение корреляционных связей между результатами лабораторных и полевых испытаний для определения прочностных и деформационных свойств грунтов.

### Инженерно-геологические условия площадки ООО «НПП Геотек»

На площадке были пробурены три скважины на глубину до 20 м, колонковым способом отбораны монолиты грунта и выполнен комплекс лабораторных испытаний с целью определения физико-механических свойств грунтов.

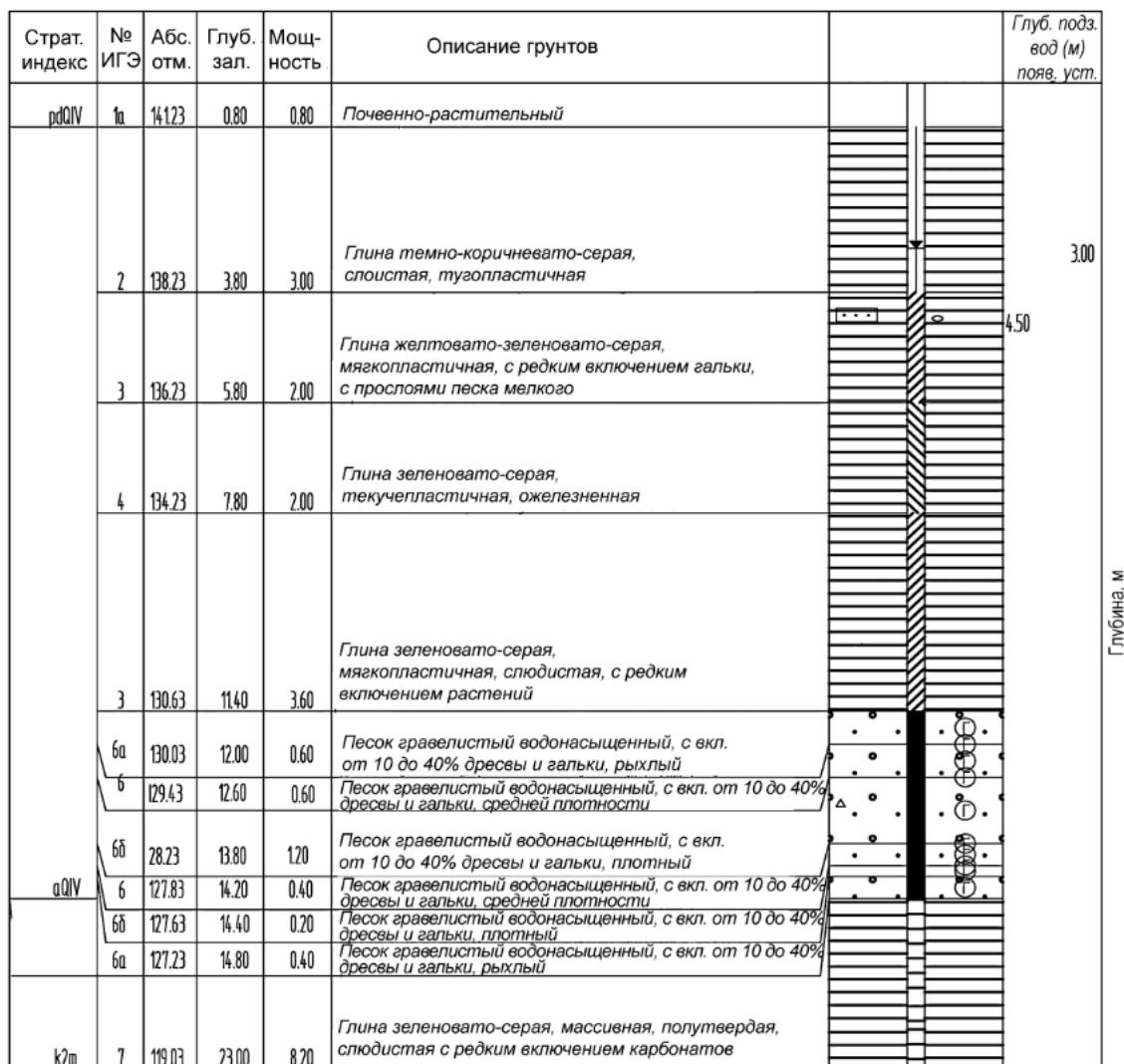


Рис. 10.7. Литологическая колонка по скважине №1

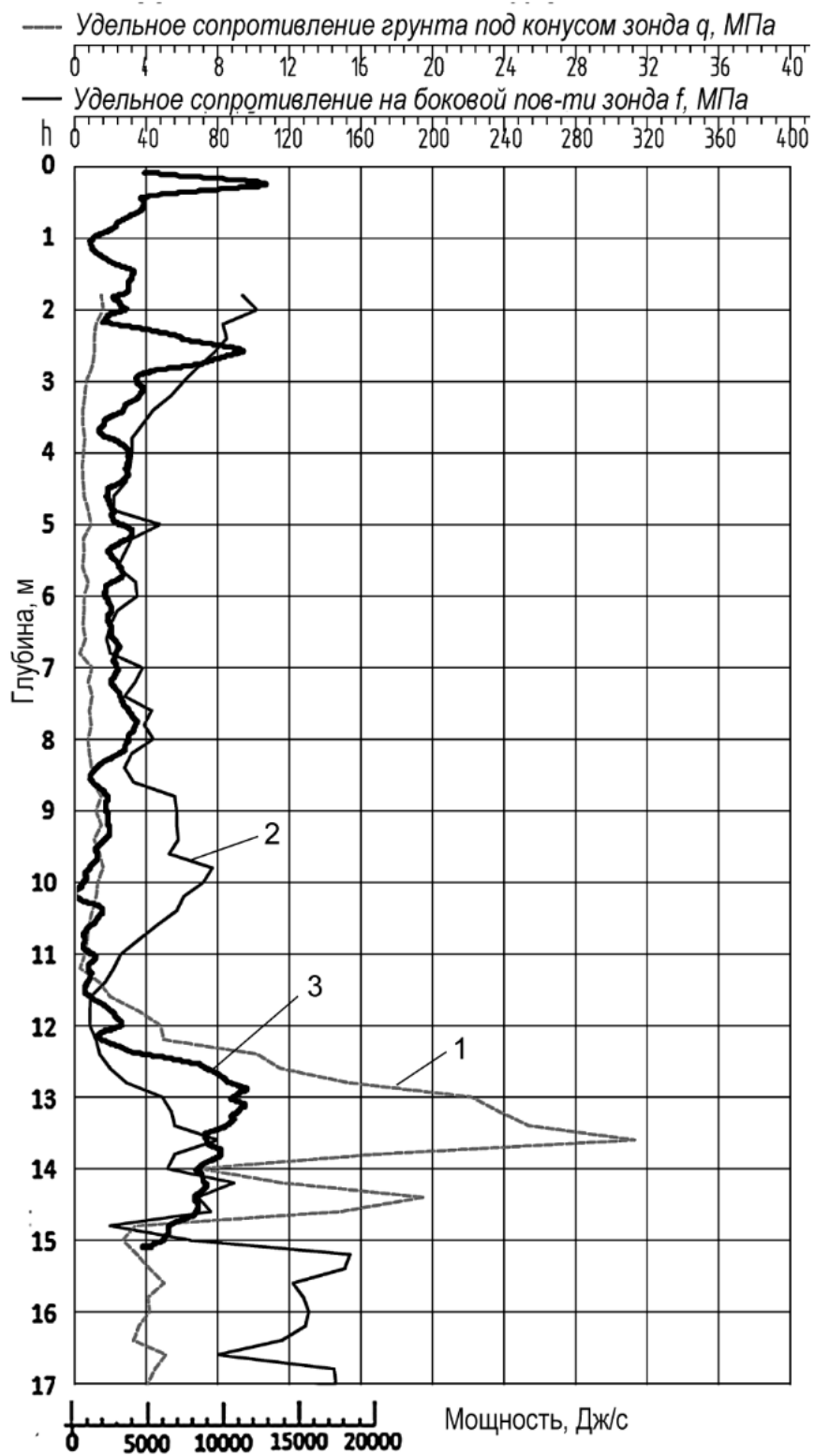


Рис. 10.8. Результаты испытаний различными методами:  
 1, 2 – статическое зондирование, лобовое сопротивление и силы трения, соответственно; 3 – буровое зондирование

### *Испытания с целью определения модуля деформации грунтов*

Модуль деформации определен двумя методами испытаний: винтовым штампом и буровым зондированием. Испытания проведены на различной

глубине в толще глины тугопластичной, физико-механические свойства которой приведены в табл. 10.1.

### *Испытания сплошным шнеком*

Испытания проводились следующим образом. Выполнялось бурение скважины шнеком с буровым долотом до заданной глубины. После этого шнек поднимался вверх на 0,5 м и проворачивался вхолостую несколькими оборотами с целью снятия сил трения между шнеком и грунтом. Далее шнек опускался до забоя скважины и заворачивался ниже на 20 см и к хвостовику устройства бурового зондирования присоединялось устройство осевого нагружения, которое соединялось с хвостовиком верхнего шнека (см. рис. 10.8).

Для измерения осадки шнека используются три датчика линейных перемещений, которые закрепляются на трех реперах вокруг скважины.



Рис. 10.8. Измерение осадки шнека датчиками перемещений

Первая ступень давления была равна весу выше лежащего грунта, в нее входил вес шнеков. Последующие ступени нагружались по 100 кПа. Модуль деформации определялся по ГОСТ 20276 на начальном прямолинейном участке зависимостей на рис. 10.10.

Таблица 10.2

#### Значения модуля деформации

| Наименование грунта | Глубина испытания, м | Интервал давлений, кПа | Модуль деформации, МПа |
|---------------------|----------------------|------------------------|------------------------|
| Глина полутвердая   | 3,0                  | 65-430                 | 40,2                   |

|                      |     |         |      |
|----------------------|-----|---------|------|
| Глина тугопластичная | 5,0 | 99-364  | 30,2 |
| Глина полутвердая    | 7,0 | 138-388 | 34,2 |

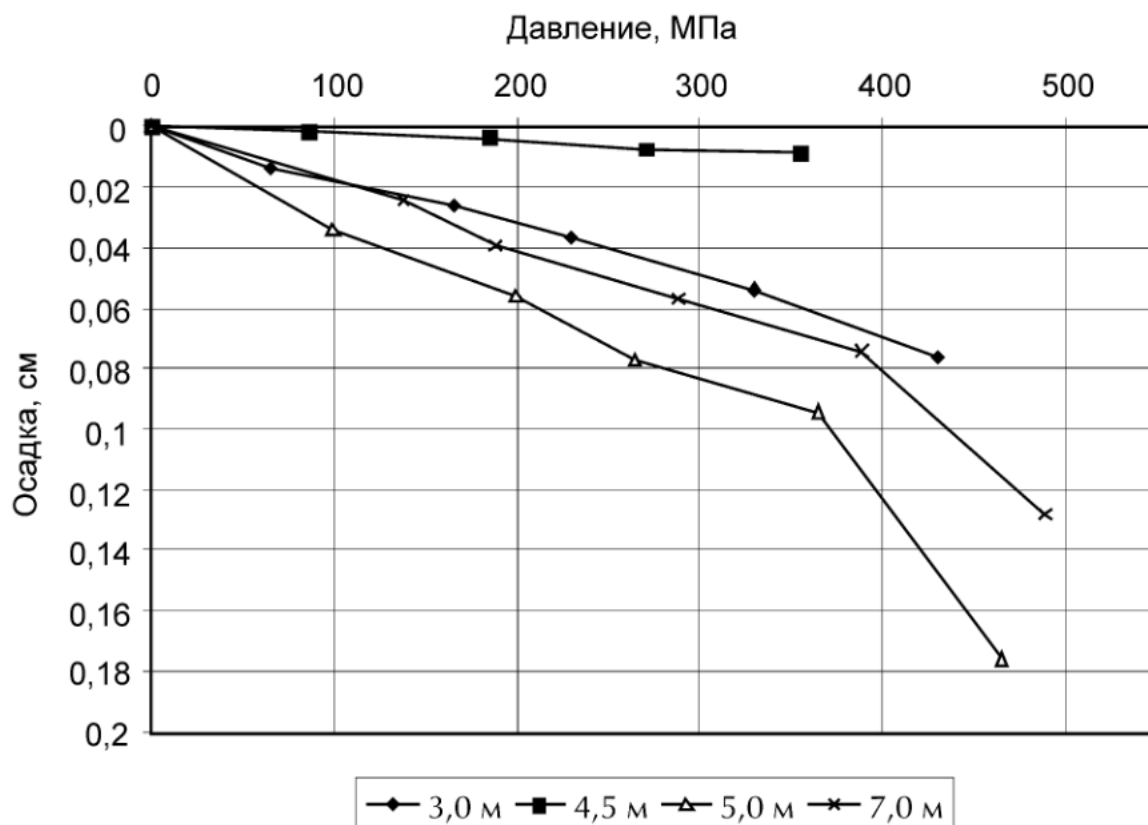


Рис. 10.9. Зависимость осадки от давления

### ***Испытания винтовым штампом***

В пробуренную скважину ниже ее забоя завернули винтовой штамп площадью 600 см<sup>2</sup>. Глубина испытаний 3,0 м.

Измерение величины вертикальной нагрузки производилось датчиком силы и регистрирующей аппаратуры производства ООО «НПП «Геотек».

Измерение осадки штампа измерялось в четырех точках с использованием датчиков перемещений LVDT и регистрирующей аппаратуры производства ООО «НПП «Геотек». Точность измерения перемещений (осадки) – 0,01 мм. Осадку штампа измеряли как среднееарифметическое значение из показаний четырех датчиков перемещений.

Нагрузку на штамп прикладывали ступенями. За критерий условной стабилизации деформации принималась скорость осадки штампа, не превышающую 0,1 мм за время, указанное в ГОСТ 20276.

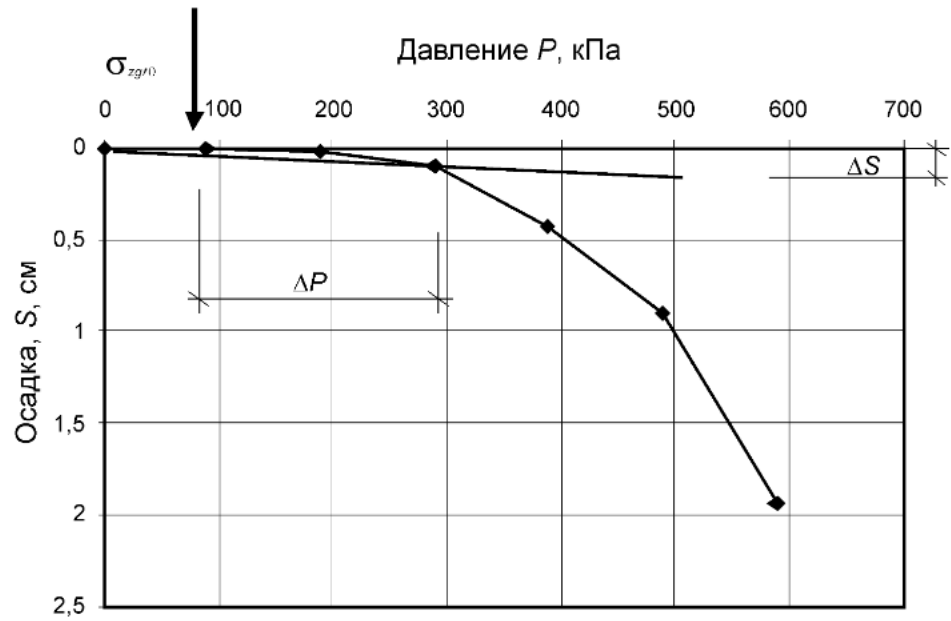


Рис. 10.10. Зависимость осадки от давления

Отсчеты с датчиков измерялись автоматически с использованием управляющей программы АСИС. Отсчеты с датчиков на каждой ступени производились через каждые 10 мин в течение первого получаса, 15 мин – в течение второго получаса и далее через 30 мин.

Результаты испытаний приведены на рис. 10.10 и в приложении Е. Модуль деформации, найденный по формуле (7.2), равен 27,5 МПа.