

**БОЛДЫРЕВ Г.Г.**

Профессор кафедры оснований и фундаментов Инженерно-строительного института Пензенского государственного университета архитектуры и строительства, член Российского национального комитета по механике грунтов и фундаментостроению, технический директор ООО «НПП «Геотек»», почетный строитель РФ, г. Пенза, g-boldyrev@geotek.ru

**ХРЯНИНА О.В.**

Доцент кафедры оснований и фундаментов Инженерно-строительного института Пензенского государственного университета архитектуры и строительства, г. Пенза

**BOLDYREV G.G.**

A professor of the beds and foundations department of the Civil Engineering Institute of Penza State University of Architecture and Construction, a member of the Russian National Committee for Soil Mechanics and Foundation Engineering, the technical director of the «NPP Geotek» Ltd, an Honorary Builder of the RF, Penza, g-boldyrev@geotek.ru

**HRYANINA O.V.**

An associate professor of the beds and foundations department of the Civil Engineering Institute of Penza State University of Architecture and Construction, Penza

# МЕТОДЫ ПОЛЕВЫХ ИСПЫТАНИЙ ГРУНТОВ. ЧАСТЬ VI. ИСПЫТАНИЯ ПРЕССИОМЕТРОМ THE METHODS OF FIELD SOIL TESTS. PART VI. PRESSUREMETER TESTING

**Ключевые слова:** методы испытаний прессиомером; прессиомер Менарда; определение механических свойств грунтов; полевые испытания.

**Key words:** pressuremeter testing methods; Menard pressuremeter; determination of soil mechanical properties; field tests.

**Аннотация:** данная работа является продолжением серии статей, являющихся аналитическим обзором методов полевых испытаний грунтов, которые были опубликованы в ряде номеров журнала «Инженерные изыскания» за 2010 и 2011 год.

**Abstract:** the paper is a continuation of the series of articles analytically reviewed the methods of field soil tests that were released in several issues of the journal «Engineering surveys» in 2010 and 2011.

**С какой целью проводятся прессиометрические испытания?**

Основная задача испытаний прессиомером заключается в определении модуля деформации грунтов в условиях их естественного залегания. Значения модулей деформации, определенные по результатам прессиометрических и штамповых испытаний, не совпадают между собой.

В общем случае испытания прессиомером позволяют определить: прессиометрический модуль деформации грунта  $E_p$ , упругий модуль при разгрузке (в СП 50-101-2004 он обозначен как  $E_{pr}$ ), коэффициент бокового давления в состоянии покоя  $x_o$ , коэффициент консолидации в горизонтальном направлении  $c_h$ , предельное да-

вление на грунт  $p_L$  и недренированную прочность глинистых грунтов  $c_u$ .

Прессиометрические испытания (ПИ) можно проводить во всех видах грунтов, если удастся пройти скважину. В мягкопластичных и текучих глинистых отложениях, когда трудно отобрать монолиты для лабораторных исследований, ПИ становятся методом, позволяющим определить модуль деформации подобных грунтов. Кроме модуля деформации, измерив предельное давление  $p_L$ , находят недренированную прочность связных грунтов  $c_u$ , но при этом требуется использование методов экстраполяции с учетом данных других видов испытаний. Используя решения механики грунтов, учитывая явление дилатансии и резуль-

таты ПИ, можно найти угол внутреннего трения в песчаных отложениях ф.

Точность определения прочностных и деформационных характеристик грунтов при проведении прессиометрических испытаний существенно зависит от качества буровых работ. Необходимо обеспечить минимальное нарушение структуры грунта при проходке скважины и пробурить ее с таким диаметром, чтобы боковая поверхность прессиометра могла плотно соприкоснуться с ее стенками. Из-за неизбежных неровностей внутренней поверхности скважины, образующихся в процессе бурения, считают, что диаметр скважины должен быть несколько меньше диаметра прессиометра.

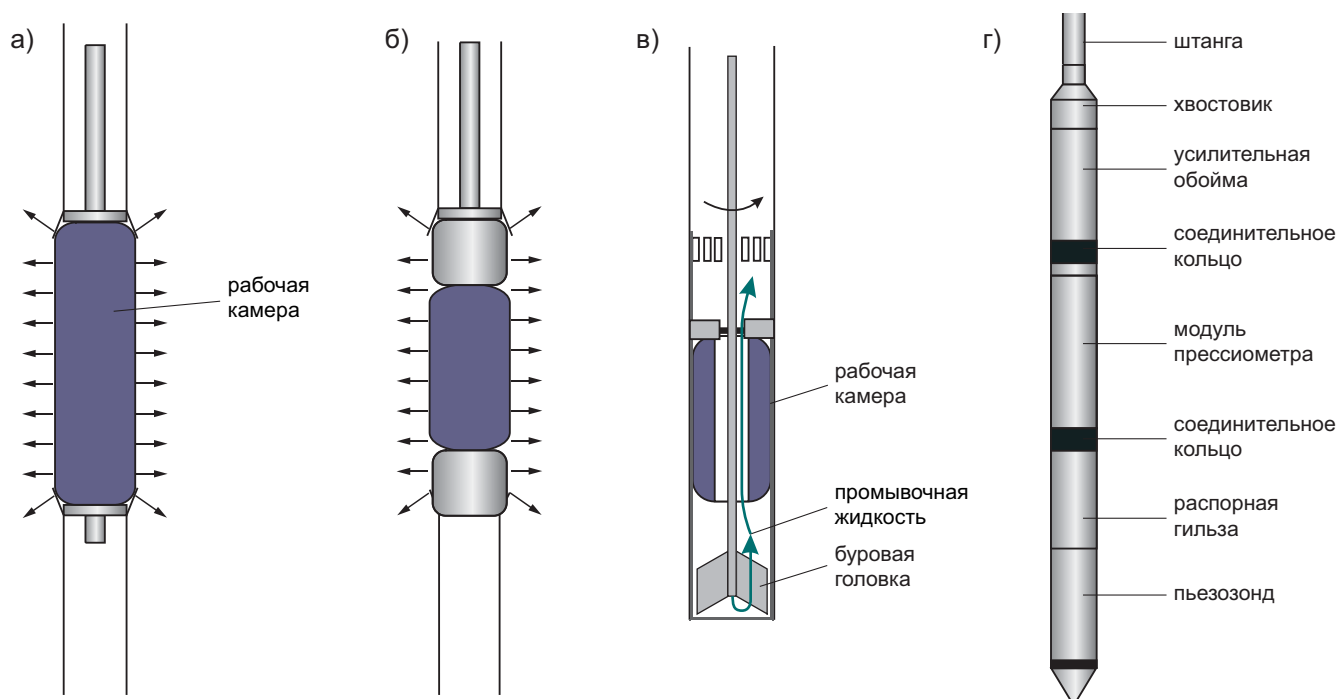


Рис. 1. Прессиометры различного типа

### В каких стандартах описаны прессиометрические методы испытаний?

Испытания прессиометрами проводятся с использованием стандартов [4, 10, 20].

### Какие виды прессиометров используются при испытаниях грунтов?

На практике применяется несколько видов прессиометров.

В *радиальном*, или *баллонном*, прессиометре (рис. 1, а, б) [1–5, 7, 10, 11, 18, 31, 34] в ходе испытаний измеряется расширение резиновой камеры, опущенной в предварительно пробуренную скважину на заданную глубину, при заданном давлении в ней жидкости или воздуха (рис. 1, а).

*Самозабуривающийся* прессиометр (рис. 1, в) [9, 17, 18, 34, 35] включает в себя режущую часть, при помощи которой выполняется разбуривание грунта с одновременной промывкой водой и удалением разрушенного грунта на поверхность. Считается, что этот прессиометр меньше нарушает структуру отложений по сравнению с баллонным и лопастным.

*Вдавливаемый конусный* прессиометр (рис. 1, г) [18, 32] является комбинацией баллонного прессиометра и конусного зонда, что позволяет более точно определять деформационные и прочностные свойства грунтов.

В *лопастном* прессиометре [1, 28] в грунт вдавливаются два жестких штам-

па прямоугольной формы, площадь которых зависит от глубины проведения испытания и вида грунта. В более прочных отложениях лопастной прессиометр опускается в предварительно пробуренную скважину.

### Что такое баллонный прессиометр и с какой целью он используется?

Баллонный прессиометр (за рубежом его называют прессиометром Менарда) представляет собой закрытый цилиндр с резиновой боковой поверхностью (см. рис. 1, а), в котором ступенями или непрерывно создается давление  $p$ , что вызывает расширение стенок скважины. По изменению объема подаваемой жидкости определяют их радиальную деформацию. Далее, используя прессиометрическую кривую, по зависимости изменения объема этой жидкости от давления определяют характеристики грунта.

Конструктивно баллонный прессиометр состоит из зонда и панели, которая используется для контроля создаваемого давления и измерения изменений объема измерительной камеры. Зонд может включать как одну (см. рис. 1, а), так и несколько резиновых цилиндрических камер (см. рис. 1, б, рис. 2). Конструкция отечественного баллонного прессиометра показана на рис. 3.

Обычно в ходе испытаний, как уже упоминалось, измеряются давление и изменение объема расширяющейся цилиндрической оболочки, которая

опускается на заданную глубину в предварительно пробуренную скважину. В некоторых случаях регистрируется не изменение объема жидкости, а увеличение радиуса скважины с использованием датчиков перемещений, расположенных внутри камеры давления.

### Кто является основоположником метода прессиометрических испытаний?

Из иностранных источников [11] следует, что первый прессиометр был предложен в начале 30-х годов прошлого столетия. Он представлял собой длинную полую камеру, которая накачивалась газом.

В 1954 году французский инженер Л. Менард [31] для измерения плотности насыпных грунтов предложил использовать прессиометр, конструкция которого практически не изменилась до настоящего времени (см. рис. 2). Он состоит из трех камер, две крайние из которых заполняются газом, а средняя — водой. В 1957 году Л. Менард начал промышленно выпускать такие приборы для испытаний грунтов в полевых условиях.

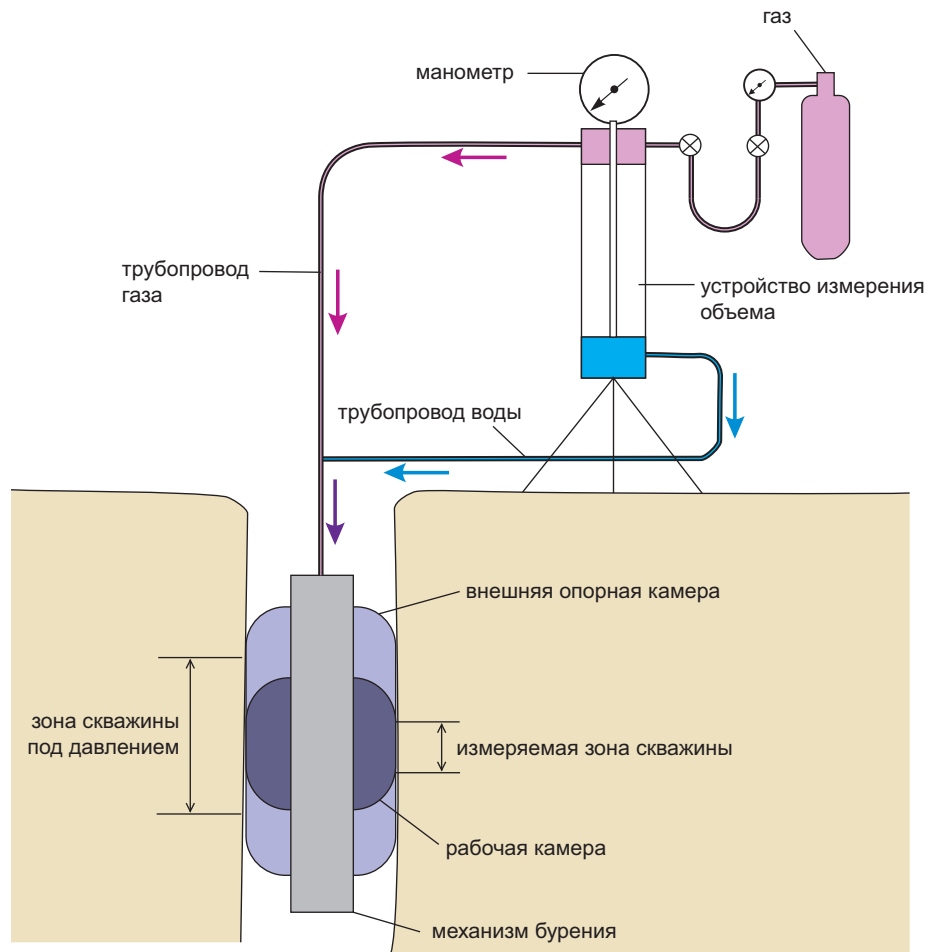
В монографии Б.М. Ребрика [6] описаны типы прессиометров, разработанных различными предприятиями (такими как ВСЕГИНЕО, УралГИСИЗ, Фундаментпроект, НИИОСП, ПНИИ-ИС и др.) В большинстве случаев сначала выпускались гидравлические или пневматические (баллонные) прес-

сиометры, затем были разработаны механические лопастные (самозабуривающиеся и конусные не нашли своего применения в России). В настоящее время баллонные прессиометры выпускаются в России фирмой «Геотест» (см. рис. 3).

**Какие требования предъявляются к качеству скважины?**

Качественная подготовка скважины для размещения зонда прессиометра является одним из важных этапов прессиометрических испытаний, который оказывает существенное влияние на их точность. Индикатором их качества является величина разброса данных измерений и форма прессиометрической кривой. На рисунке 4 показаны зависимости, приведенные в американском стандарте ASTM D 4719-00 [10]. Первая кривая наблюдается при идеально проведенных испытаниях баллонным прессиометром в предварительно пробуренной скважине. Вторая соответствует случаю, когда диаметр скважины слишком мал или когда испытания проводятся в набухающих грунтах. Третья получена для ситуации, когда скважина слишком большая.

Для получения удовлетворительных результатов испытаний необходимо выполнить два основных условия: (1) диаметр скважины должен быть близким к диаметру зонда прессиометра; (2) оборудование и метод бурения, используемые при проходке скважины, должны производить наименьшее нарушение структуры грунта в ее стенках. Кроме того, по стандарту [10] испытания баллонным прессиометром должны проводиться сразу же после проходки скважины (в



**Рис. 2. Схема испытания грунта прессиометром**

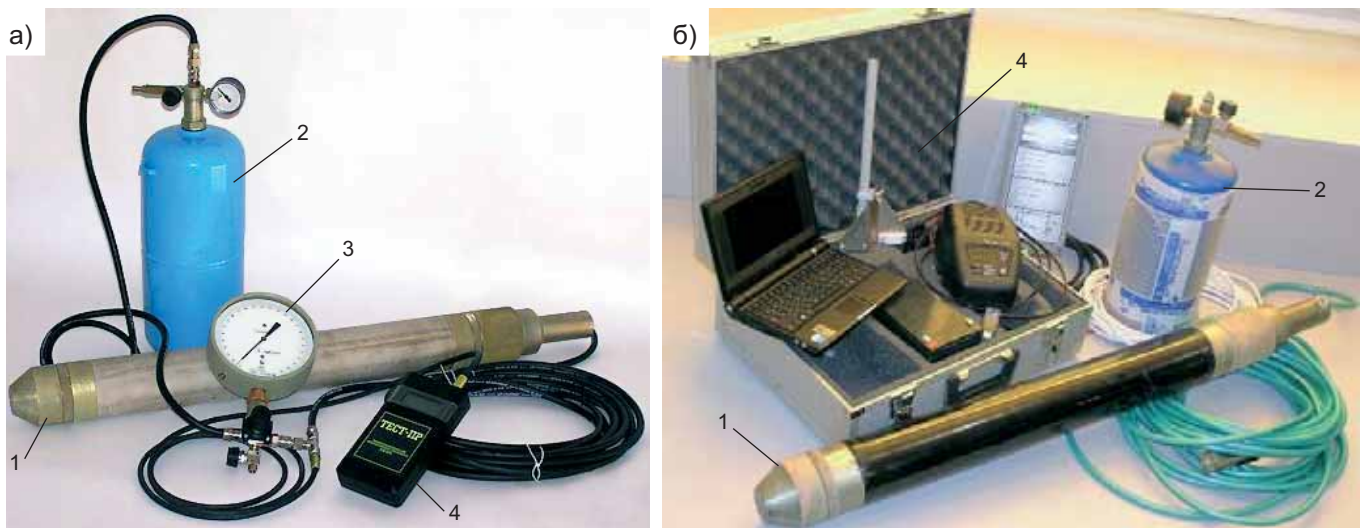
то время как для самозабуривающегося и вдавливаемого рекомендуется время выдержки до начала испытаний 1–2 ч).

Согласно американскому стандарту [10] диаметр скважины должен удовлетворять следующему условию, основанному на опыте испытаний:

$$1,03D < D_H < 1,2D,$$

где  $D$  — диаметр зонда;  $D_H$  — диаметр скважины.

В ГОСТ 2276-85 [4] приведена следующая рекомендация: «Начиная с отметки на 1 м выше участка, на котором будут производиться испытания грунта, скважины следует проходить вращательным способом с помощью колонковой трубы, обуривающего грунтоноса или буровой ложки, ча-



**Рис. 3. Баллонный прессиометр ПЭВ-89 производства фирмы «Геотест» (а) и ПЭВ-89 с комплектом автоматизации (б) [8]: 1 — зонд с пневмомагистралью; 2 — ресивер с манометром; 3 — манометрическая головка с редукционным клапаном; 4 — регистратор**



стога вращения которых не должна превышать 60 об/мин, осевая нагрузка на буровой наконечник — не более 100 кгс. Запрещается применение ударно-канатного, вибрационного и шнекового способов бурения на этом участке. Допускается проходка вдавливающим способом кольцевым забоем с помощью тонкостенного бурового цилиндрического наконечника, нижний режущий край которого имеет внутренний угол заострения 10–15°; внутренний диаметр башмака этого наконечника должен быть на 1–2 мм меньше внутреннего диаметра корпуса, а наружный диаметр башмака — на 2–3 мм больше наружного диаметра корпуса наконечника. Диаметр скважин не должен превышать диаметр зонда прессиометра более чем на 10 мм».

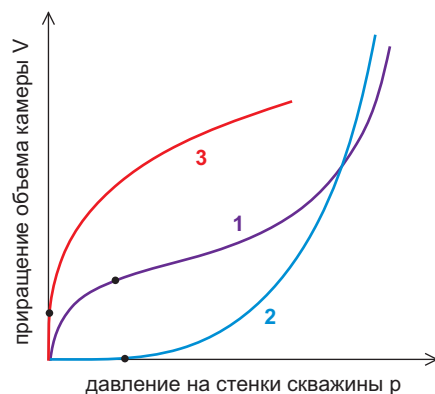
### Какова процедура испытаний баллонным прессиометром?

Конструкция гибкого прессиометра включает в себя как минимум три камеры. Две внешние камеры, называемые опорными, заполняются газом. Центральная, измерительная, заполнена водой и соединена трубопроводом с устройством измерения изменения объема, расположенного на поверхности грунта. Давление на воду создается углекислым газом из баллона. Отметим, что стандартный прессиометр обычно имеет две оболочки — резиновую и тонкую лепестковую металлическую, выполняющую защитную функцию.

Давление газа и воды увеличивается во времени равными ступенями, что соответственно создает давление на стенки скважины. Измерение изменения объема выполняется через 15, 30, 60 и 120 с после каждой ступени приращения давления [18]. При этом выполняется коррекция результатов измерений с учетом (рис. 5):

1. *собственного сопротивления материала прессиометра расширению* (коррекция выполняется по результатам калибровки прибора на поверхности грунта вне скважины — определения зависимости между приложенным давлением и объемным расширением рабочей камеры; измеренные при этом значения изменения объема вычитаются затем из результатов испытаний в скважине);

2. *расширения трубопроводов, соединяющих измерительную камеру с устройством измерения объема* (требуемая коррекция может быть выполнена по результатам испытания рабочей камеры в жесткой стальной трубе

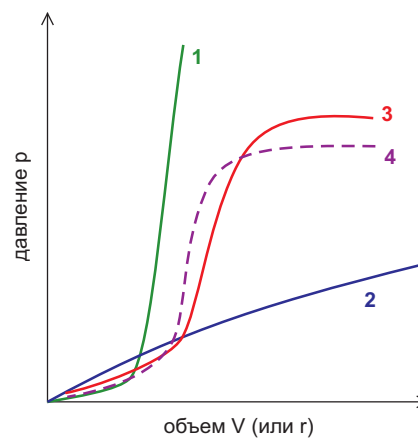


**Рис. 4. Прессиометрические кривые [10]: 1 — идеальная; 2 — когда диаметр скважины меньше диаметра зонда; 3 — когда диаметр скважины больше диаметра зонда**

на поверхности грунта; измеренные при этом значения изменения объема также вычитаются затем из результатов испытаний в скважине);

3. *эффекта гидростатического давления* (его учет необходим, поскольку измерительная камера и трубопроводы заполнены водой и давление в них больше, чем регистрируемое устройством измерения, находящимся на поверхности грунта; в связи с этим в прессиометрах, где используются две опорные камеры, заполненные воздухом, в работе [21] предложено использовать два источника давления для того, чтобы создать равное давление в опорных и измерительной камерах в случае работы на глубине более 30 м).

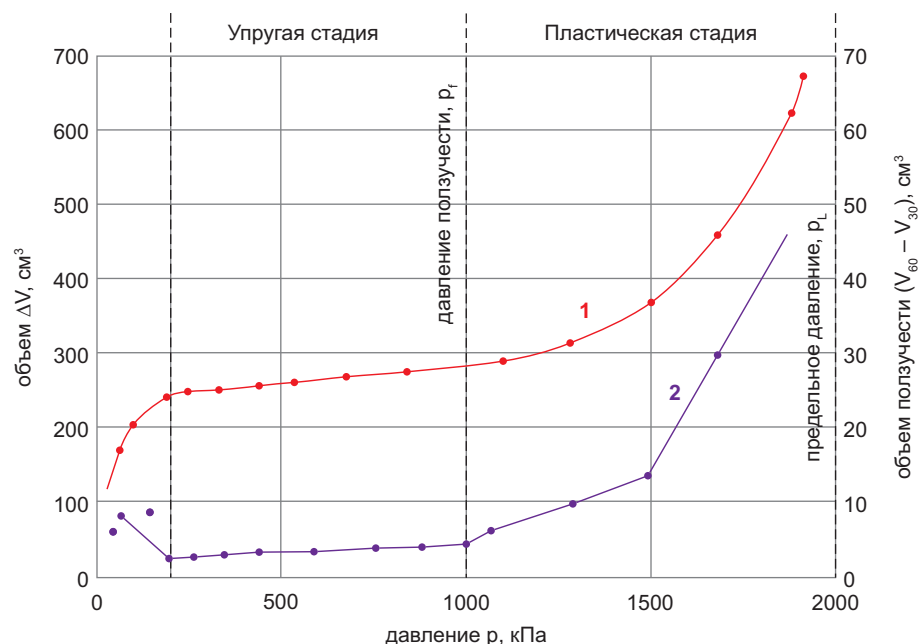
Каждое испытание должно включать не менее 10 ступеней приложения



**Рис. 5. Калибровка прессиометра и корректировка данных измерений: 1 — калибровка податливости зонда в стальной трубе; 2 — калибровка сопротивления растяжению резиновой оболочки; 3 — результаты измерений; 4 — результат корректировки данных измерений [18]**

давления (хотя на практике их бывает 5–14). Количество ступеней зависит от необходимой точности определения предельного давления. В некоторых случаях, как, например, при испытаниях слабых скальных грунтов, может быть выполнен цикл «разгрузка — повторное нагружение».

Обычно испытания проводятся до двойного увеличения объема камеры прессиометра или до заданной величины бокового давления. При этом деформация камеры может достигать 40% в зависимости от конструкции прессиометра. До 40 измерений выполняется при непрерывном расширении камеры с контролем деформации и



**Рис. 6. Опытная прессиометрическая кривая (1) и кривая ползучести (2) [18]**

примерно 10 точек получают при ступенчатом нагружении. Поэтому результирующая кривая зависимости «деформация — давление» лучше получается при непрерывном нагружении.

Результаты одного из испытаний после использования процедуры корректировки показаны на рис. 6, где кривая ползучести получена для каждой ступени нагружения в интервале времени от 30 до 60 с, а pressiометрическая кривая — по результатам измерений с учетом их корректировки (см. рис. 5).

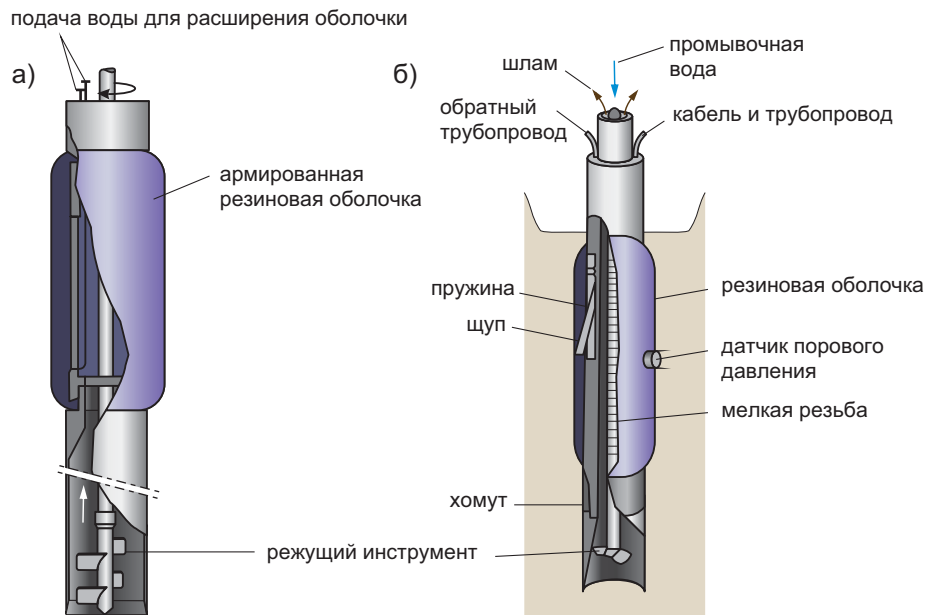
Прессиометрическая кривая может быть условно разделена на три части, соответствующие стадиям: (1) расширения рабочей камеры до давления  $p_0$ , равного горизонтальному напряжению в природных условиях; (2) псевдоупругих деформаций с низким уровнем деформации ползучести ( $p_0 < p < p_f$ ); (3) развития пластических деформаций при росте деформаций ползучести перед разрушением грунта ( $p_f < p < p_L$ ).

**В каком случае применяются самозабуривающиеся прессиометры?**

Самозабуривающийся прессиометр был разработан практически одновременно во Франции в 1974 году [11, 13] и в Англии в 1973 году [38] с целью уменьшения влияния на результаты испытаний разрушения структуры грунта при проходке скважины (прежде всего предотвращения обрушения ее стенок в процессе бурения). При его использовании объединяются механизмы резания грунта, осуществляемого нижней частью прессиометра (при этом грунт поднимается на поверхность под давлением жидкости), и его задавливания с поверхности грунта (рис. 7, 8). Само название этого прибора говорит о том, что он сам погружается в грунт без предварительного устройства скважины.

Сегодня известно несколько конструкций самозабуривающихся прессиометров: (1) разработанный в Кембриджском университете для исследования переуплотненных глинистых грунтов и широко применяемый в Англии (П1) [9, 19, 27, 35]; (2) разработанный во Франции (П2) [11]; (3) разработанный в Великобритании для исследования скальных грунтов [17] (одновременно может быть использован как пенетрометр).

Основные различия между П1 и П2 заключаются в следующем [18]:



**Рис. 7. Самозабуривающиеся прессиометры [27]: а — измерение объема жидкости; б — измерение диаметра скважины**



**Рис. 8. Самозабуривающийся прессиометр [35]: 1 — зонд; 2 — панель управления давлением; 3 — кабель; 4 — регистратор; 5 — компьютер**

- в П2 деформация измеряется через объем подаваемой жидкости, как в прессиометре Менарда, в то время как в П1 для этого используется тензометрический датчик деформаций или датчик Холла;
- в П1 резиновая оболочка в процессе внедрения в грунт сохраняет свою форму при помощи внутренних жестких стальных стенок, а в П2 ее форма поддерживается давлением жидкости;
- устройство резания грунта в П2 приводится в действие при помощи полого гидравлического мотора, а в П1 — через штанги с поверхности грунта;
- П2 используется чаще всего в исследовательских целях (во Фран-

ции), а П1 часто используется на коммерческой основе при проведении изысканий (в Англии).

Нарушение структуры грунта при использовании самозабуривающихся прессиометров обычно связано со следующими факторами: (1) типом грунта; (2) расстоянием от низа режущей кромки ножей до грунтоотборника; (3) диаметром режущего инструмента относительно внешнего диаметра оболочки прессиометра; (4) усилием вдавливания и скоростью вращения буровой коронки; (3) наличием вибрации в процессе бурения.

Степень разрушения структуры может быть минимизирована при учете вышеуказанных факторов до начала проведения испытаний, что, к сожа-



Рис. 9. Вдавливаемый конусный пенетромтр [9]: 1 — зонд; 2 — регистратор; 3 — компьютер

лению, не всегда выполняется на практике.

Результаты испытаний, полученные с помощью самозабуривающегося прессиометра, существенным образом отличаются от таковых при использовании прессиометра Менарда. Однако первый не получил широкого распро-

странения на практике из-за его излишне сложной конструкции и трудоемкости проведения испытаний.

При использовании самозабуривающихся прессиометров можно проводить испытания, нагружая грунт как ступенями, так и непрерывно через контролируемую компьютером систему давления. Обычно применяют и то, и другое. На первых ступенях выполняется нагружение с контролем давления, а затем применяют непрерывное нагружение вплоть до разрушения ( $p > p_f$ ). Для глинистых грунтов в работе [18] было предложено проводить испытания при скорости деформации 1%/мм. Более высокие скорости используются при проведении недренированных испытаний. Обычно в ходе испытаний выполняют один цикл «разгрузка — повторная нагрузка» для вычисления упругого модуля деформации при разгрузке и затем окончательную разгрузку при завершении испытаний.

Как и в случае применения стандартного прессиометра, здесь также необходимо проводить корректировку результатов измерений из-за жестко-

сти резиновой оболочки и податливости измерительной системы. Так как самозабуривающийся прессиометр имеет датчики давления и перемещения, необходимо также выполнять их калибровку перед испытаниями. Точность измерений зависит от точности калибровки датчиков и ее периодичности. В процессе испытаний радиальная деформация вычисляется не по изменениям объема, а непосредственно путем измерения расширения измерительной камеры датчиком линейных перемещений.

### Что такое вдавливаемый конусный прессиометр?

Конусный прессиометр [36, 37] впервые был предложен в Англии [24]. Он используется чаще всего при изысканиях на шельфе и представляет собой комбинацию баллонного прессиометра и конусного зонда (гибкая камера при этом располагается выше конуса пенетромтра) (см. рис. 1, з).

В работах [18, 32] были предложены улучшенные конструкции прессиометров этого типа, которые вдавливались в грунт с отбором последнего через

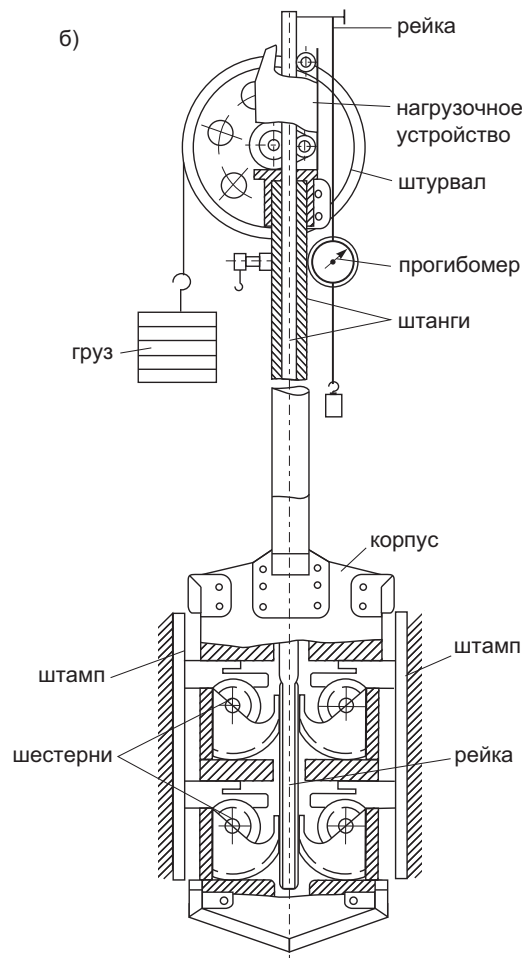


Рис. 10. Прессиометры, разработанные в ПНИИСе: а — ЛП-14С; б — ЛП-12М [6]: 1 — груз; 2 — штамп; 3 — шестерни; 4 — рейка; 5 — нагрузочное устройство; 6 — штурвал; 7 — прогибомер; 8 — штанги; 9 — корпус; 10 — штамп; 11 — рейка

внутреннюю полость. Они первоначально были предназначены для исследований грунтов в основаниях стационарных платформ на шельфе. Такой прессиометр представляет собой тонкую стальную трубу, подобную пробоотборнику Шелби. При испытаниях с его помощью также отбирается монолит грунта. Неудобство возникает при частом отборе монолитов, так как для этого каждый раз приходится поднимать прибор на поверхность для их извлечения.

Другой конструкцией вдавливаемого прессиометра является так называемый конусный пенетрометр [13–16, 25, 26, 36]. Это устройство вдавливается в грунт подобно стандартному пенетрометру, а затем расширяется на заданной глубине, как обычный прессиометр. Подобная конструкция исключает проблемы, связанные с бурением скважины или сложностью устройства самозабуривающегося прессиометра. Общий вид одного из коммерческих конусных пенетрометров показан на рис. 9.

### Что такое лопастной прессиометр?

Лопастной прессиометр был разработан в ПНИИСе под руководством С.А. Амаряна [1] для испытаний грунтов в полевых условиях (рис. 10). Конструкция одного из таких приборов, ЛП-12М, показана на рис. 10, б. Он имеет стальной корпус двутаврового сечения с двумя выдвижными штампами прямоугольной формы и цилиндрическим редуктором, состоящим из приводной рейки, находящейся в зацеплении с блок-шестернями, выдвигающими направляющие рейки штампов. Нагрузочное устройство состоит из цилиндрического редуктора, крепящегося на наружной штанге диаметром 36 мм, и мерных грузов. Более подробно описание лопастных прессиометров можно найти в монографии [6].

Конструкция лопастного прессиометра позволяет применять его для исследования сжимаемости слабых грунтов путем их задавливания или забивки в массив. В то же время эти приборы могут быть применены в предварительно пробуренных скважинах в более жестких грунтах. Конструктивно они выполнены таким образом, что позволяют определять не только деформационные, но и прочностные характеристики грунтов. С этой целью штампы сделаны ребристыми. При заданном нормальном давлении на стенки скважины через

штанги прикладывается сдвигающее усилие и определяется предел прочности грунта на сдвиг. Испытания повторяют при трех различных нормальных давлениях. Затем, используя условие прочности Кулона, находят прочностные характеристики грунта  $\varphi$  и  $c$ . Подобный вид тестов за рубежом называют «испытаниями на сдвиг в скважине» («orehole shear tests») [12, 22, 23].

### В чем недостатки прессиометрических испытаний?

Несмотря на то что прессиометрические испытания широко используются в практике изысканий для определения модуля деформации, многие исследователи полагают, что на их результаты существенное влияние оказывает изменение начального напряженного состояния грунтов при проходке скважины. Кроме того, в ее процессе происходит нарушение структуры грунта, степень которого зависит от качества бурения. Диаметр скважины также оказывает определенное влияние на итоги испытаний. Если он превышает диаметр прессиометра, то, возможно, расширения последнего может не хватить для получения полной прессиометрической кривой. С другой стороны, если диаметр скважины слишком мал, то при опускании прессиометра может иметь место разрушение структуры грунта и расширение скважины, что невозможно учесть при обработке результатов испытаний.

Применение самозабуривающегося прессиометра, который широко используется в Англии [9, 19, 27, 35], позволяет улучшить качество испытаний за счет меньшего нарушения структуры грунта при его погружении, но увеличивает трудоемкость испытаний.

### Влияет ли конструкция прессиометра на результаты измерений?

Главное различие между рассмотренными выше прессиометрами заключается в величинах давления, передаваемого на грунт измерительной камерой в начале испытания (рис. 11):

- при использовании баллонного прессиометра испытания начинаются при боковом давлении грунта, которое или отсутствует (имеется зазор между стенкой скважины и прессиометром), или очень мало;
- в случае самозабуривающегося прессиометра начальное давление

равно горизонтальному напряжению в массиве грунта перед погружением прибора;

- при использовании конусного прессиометра имеет место изменение начального напряженного состояния грунта и горизонтальные напряжения в массиве грунта вблизи прибора могут быть больше, чем до его погружения.

Результаты испытаний представляются графически (см. рис. 6): для баллонного прессиометра — в виде зависимости изменения объема от прикладываемого давления, для самозабуривающегося — в виде зависимости деформации расширения цилиндрической полости от давления. На начальном участке такого графика наблюдается рост объема при малом изменении давления, что можно объяснить наличием зазора между баллоном и внутренней поверхностью скважины и/или разрушением структуры грунта на ее стенках. Необходимо создать определенную величину давления, чтобы расширить баллон до бокового давления грунта, соответствующего природному.

На рисунке 11 приведено схематичное представление результатов испытаний с использованием трех видов прессиометров — баллонного, самозабуривающегося и вдавливаемого (конусного). Как видно из этого рисунка, деформация грунта начинается при различных начальных давлениях  $p_{нач}$ . Наибольшая величина  $p_{нач}$  соответствует конусному прессиометру. Несмотря на эти различия, полагают, что на практике они не существенны и не оказывают большого влияния на определяемый модуль деформации. В любом случае испытания самозабуривающимся прессиометром дают более точные результаты по сравнению с другими видами прессиометров.

### Как выполняется интерпретация результатов испытаний?

Интерпретация результатов испытаний зависит от типа прессиометра. Однако общим во всех случаях является определение давления  $p$ , прикладываемого к стенкам скважины:

$$p = p_R + p_\delta - p_c, \quad (1)$$

где  $p_R$  — давление, считываемое с измерительного устройства;  $p_\delta$  — гидростатическое давление между контрольным устройством и измерительной камерой прессиометра;  $p_c$  — «давление

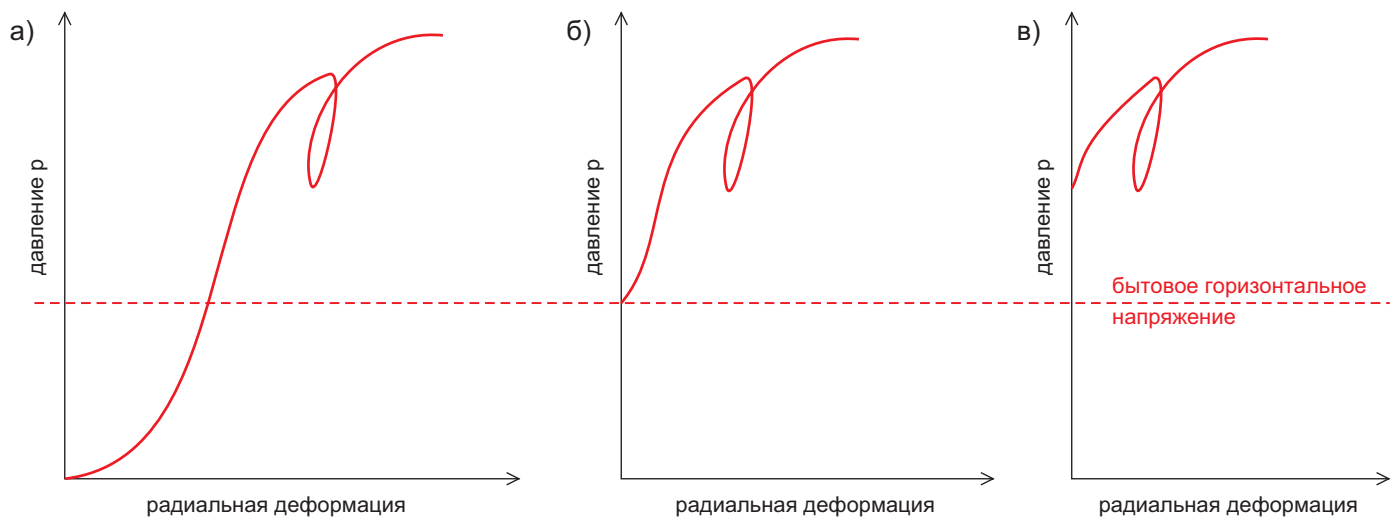


Рис. 11. Результаты испытаний с использованием трех видов pressiометров — баллонного (а), самозабуривающегося (б) и вдавливаемого (в) [18]



Рис. 12. Прессиометрические кривые и кривые ползучести [10]

коррекции» для учета жесткости зонда и податливости трубопроводов измерительной системы.

Далее вычисляют скорректированный объем измерительной камеры  $V$ :

$$V = V_R - V_c, \quad (2)$$

где  $V_R$  — значение объема, считываемое с измерительного устройства;  $V_c$  — «объем коррекции», найденный при давлении  $p = p_R + p_s$ .

Используя значения скорректированного объема и давления, строят прессиометрическую кривую. В зависимости от типа прессиометра при обработке результатов измерений используются различные зависимости. Данные, полученные из испытаний баллонным прессиометром, представляются в виде зависимости изменения объема от приложенного давления (по ГОСТ 20276 [4]) — в виде зависимости радиуса расширения сква-

жины от давления на ее стенки (рис. 12), в то время как результаты испытаний самозабуривающимся прессиометром отображаются в виде графика «радиус скважины — приложенное давление».

При определении модуля деформации используется его зависимость от соотношения  $\Delta p$  и  $\Delta V$  для прямолинейного участка прессиометрической кривой (см. рис. 12):

$$E_p = 2(1 + \nu)(V_o + V_m)(\Delta p / \Delta V), \quad (3)$$

где  $\nu$  — коэффициент Пуассона;  $\Delta p$  — приращение давления;  $\Delta V$  — приращение объема;  $V_o$  — начальный объем измерительной камеры;  $V_m$  — скорректированный объем для участка прессиометрической кривой, на котором определяется  $\Delta V$ .

Для испытаний, при которых учитывается увеличение диаметра (радиуса), прессиометрический модуль деформации определяется путем преобразования измеренного изменения объема камеры или прямым измерением изменения радиуса датчиком перемещений:

$$E_p = (1 + \nu)(R_o + \Delta R_m)(\Delta p / \Delta R), \quad (4)$$

где  $R_o$  — радиус измерительной камеры в начальном состоянии;  $\Delta R_m$  — приращение радиуса измерительной камеры для давления, при котором определяется модуль деформации;  $\Delta p$  и  $\Delta R$  — приращения давления и радиуса измерительной камеры соответственно.

В отечественном ГОСТ 20276-85 [4] значение прессиометрического модуля деформации предлагается определять, используя следующее выражение:

$$E_p = K_r R_p (\Delta p / \Delta R), \quad (5)$$

где  $K_r$  — корректирующий коэффициент, определяемый по рекомендуемой [4] таблице в зависимости от вида грунта и глубины испытания (эта таблица рекомендована для изысканий на объектах II и III уровней ответственности, а для сооружений I класса значенные  $K_r$  должно находиться из сопоставительных испытаний штампом площадью 5000 см<sup>2</sup> и прессиометрических); — радиус измерительной камеры при давлении, при котором определяется модуль деформации.

Следует заметить, что в результате прессиометрических испытаний мы получаем модуль деформации в горизонтальном, а не в вертикальном направлении, в то время как в грунтах, являющихся природными образованиями, деформируемость в этих направлениях может быть разной из-за физической анизотропии. Кроме того, неясно, насколько найденный модуль деформации отличается от штампового или стабиллометрического. Если верить таблице приложения 12 из ГОСТ 20276-85 [4], прессиометрический модуль деформации меньше штампового в 1,75–3,50 раза и зависит только от вида испытываемого грунта. При этом в отмеченной таблице глубина испытаний ограничивается 10 м. Отсюда и указание на необходимость проведения сопоставительных испытаний.

Предельное давление на грунт  $p_L$  находится как давление, при котором объем измерительной камеры увеличивается в 2 раза по отношению к начальному объему. При этом величина  $p_L$  обычно не достигается в ходе испытаний из-за ограничений по расширению измери-



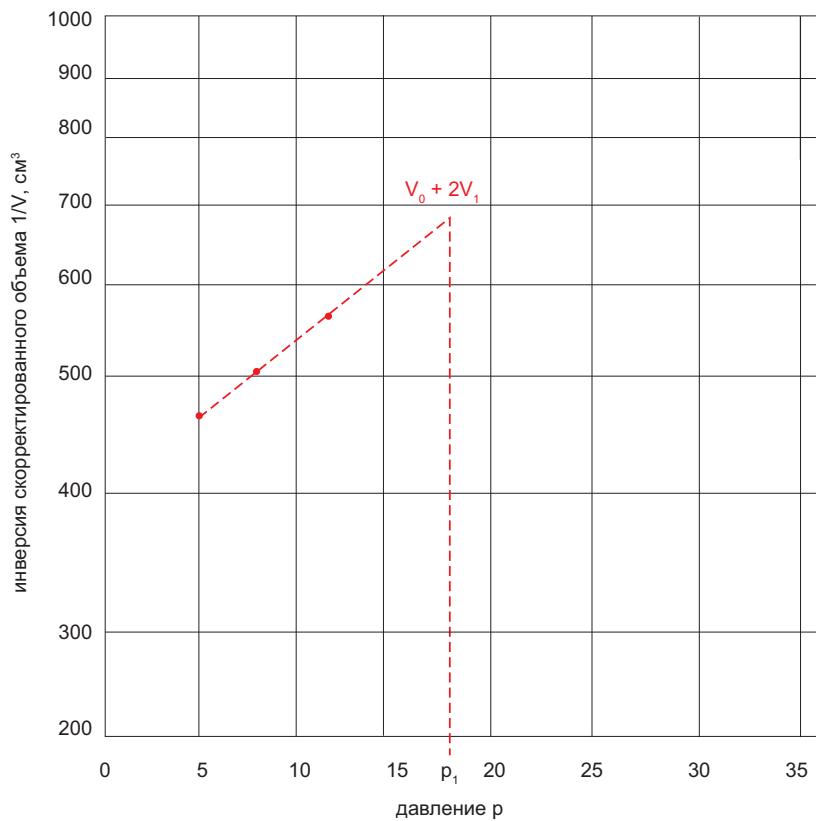


Рис. 13. Определение предельного давления

тельной камеры или необходимости создания очень высоких давлений.

В том случае, когда удастся провести испытание до больших пластиче-

ских деформаций, предельное давление  $p_L$  может быть определено из зависимости « $1/V - p$ », как показано на рис. 13. Как правило, данные точки по-

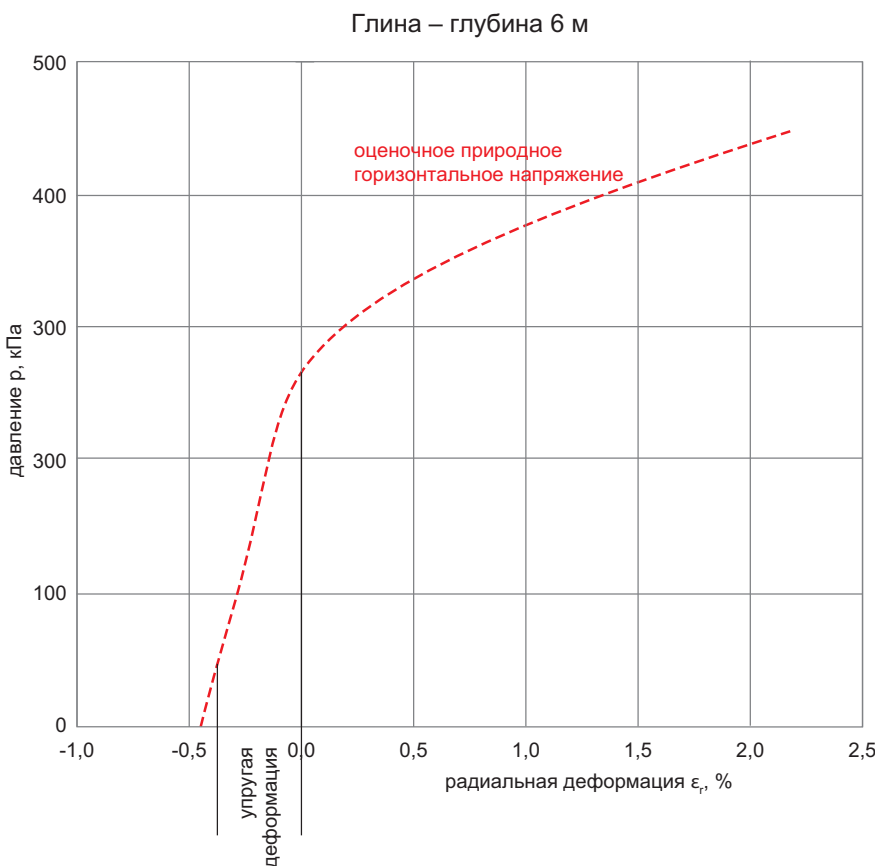


Рис. 15. К определению горизонтальных напряжений [19]

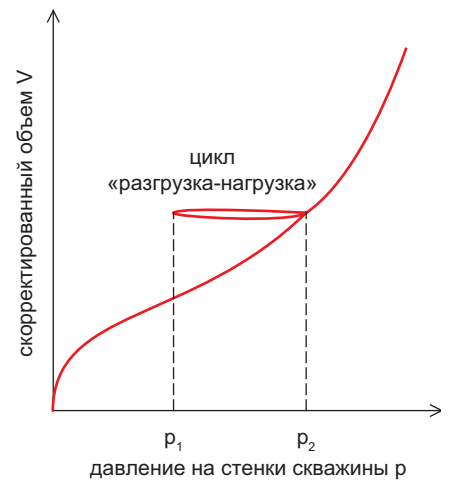


Рис. 14. Прессиометрическая кривая с циклом «разгрузка — повторная нагрузка» [10]

падают на ее линейный участок. Продолжая эту линию до значения двойного объема измерительной камеры, находят величину  $p_L$ .

Если в ходе испытаний выполнить цикл «разгрузка — повторная нагрузка» (рис. 14), то можно определить значение упругого модуля при разгрузке, который обычно обозначается как  $E_R$ .

На практике применяются следующие методы интерпретации результатов прессиометрических испытаний.

#### Полуэмпирические методы

Во Франции [11], где широко используется прессиометр Менарда, полагают, что предельное давление  $p_L$  достигается при двойном расширении измерительной камеры от ее первоначального размера. Расчетное предельное давление  $p_L^*$  находится с учетом бытовых горизонтальных напряжений  $\sigma_{ho}$  из выражения:

$$p_L^* = p_L - \sigma_{ho}. \quad (6)$$

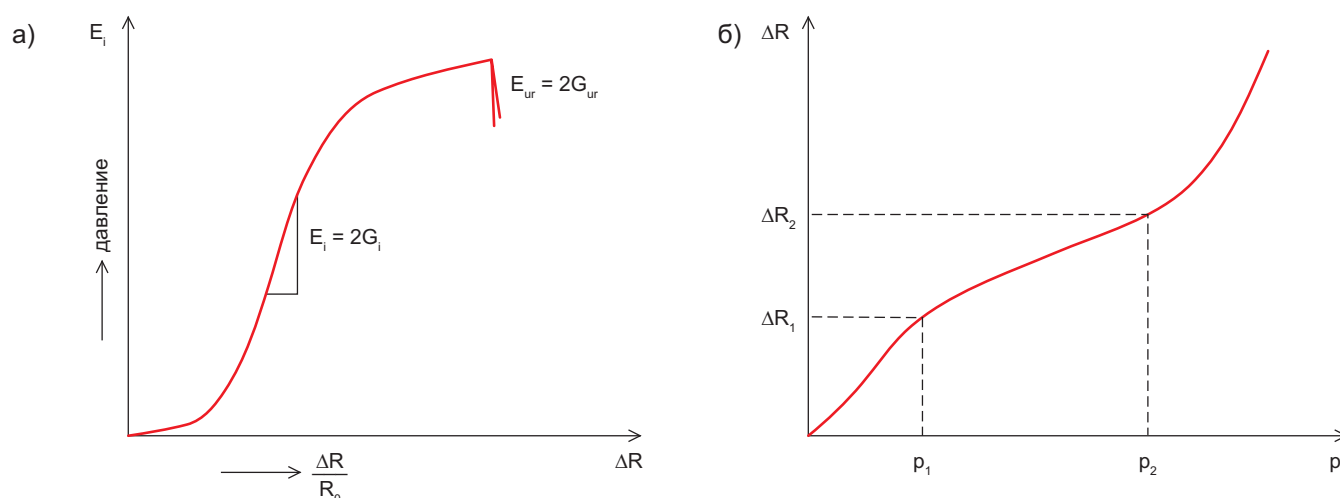
Это давление используется для определения несущей способности фундаментов. Например, для глин  $p_L$  связано с недренамированной прочностью  $c_u$  выражением:

$$c_u = p_L^* / N_p, \quad (7)$$

где  $N_p$  — коэффициент, изменяющийся в пределах от 5,5 до 10,0.

#### Аналитические методы

В практике английских изыскателей [9, 19, 27, 35] используется методика определения большего количества механических характеристик грунтов не только для стандартного, но и для самозабуривающегося прессиометра и



**Рис. 16.** Изменение модуля деформации при увеличении радиуса скважины (а) и зависимость от давления при испытаниях баллонным pressiометром (б)

аналитическая интерпретация результатов испытаний не только для глинистых, но и для песчаных грунтов.

В глинистых грунтах pressiометрическая кривая начинается от уровня бытовых напряжений (см. рис. 11, б) и затем проходит через стадии упругого и упругопластического деформирования. В процессе испытаний выполняется не менее одного цикла «разгрузка — повторное нагружение». В результате анализа данных измерений на отмеченных стадиях деформирования находят бытовое горизонтальное напряжение, модуль упругости и недренированную прочность грунта.

Горизонтальные напряжения от собственного веса грунта определяются с использованием следующей процедуры (рис. 15). На кривой «давление — радиальная деформация» находится точка, соответствующая изменению угла наклона участка упругого деформирования. Начальная часть этой зависимости является функцией податливости резиновой оболочки и устройства для измерения деформации. Обычно при обработке используются результаты измерений, снятых с трех датчиков деформации [19].

Время между окончанием погружения зонда pressiометра и началом испытаний оказывает влияние на получаемые результаты. Рекомендуется начинать измерения через 1–2 ч после погружения зонда.

Результаты испытаний с использованием баллонного pressiометра показывают, что pressiометрический модуль деформации  $E_p$  вначале возрастает с ростом радиального безразмерного отношения  $\Delta R/R_0$ , как показано на рис. 16. Результаты испытаний самозабуривающимся pressiометром отличаются тем, что высокие вначале значения модуля деформации уменьшаются с ростом изменения объема без начального возрастания модуля. Прессиометрический модуль равен двойному значению модуля сдвига. Если грунт при разгрузке ведет себя упруго, то упругий модуль при разгрузке  $E_{ur} = 2G_{ur}$  (где  $G_{ur}$  — модуль сдвига при разгрузке (см. рис. 16)).

В 1977 году авторы работы [26], используя теорию упругопластического расширения цилиндрической полости, получили решение данной задачи для сыпучей среды. Давление  $p_e$ , соответствующее завершению стадии линей-

но-упругого деформирования, определяется выражением:

$$p_e = \sigma_{ho} (1 - \sin \varphi), \quad (8)$$

где  $\sigma_{ho}$  — природное горизонтальное напряжение;  $\varphi$  — угол внутреннего трения грунта.

Эту формулу можно использовать как оценочную для определения  $\varphi$  при известном значении или наоборот. Давление  $p_e$ , соответствующее линейно-упругому деформированию грунта, находят из pressiометрической кривой. Если эту зависимость отобразить как функцию «давление — логарифм изменения объема (или радиуса)», то угол наклона линейного участка кривой  $m$  определяется следующим условием:

$$m = [1 + \operatorname{tg}^2 (45 + \psi / 2)] / (1 + \sin \varphi), \quad (9)$$

где  $\psi$  — угол дилатансии, который можно найти из лабораторных испытаний на сдвиг.

*Продолжение данного обзора методов полевых испытаний грунтов будет опубликовано в одном из следующих номеров журнала «Инженерные изыскания».*

#### Список литературы

1. Амарян С.А. Прочность и деформируемость торфяных грунтов. М.: Недра, 1969. 192 с.
2. Бронштейн М.И., Лушников В.В., Михеев В.В. Прессиометрический метод исследования свойств грунтов и его теоретическое обоснование // Труды VIII Международного конгресса по механике грунтов и фундаментостроению. М.: Стройиздат, 1973. С. 126–131.
3. Бугров А.К. Полевые методы определения характеристик грунтов: учебное пособие. Л.: Изд-во ЛПИ, 1984. 43 с.
4. ГОСТ 20276-85. Грунты. Методы полевого определения характеристик деформируемости. М.: Госстрой СССР, 1984.
5. Денисов В.Н., Минеев Л.Н. Автоматизированный pressiометр для исследования грунтов // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1978. № 4. С. 16–18.
6. Ребрик Б.М. Бурение инженерно-геологических скважин: справочник. М.: Недра, 1990. 336 с.

7. Трофименков Ю.Г., Воробков Л.Н. Полевые методы исследования строительных свойств грунтов. М.: Стройиздат, 1981. 215 с.
8. Электровоздушный радиальный прессиометр ПЭВ-89: Техническое описание / Официальный веб-сайт ЗАО «Геотест». 2005. URL: [http://www.geotest.ural.ru/d\\_pev89.htm](http://www.geotest.ural.ru/d_pev89.htm).
9. A description of the cone pressuremeter and associated parts / The «Cambridge Insitu» website. 1999. URL: <http://www.cambridge-insitu.com/specs/Instruments/CPM.html>.
10. ASTM D 4719-00. Standard test method for prebored pressuremeter testing in soils // Annual Book of ASTM Standards. USA, 2000. V. 04.08.
11. Baguelin F., Jézéquel J.F., Shields D.H. The pressuremeter and foundation engineering // Trans Tech Publications. 1978. V. 2. № 4. P. 617. URL: <http://www.cambridge-insitu.com/specs/Instruments/CPM.html>.
12. Ballouz M., Khoury C. ISST: In-situ shear test for soil investigations: Technical paper // Materials of the conference «Journées Libanaises de Géotechniques» (JLG), Roumieh, May 8, 2002. Branch II. Roumieh, Beirut, Lebanon: Lebanese University, 2002. URL: <http://www.igm.net/igm/Technical.aspx>.
13. Briaud J.-L. The Pressuremeter. Rotterdam, Netherlands: A.A. Balkema, 1992.
14. Briaud J.-L., Shields D.H. A special pressuremeter and pressuremeter test for pavement evaluation and design // Geotechnical Testing Journal. ASTM, 1979. V. 2. № 3. P. 143—151.
15. Briaud J.-L., Shields D.H. Pressuremeter tests at shallow depth // Journal of the geotechnical engineering division. 1981, ASCE. V. 107. № GT8. P. 237–245.
16. Briaud J.-L., Shields D.H. Use of a pressuremeter to predict the modulus and strength of pavement layers // Transportation Research Record. 1981. № 810. P. 37–43.
17. Clarke B.G., Allan P.G. A self-boring pressuremeter for testing weak rock // Proceedings of the 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. 1989. V. 1. P. 211–214.
18. Clayton C.R.I., Matthews M.C., Simons N.E. Site investigation. 2d edition. Oxford, UK: Blackwell Science, 1995. 584 p.
19. Dalton J.C.P., Hawkins P.G. Fields of stress — some measurements of in-situ stress in a meadow in the Cambridgeshire countryside // Ground Engineering. 1989. V. 15. № 4. P. 15–23.
20. EN ISO 22476-8: Geotechnical investigation and testing. Field testing. European Union, 2005–2009. 18 p.
21. Gibson R.E., Anderson W.E. In situ measurement of soil properties with the pressuremeter // Civil Engineering and Public Works Review. 1961. V. 56. № 658. P. 615–618.
22. Handy R.L. Evolution of geotechnical soil testing. I. Field tests // International Journal of Geotechnical Engineering. 2008. V. 1. P. 11–28.
23. Handy R.L. Measurement of in-situ shear strength // Proceedings of the Conference on In Situ Measurement of Soil Properties. ASCE, 1975. V. 2. P. 143–149.
24. Henderson G., Smith P.D.K., St. John H.D. The development of the push-in pressuremeter for offshore site investigation // Proceedings of the Conference on Offshore Site Investigation, London, March 1979. London: Society for Underwater Technology, 1979. P. 157–167.
25. Hughes J.M.O., Robertson P.K. Full-displacement pressuremeter testing in sand // Canadian Geotechnical Journal. 1985. V. 22. № 3. P. 298–307.
26. Hughes J.M.O., Wroth C.P., Windle D. Pressuremeter tests in sands // Geotechnique. 1977. V. 27. № 4. P. 455–477.
27. Jamiolkovski M., Ladd C.G., Germaine J.T., Lancellotta R. new developments in field and laboratory testing of soils // Proceedings of the 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. 1985. V. 1. P. 57–153.
28. Lutenecker A.J., Hallberg G.R. Borehole shear test in geotechnical investigations / A Special Technical Publication of the American Society for Testing and Materials № 740. West Conshohocken, PA, USA: Laboratory Shear Strength of Soil, ASTM, 1981. P. 556–578.
29. Mair D.M., Wood D.M. Pressuremeter testing: methods and interpretation / CIRIA Ground Engineering Report. London: Butterworths, 1987. 160 p.
30. Meigh A.C., Greenland S.W. In situ testing of soft rocks // Proceedings of the 6th International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering. Montreal, 1965. V. 1. P. 73–76.
31. Menard L. Mesures in situ des propriétés physique des sols / Annales des Fonts et Chaussées. 1957. V. 127. P. 357–377.
32. Reid W.M., St. John H.D., Fyffe S., Rigden W.J. The push-in pressuremeter // Proceedings of the Symposium on the Pressuremeter and its Marine Applications. Paris: Editions Technip, 1982. P. 247–261.
33. RocTest Inc. Pressuremeter Model G-Am Menard / The «RocTest, Smartec, Telemac. Integrated instrumentation and structural health monitoring solutions» website. Products overview by parameter. In-situ testing. 07.001C - G-AM II Ménard Pressuremeter. 2011. URL: <http://www.roctest-group.com/products>.
34. Schnaid F. In situ testing in geomechanics: the Main Tests. London, UK: Taylor & Francis, 2009. 330 p.
35. Self boring pressuremeters - an introduction / The «Cambridge Insitu» website. 2006. URL: [http://www.cambridge-insitu.com/csbp\\_leaflet2.htm](http://www.cambridge-insitu.com/csbp_leaflet2.htm).
36. Withers N.J., Howie J., Hughes J.M.O., Robertson P.K. Performance and analysis of cone pressuremeter tests in sands // Geotechnique. 1989. V. 39. № 3. P. 433–454.
37. Withers N.J., Schaap L.H.J., Dalton J.C.P. The development of a full displacement pressuremeter // Proceedings of the 2d International Symposium «The Pressuremeter and its Marine Applications». ASTM SPT 950, 1986. P. 38–56.
38. Wroth C.P., Hughes J.M.O. An instrument for the in situ measurement of the properties of soft clays // Proceedings of the 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Moscow, 1973. V. 1. P. 487–494.