

## Прессиометрические испытания в Северной Америке: обзор. Часть 1



Заглавное фото: [directindustry.com.ru/prod/apageo/product-60855-389496.html](http://directindustry.com.ru/prod/apageo/product-60855-389496.html)

В 2022 году по инициативе и при поддержке генерального директора ООО «Петромоделинг» Алексея Бершова редакция журнала «ГеоИнфо» продолжит знакомство читателей с методом прессиометрических испытаний грунтов. Данные испытания большинством изыскателей и проектировщиков воспринимаются как «более дешевая и простая альтернатива штамповых испытаний». На деле данная технология является уникальным методом испытаний грунтов в массиве. Она используется для определения как действующих горизонтальных напряжений и коэффициента  $K_0$  (без которого, как известно, невозможны оценка начального (природного) состояния геологической среды и дальнейшие расчетные обоснования конструкций), так и физико-механических откликов геологической среды на горизонтальное механическое воздействие. Например, таких как зависимость между напряжениями и деформациями и недренированная прочность.

Как отмечает А. Бершов, понимание методов оценки напряженно-деформированного состояния массива грунтов очень важно для эффективного перехода к трехмерному моделированию геологической среды и построению инженерных цифровых моделей геологической среды. Это базовая часть информационной цифровой модели объекта капитального строительства, без которой любые информационные проектные построения просто "повисают в воздухе".

Сегодня предлагаем вниманию читателей адаптированный перевод обзора [1] по прессиометрическим испытаниям с акцентом на проблемы таких исследований в США и Канаде, написанный профессором кафедры гражданского строительства Университета Нью-Гемпшира Жаном Бенуа (США) и доцентом кафедры гражданского строительства Университета Британской Колумбии Джоном Хауи (Канада). Эта работа была опубликована в 2014 году в рецензируемом международном журнале по геотехнике и геоэкологической инженерии *Soils and Rocks* («Дисперсные и скальные грунты»), который ежеквартально издается на английском языке в печатной и электронной версиях Бразильской ассоциацией механики грунтов и геотехники и Португальским геотехническим обществом.

Практически все содержимое интернет-версии данного журнала, в том числе и переведенная статья, находится в открытом доступе в соответствии с лицензией Creative Commons Attribution BY (CC BY), в связи с чем эти материалы можно использовать в некоммерческих и коммерческих целях, переводить или изменять при условии ссылки на первоисточник.

Прессиометр был разработан в 1957 году Луи Менаром. Это устройство состоит из цилиндрического зонда, который вводится в грунт путем самозабуривания или помещения в предварительно пройденную скважину, а затем расширяется, оказывая давление на грунт. На основе соответствующих измерений получают кривую зависимости расширения от давления. Методы интерпретации результатов прессиометрических испытаний, основанные на теории расширения полости, применяемой к реалистичным моделям поведения грунта, позволяют получить такие характеристики тестируемого материала, как горизонтальное напряжение в условиях естественного залегания, жесткость, прочность и изменение объема.

С момента своего появления прессиометрические испытания (PMT) были популярной темой для исследований, но не получили широкого распространения в практике геотехнических изысканий в Северной Америке, где по-прежнему преобладают стандартные динамические испытания на пенетрацию (SPT), а со сравнительно недавних пор – статические испытания на внедрение конуса с измерением порового давления (CPTu). В тот же период во Франции основными инструментами при геотехнических изысканиях для проектирования фундаментов стали прессиометры, данные которых используются там эмпирически с применением также очень большого количества испытаний на нагрузку и практического опыта. В переведенном обзоре рассматривается использование прессиометрических испытаний в практике Северной Америки, обсуждаются их сильные и слабые стороны, выявляются тенденции в их применении для описания грунтовых условий площадки и геотехнического проектирования, а также определяются возможные причины их недостаточного внедрения в отрасли.

Авторы переведенной работы пришли к выводу, что метод PMT не может конкурировать с CPTu и SPT для общей характеристики площадки, на которой такие испытания возможны, но, по их мнению, PMT имеет большой потенциал для определения проектных геотехнических параметров проблемных материалов, таких как твердые, очень плотные, гравелистые, остаточные, сапролитовые или латеритные дисперсные грунты, слабые и трещиноватые скальные породы, мерзлые грунты и лед. PMT также находит применение во всех грунтах, где возможные серьезные последствия нарушений требуют детальнейших расчетов, анализа и проектирования. Жан Бенуа и Джон Хауи также подчеркнули необходимость более серьезного обучения практикующих геотехников в отношении использования прессиометрических испытаний.

Консультационную помощь редакции при подготовке адаптированного перевода оказали генеральный директор ООО «Петромоделлинг» Алексей Бершов и другие специалисты этой компании.

Сегодня представляем первую часть переведенного обзора, посвященную истории разработки и усовершенствования инструментов и методик прессиометрических испытаний.

## БЕНУА ЖАН (BENOIT JEAN)

Профессор кафедры гражданского строительства Университета Нью-Гемпшира, доктор наук, г. Дарем, шт. Нью-Гемпшир, США, [jean.benoit@unh.edu](mailto:jean.benoit@unh.edu)

## ХАУИ ДЖОН (HOWIE JOHN)

Доцент кафедры гражданского строительства Университета Британской Колумбии, доктор наук, г. Ванкувер, пров. Британская Колумбия, Канада, [jahowie@civil.ubc.ca](mailto:jahowie@civil.ubc.ca)

## ВВЕДЕНИЕ

Первоначальную концепцию устройства прессиометра в 1933 году предложил Кёглер (Kogler), который разработал прибор, состоявший из резинового баллона, пережатого с обоих концов, который опускался в предварительно пробуренную скважину. Его расширение оказывало давление на стенки скважины и позволяло определять характеристики напряженно-деформированного состояния грунта (это был прототип так называемых *радиальных, или баллонных, прессиометров, вводимых в предварительно пройденную скважину.* – *Ред.*).

Не зная о работе Кёглера, Менар в 1957 году (Menard, 1957) разработал значительно более совершенный прессиометр, который широко использовался в инженерной практике более полувека (в публикациях на русском языке фамилию этого исследователя часто пишут как «Менард», но, поскольку она французского происхождения, то более правильным произношением и написанием будет «Менар». – *Ред.*).

Несмотря на простоту концепции устройства и работы такого прибора, имеется ряд проблем, связанных с его установкой в скважину. Ведь предварительная проходка скважины неизбежно вызывает нарушения грунта как из-за самого процесса бурения, так и из-за разгрузки со стороны ее ствола. При использовании прессиометра Менара в относительно жестких дисперсных и в слабых скальных грунтах эти проблемы легко преодолеваются, но в пластичных глинах и таких несвязных грунтах, как песок, эти проблемы решить труднее. Однако, если принять, что при тщательной подготовке ствола скважины нарушения в грунте и снятие напряжения минимальны, измерения расширения полости и результаты их интерпретации могут быть включены в набор правил проектирования, полученных эмпирическим путем, но на основе теории, и использоваться непосредственно в соответствии с этими правилами. Получаемые результаты также можно использовать косвенно, оценивая параметры прочности и деформирования дисперсных и скальных грунтов, которые можно применять при традиционном геотехническом проектировании.

Признавая влияние предварительного бурения на полученные параметры и соответствующую необходимость использования эмпирических корреляций, французские и английские исследовательские группы (Baguelin et al., 1972; Wroth, Hughes, 1972) независимо друг от друга разработали *самозабуривающийся прессиометр*, который может быть введен в грунт с минимальными нарушениями последнего. Такой прибор по концепции работы аналогичен описанному выше, за исключением того, что он продвигается внутрь грунта посредством сбалансированного процесса вталкивания при работе режущего инструмента в нижней части с одновременной промывкой водой и удалением шлама на поверхность через кольцевое пространство внутри корпуса

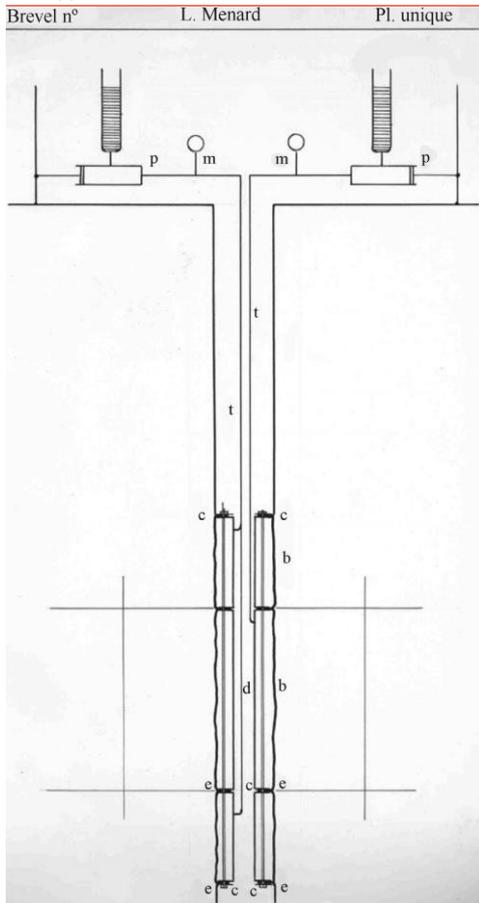
прессиометра. Результаты испытаний таким прибором использовались в первую очередь для получения прочностных и деформационных параметров грунта для анализа и/или проектирования с применением традиционных методов (например, метода конечных элементов).

В основном в целях повышения производительности изысканий, особенно на морском шельфе, были внедрены и другие типы прессиометров – вводимые в грунт с помощью вдавливания (*вдавливаемые прессиометры*). Они также всегда вызывают воспроизводимое количество нарушений, на которое не влияет работа того или иного оператора.

Независимо от типа используемого прессиометра или метода его помещения в грунт, как только им достигается необходимая глубина, выполняется испытание следующим образом. Мембрана расширяется и давит на стенки скважины, при этом измеряются и регистрируются давление, смещение и в некоторых случаях поровое давление воды. Могут быть проведены испытания на расширение с контролем либо напряжения, либо деформации. Каждый тест обычно можно провести за 10–30 мин. в зависимости от типа грунта и процедуры испытания.

## **ИСТОРИЯ ВОПРОСА**

Как уже отмечалось, прессиометр, помещаемый в предварительно пробуренную скважину, в том виде, в каком мы его знаем сегодня (Menard, 1957), был разработан Луи Менаром во время его учебы в Национальной школе мостов и дорог в Париже. В рамках своей дипломной работы Менар и двое его коллег (Gauthier et al., 1954) описали прессиометр, показанный на рисунке 1, а также его использование и теоретическое исследование, на основе которого должна интерпретироваться кривая, полученная при испытании. Хотя рукопись составляла всего 20 страниц, в ней в том числе были рассмотрены напряжения и смещения вокруг расширяющейся цилиндрической полости для случаев связных грунтов, водонасыщенных песков и глин, неводонасыщенных грунтов и неупругих грунтов с последующим приведением численных примеров для сухого и водонасыщенного грунта. Менар с соавторами пришли к выводу, что основные преимущества использования прессиометра – это возможность изучения зависимостей «давление – деформация» для грунтов и то, что такие исследования должны пролить свет на интерпретацию получаемых результатов. Отметим, что на том этапе они принимали, что в результате подготовки ствола скважины не происходит разрыхления (*remolding*) грунта. Затем 19 января 1955 года Менар подал в Париже заявку на патент. Схема прессиометра, аналогичная описанной в этой заявке, представлена на рисунке 1.



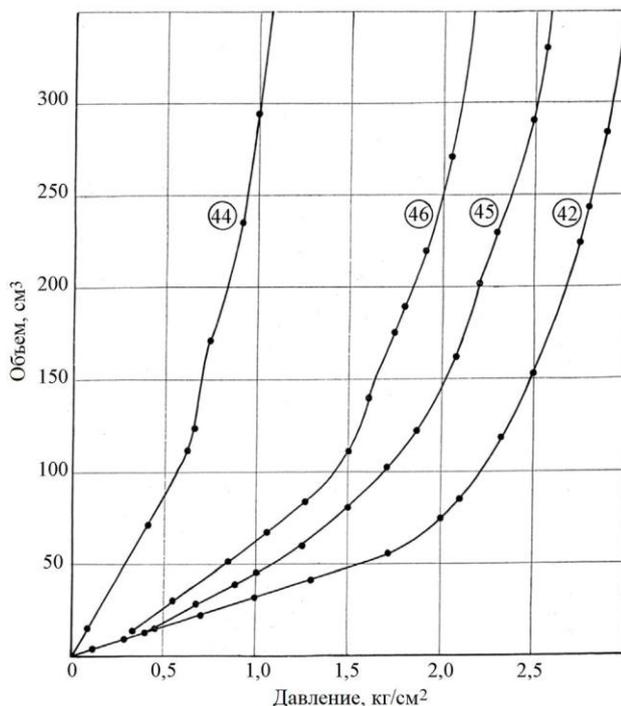
**Рис. 1.** Схема исходного прессиометра Менара (Gauthier et al., 1954)

После учебы в Париже Луи Менар отправился в США, чтобы защитить магистерскую диссертацию под руководством доктора Ральфа Пека (Ralph Peck). Его диссертация под названием «Прибор для измерения прочности грунтов в условиях их естественного залегания» была закончена и защищена в 1957 году в Иллинойском университете. Менар осознавал, что с использованием этого его изобретения – прессиометра – конкурируют другие полевые методы, такие как испытания крыльчаткой (для глин) и стандартные динамические испытания на пенетрацию (SPT – standard penetration testing) (для песков). Однако он все же рекомендовал применение своего инструмента, потому что «теоретическая интерпретация кривой “напряжение – деформация” сразу дает значения сцепления, угла внутреннего трения и модуля упругости». Из своей работы он сделал следующие выводы:

- а) прессиометрия – очень точный метод для исследований подповерхностных условий;
- б) несущая способность грунта увеличивается с увеличением его модуля упругости.

Часть диссертационной работы Менара включала испытания различных грунтов, таких как ледниковые морены, аллювиальные и уплотненные глины и песок. На рисунке 2 показаны результаты прессиометрических тестов, выполненных в глинах в городе Чикаго (США) на небольшой глубине в ходе исследования, предназначенного для оценки разрыхления (remolding) грунта из-за забивки двутавровых свай (с Н-образным сечением) и из-за снятия нагрузки в результате выемки грунта под строительство котлована для

возведения чикагского исторического небоскреба «Инленд Стил Билдинг» (Inland Steel Building). Испытание, обозначенное номером 42, проводилось на расстоянии 1 м от свай, а испытание 44 выполнялось на той же глубине, но на расстоянии всего 0,3 м. Тесты показали снижение недренированной прочности примерно на 40% в результате забивки свай и снятия нагрузки из-за выемки грунта, в то время как модуль упругости изменился с 41 кг/см<sup>2</sup> (4 МПа) для ненарушенной глины до 6 кг/см<sup>2</sup> (0,6 МПа) для разрыхлившейся глины. Проведя испытания на двух других объектах, Менар смог продемонстрировать хорошее соответствие между его теоретическими выводами и экспериментальными данными.



**Рис. 2.** Результаты pressiометрических испытаний, проведенных Менаром в глинах Чикаго для возведения известного исторического небоскреба «Инленд Стил Билдинг» (Inland Steel Building) (по Menard, 1957)

Менар осознал некоторые ограничения своего первоначального теоретического подхода к интерпретации pressiометрических данных и начал разрабатывать эмпирические правила, регулирующие использование результатов таких испытаний для проектирования фундаментов (Ladanyi, 1995). Сначала была осуществлена валидация этого подхода путем сравнения его итогов с данными полномасштабных испытаний на нагрузку. С тех пор он был улучшен и расширен на основе исследований и практики, особенно во Франции, где он стал доминирующим инструментом при инженерных изысканиях для проектирования фундаментов.

Хотя исходный pressiометр Менара, показанный на рисунке 1, требовал диаметра скважины 140 мм, второй прототип был уменьшен до 50 мм (Cassan, 2005). В попытках сделать pressiометрию более надежным и точным методом испытаний во Франции постоянно внедрялись усовершенствования и модификации защитных камер, камеры давления, систем измерения объема и давления, защиты мембран, блока управления и

регистрации. Эти изменения также позволили использовать прессиометры на более глубоких уровнях от поверхности и при более высоких давлениях. Размеры этих приборов также менялись для улучшения отношения их длины к диаметру. Некоторые группы исследователей за пределами Франции также модифицировали детали прессиометра и систему измерения расширения его мембраны, используя различные датчики для определения смещений вместо объема.

Прессиометр, помещаемый в предварительно пробуренную скважину, успешно использовался в твердых дисперсных грунтах и в слабых скальных породах, в которые другие инструменты не могут проникать или не имеют возможности измерять геотехнические параметры. Специальные прессиометрические зонды с прочными мембранами в тщательно подготовленных стволах скважин могут обеспечивать получение кривых «давление – расширение», интерпретируя которые можно оценивать характеристики жесткости грунтов и в некоторых случаях параметры их прочности.

Менар защищал свое изобретение от внешнего влияния в течение 10 лет благодаря патенту, но в 1969 году начал продавать лицензии на его использование другим лицам (Ladanyi, 1995). И это открыло концепцию прессиометра для большого количества исследований.

Так, группами ученых во Франции (Baguelin et al., 1972) и Англии (Wroth, Hughes, 1972) были разработаны самозабуривающиеся прессиометры. Между французской (PAFSOR) и британской (CamKoMeter) системами были некоторые различия, но цель была достигнута одна и та же – устранение мешающих эффектов из-за нарушений естественного залегания грунта в процессе предварительного бурения скважины. Как уже упоминалось выше, ведение самозабуривающегося зонда в грунт происходит с помощью расположенной в его нижней части режущей системы. Когда прессиометр вдавливаются в грунт, последний попадает в режущий башмак, разбуривается вращающимся резцом и вымывается на поверхность земли через кольцевое пространство внутри корпуса зонда. (Успешно использовались и другие инструменты для ввода прессиометрического зонда в грунт, например системы гидравлического или пневматического бурения (с помощью напорной водяной или воздушной струи соответственно) (Benoit et al., 1995), которые часто оказывались более эффективными по времени в дисперсных грунтах.)

По достижении требуемой для испытания глубины мембрана зонда расширяется и давит на стенки скважины. При этом непрерывно автоматически измеряются давление, смещения (или объем) и в некоторых случаях давление поровой воды. Испытание самозабуривающимся прессиометром может проводиться с контролируемым напряжением или деформацией. Поскольку такой зонд вводится в грунт с минимальными нарушениями, измерения расширения полости можно анализировать, используя базовую механику сплошных сред, и, следовательно, не полагаться на эмпирические корреляции для получения параметров грунта для проектирования фундаментов.

В попытках обойти требования к подготовке ствола скважины для испытаний или к использованию часто отнимающего много времени введения в грунт самозабуривающегося зонда были разработаны и другие типы прессиометров (главной движущей силой этих инноваций стала необходимость проведения прессиометрических испытаний на морском шельфе). В том числе был разработан вдавливаемый прессиометр (Reid et al., 1982), который имел расширяющуюся часть вокруг трубки, подобной трубке пробоотборника (грунтоносу). Однако чуть позже было показано (Bandis, Lacasse, 1986), что введение этого устройства в грунт вызывало значительные нарушения последнего. А то, что между испытаниями зонд приходилось извлекать из отверстия, не привело к

значительному повышению производительности. Другой разработкой, нацеленной на рынок для испытаний на шельфе, был вдавливаемый конусный прессиометр (Hughes, Robertson, 1985; Withers et al., 1986). Для тестирования дорожного покрытия была разработана такая адаптация, как лопастной прессиометр (Pencil Pressuremeter) (Briaud, Shields, 1979). Эти инструменты были основаны на концепции, согласно которой было бы лучше создать неизменную (воспроизводимую) степень нарушения грунта, прилегающего к расширяющемуся элементу (дополнительным преимуществом чего является повышение производительности).

*В следующей части обзора речь пойдет о подходах к анализу и интерпретации кривых, полученных при прессиометрических испытаниях.*

**Список литературы, использованной авторами переведенного обзора [1],** можно посмотреть в конце оригинальной статьи по ссылке: [soilsandrocks.com.br/soils-androcks/SR37-3\\_211-231.pdf](http://soilsandrocks.com.br/soils-androcks/SR37-3_211-231.pdf).

#### **Источник для перевода**

1. Benoit J., Howie J.A. A View of Pressuremeter Testing in North America // Soils and Rocks (International Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering). San Paulo, 2014. Vol. 37. № 3. P. 211–231. URL: [soilsandrocks.com.br/soils-androcks/SR37-3\\_211-231.pdf](http://soilsandrocks.com.br/soils-androcks/SR37-3_211-231.pdf).