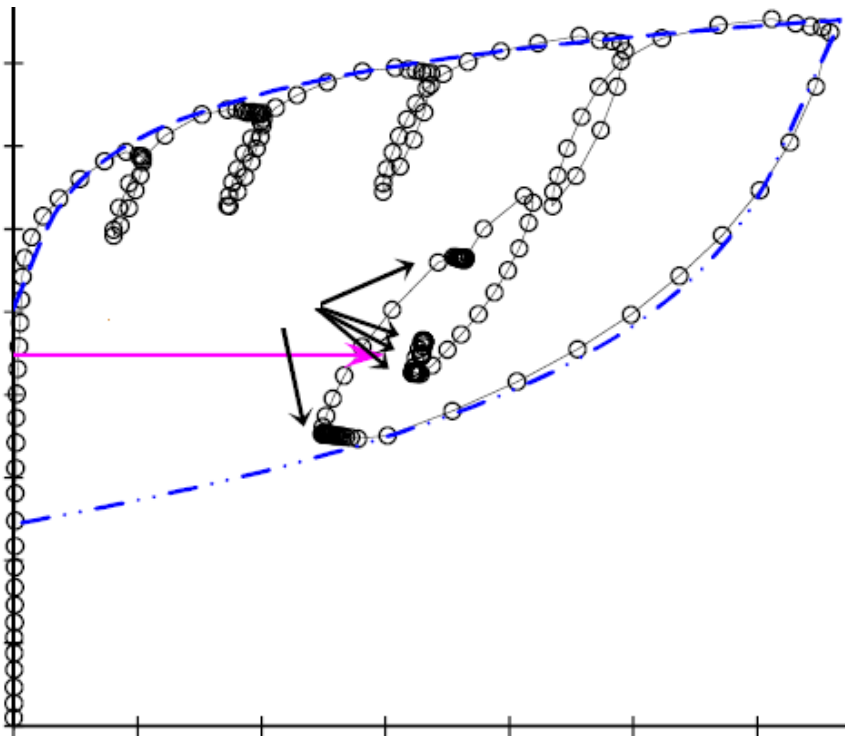


Об определении природного горизонтального напряжения в сизтлской глине с помощью прессиометра. Часть 2



По инициативе и при поддержке ООО «Петромоделинг» редакция журнала «ГеоИнфо» продолжает знакомство читателей с методом прессиометрических испытаний грунтов. Данные испытания большинством изыскателей и проектировщиков воспринимаются как «более дешевая и простая альтернатива штамповых испытаний». На деле эта технология является уникальным методом испытаний грунтов в массиве. Она используется для определения как действующих горизонтальных напряжений и коэффициента горизонтального давления грунта в состоянии покоя 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.

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

Сегодня предлагаем вниманию читателей вторую часть обзора материалов статьи «Измерение горизонтального напряжения *in situ* в озерно-ледниковой сизтлской глине с использованием прессиометра» [1], написанной Оливером Хупсом и Джоном Хьюзом и опубликованной в 2014 году в «Журнале по геотехнике и геоэкологической инженерии» (Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering), издаваемом Американским обществом инженеров-строителей (ASCE). В предыдущей части были описаны грунтовые условия на изученной территории. А сейчас кратко рассмотрим устройство использованного в исследовании [1] прессиометра, перечислим процедуры выполненных авторами статьи [1] испытаний и методы оценки ими природного горизонтального напряжения, чуть подробнее опишем методы проверки

необработанной прессиометрической кривой и способ ее коррекции с использованием комплексных геомеханических моделей грунта. И, что самое интересное, рассмотрим предложенный Хупсом и Хьюзом новый метод поисков равновесного давления путем тестов на ползучесть, выполняемых на стадии разгрузки. Отметим, что нумерация рисунков продолжит начатую в предыдущей части.

АНАЛИТИЧЕСКАЯ СЛУЖБА ГЕОИНФО

info@geoinfo.ru

БЕРШОВ АЛЕКСЕЙ ВИКТОРОВИЧ

Генеральный директор Группы компаний «Петромоделинг»

alexey.bershov@petromodeling.com

ООО "ПЕТРОМОДЕЛИНГ"

Генеральный спонсор «ГеоИнфо»

info@petromodeling.com

Использованный прессиометр и процедуры выполненных испытаний

Авторы статьи [1] использовали в своем исследовании прессиометр кембриджского типа, помещаемый в предварительно пробуренную скважину (рис. 5). Испытания довашонской (четвертичной) озерно-ледниковой глины (Qpgl) от твердой до очень твердой, представлявшей для Хупса и Хьюза [1] основной интерес, проводились в испытательных карманах длиной 90 см, пробуренных с использованием трехшарошечного долота диаметром, немного меньшим диаметра прессиометра.

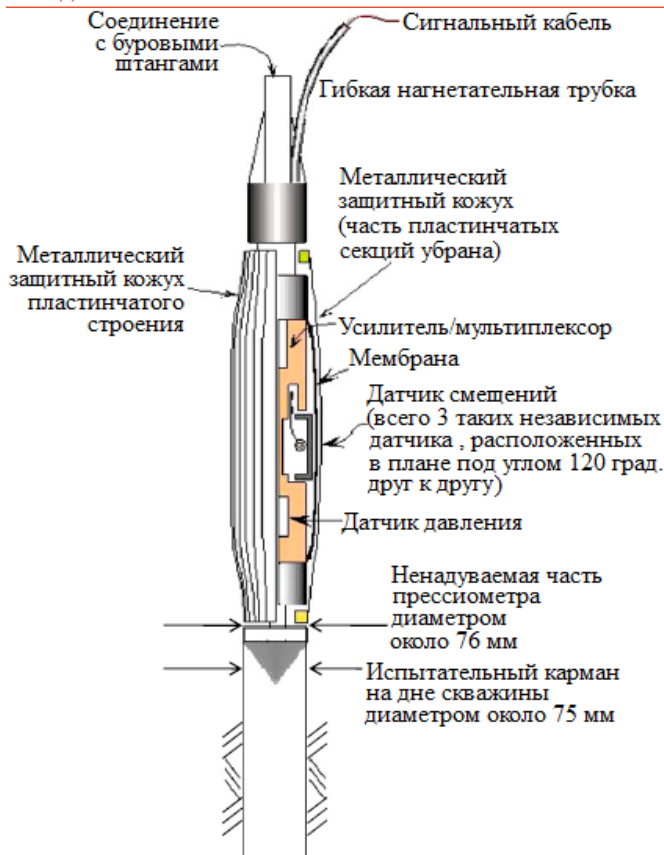


Рис. 5. Устройство прессиометра высокого давления, помещаемого в предварительно пробуренную скважину (по [1])

После помещения такого прибора в испытательный карман его измерительную камеру начинают накачивать газообразным азотом. Приложенное давление газа p и смещения мембраны прессиометра измеряются электронным способом с использованием датчика давления и трех датчиков смещений (размещенных в плане под углами 120 град. друг к другу). Радиальные смещения мембраны Δr , измеренные этими тремя датчиками, усредняются и пересчитываются в относительную деформацию полости ϵ_R (равную $\Delta r/r_0$, где r_0 – начальный радиус мембраны прессиометра). Результаты этих измерений передаются на поверхность земли и отображаются на экране портативного компьютера. Обычно за одно испытание получают от 100 до 800 точек данных (показания снимаются через каждые 5 секунд).

Каждое из выполненных авторами работы [1] прессиометрических испытаний состояло из:

- 1) стадии нагружения (расширения);
- 2) нескольких циклов «разгрузка – повторное нагружение», проводимых во время стадии нагружения;
- 3) этапа разгрузки (сужения);
- 4) тестов на ползучесть (creep tests), выполняемых во время стадии разгрузки.

Использованные методики оценки природного горизонтального напряжения

Для оценки горизонтальных напряжений в грунтах вдоль трассы тоннеля на автодороге SR 99, строительство которого планировалось выполнить в деловом центре города Сиэтл в США, использовалось несколько методов. Именно для представленных в статье [1] исследований применялись следующие три из них:

- 1) исследование исходной прессиометрической кривой;
- 2) подбор подходящей комплексной геомеханической модели грунта к данным полевых испытаний;
- 3) поиски равновесного давления путем тестов на ползучесть, выполняемых во время стадии разгрузки.

Полученные результаты были сопоставлены с итогами лабораторных испытаний на основе применения зависимости между коэффициентом горизонтального давления грунта в состоянии покоя K_0 и коэффициентом переуплотнения OCR и зависимости между K_0 и числом пластичности PI.

Далее Хупс и Хьюз [1] рассматривают перечисленное более подробно.

Методы проверки и использования необработанной прессиометрической кривой

1. Первый из рассмотренных в статье [1] методов применения необработанной прессиометрической кривой – это метод Марслэнда и Рэндольфа (Marsland, Randolph, 1977). Он заключается в использовании начального участка кривой « $p - \epsilon_R$ » для оценки начала (соответствующего общему природному горизонтальному напряжению σ_{h0}) и конца (соответствующего пределу текучести, равному $\sigma_{h0} + S_{U,LOAD}$, где $S_{U,LOAD}$ – недренированная прочность при расширении прессиометра) исходного упругого участка этой кривой.

Как указывают авторы работы [1], основное преимущество применения начального участка кривой « $p - \epsilon_R$ » для оценки величины σ_{h0} заключается в том, что для прессиометрического испытания с минимальным нарушением грунта значение σ_{h0} можно получить непосредственно из результатов измерений. С другой стороны, основной недостаток этого метода заключается в том, что нарушения грунта могут сильно повлиять на начальную часть кривой « $p - \epsilon_R$ ». Если испытательный карман слишком велик или если во время его создания окружающий грунт разрыхляется, то оцененная величина σ_{h0} , вероятно, будет слишком низкой (если вообще будет заметной). Если же прессиометр вталкивается в испытательный карман со значительным усилием, то окружающий грунт может уплотниться, что может привести к дополнительным горизонтальным напряжениям *in situ*, действующим на мембрану, в результате чего наблюдаемая начальная жесткость и, следовательно, кажущаяся величина σ_{h0} будут выше, чем их реальные значения.

Хупс и Хьюз [1] указывают, что метод Марслэнда и Рэндольфа был опробован на прессиометрических кривых, полученных при изысканиях для строительства автомагистрали SR-99, но полученные значения σ_{h0} менялись раз от раза и поэтому были сочтены ненадежными.

2. Второй из названных в статье [1] методов анализа необработанных прессиометрических данных – это использование корреляции между точкой первого перегиба кривой « $p - \epsilon_R$ » и величиной σ_{h0} .

3. Третий из перечисленных в работе [1] методов заключается в простом применении в качестве оценки σ_{h0} величины давления при первых признаках начала радиальной деформации (называемого «отрывом» – lift-off) (Powell, 1990). Однако, как отмечают Хупс и Хьюз [1], из-за нарушений грунта в результате бурения использование этого метода «отрыва» для испытаний прессиометром, помещаемым в предварительно пробуренную скважину в отложениях Q_{rg1} вдоль трассы SR-99, было невозможным.

Аппроксимация экспериментальных данных с использованием комплексных геомеханических (конститутивных) моделей грунта

Далее авторы статьи [1] рассматривают подход, который заключается в использовании сопоставления необработанных результатов прессиометрических испытаний (исходной кривой « $p - \epsilon_R$ ») и кривых, соответствующих комплексным геомеханическим моделям грунта, для подбора наиболее подходящей модели для аппроксимации экспериментальных данных.

В исследовании Хупса и Хьюза [1] поведение связного материала (глин, глинистых алевроитов) аппроксимировалось с использованием комплексной геомеханической модели глины Гибсона и Андерсона (Gibson, Anderson, 1961). В ней для случая расширения цилиндрической полости принимается простая линейно-упругая идеально-пластическая модель грунта, то есть что модуль сдвига при деформации полости постоянен, а недренированная прочность на сдвиг остается неизменной после начала пластического деформирования (текучести).

В модели Гибсона и Андерсона принимается, что кривая « $p - \epsilon_R$ » может быть определена тремя переменными – общим природным горизонтальным напряжением σ_{ho} , модулем сдвига G и недренированной прочностью S_u . Позже Джеффрис (Jefferies, 1988) расширил эту модель, включив в нее недренированную прочность на этапе разгрузки $S_{u,UNLOAD}$.

На рисунках 6 и 7 представлены типичные кривые, построенные по необработанным данным прессиометрических испытаний, и наложенные на них кривые на основе комплексной геомеханической модели.

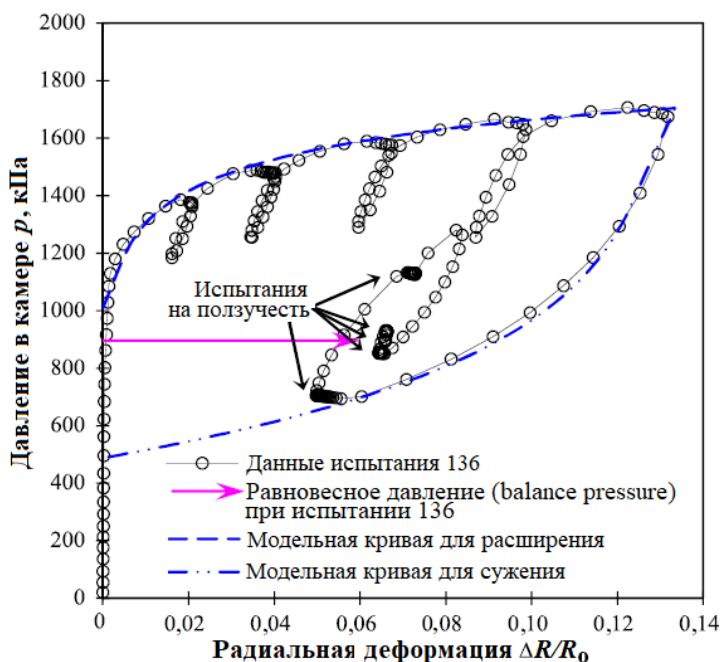


Рис. 6. Кривые, построенные по необработанным данным измерений при прессиометрическом испытании 136 в скважине ТБ-321 и на основе комплексной геомеханической модели грунта с указанием точки равновесного давления (balance pressure point) (по [1])

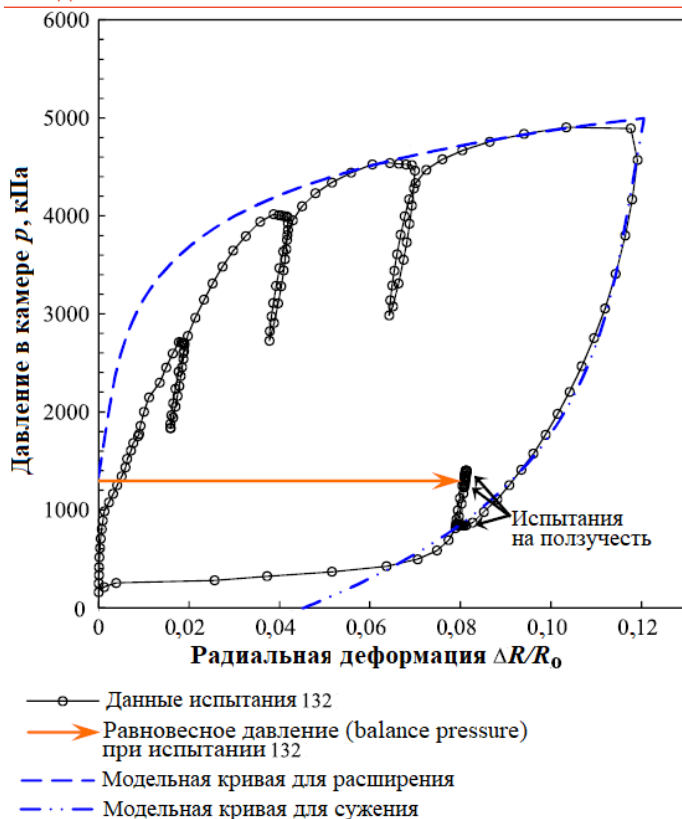


Рис. 7. Кривые, построенные по необработанным данным измерений при pressiометрическом испытании 132 в скважине ТБ-320 и на основе комплексной геомеханической модели грунта с указанием точки равновесного давления (balance pressure point) (по [1])

При моделировании поведения отложений Qrgl авторы статьи [1] приняли модуль сдвига грунта G равным G_{UR} – модулю сдвига, полученному для циклов «разгрузка – повторное нагружение» на необработанной кривой « $p - \epsilon_R$ » для этих грунтов. Значения G_{UR} для различных циклов «разгрузка – повторное нагружение» были относительно постоянными в пределах каждого испытания (см. рис. 6, 7). Однако из-за нарушений, наблюдавшихся на начальных участках для большинства тестов (см. рис. 7), Хупс и Хьюз [1] сочли ненадежными модули сдвига, полученные для начального этапа упругого нагружения.

Недренированная прочность на сдвиг для стадии нагружения $S_{U,LOAD}$ определялась авторами работы [1] в процессе моделирования по методике Джеффриса (Jefferies, 1988).

Для независимых проверок Хупс и Хьюз [1] использовали хорошо известные зависимости:

- между недренированной прочностью S_U и максимальным наклоном участков кривых « $p - \epsilon_R$ », построенных в логарифмическом масштабе, после предела текучести (Gibson, Anderson, 1961);
- между S_U и предельным давлением при испытании (Gibson, Anderson, 1961; Ladanyi, 1963; Marsland, Randolph 1977).

Далее авторы статьи [1] поясняют свои действия следующим образом. Форму модельной кривой « $p - \epsilon_R$ » определяют значения G и S_U . Изменения величин σ_{h0} просто переносят модельную кривую « $p - \epsilon_R$ » вверх или вниз по оси давления p . Следовательно, как только G и S_U будут установлены, значения σ_{h0} можно подобрать на глаз, чтобы обеспечить хорошее соответствие между модельной и необработанной экспериментальной кривыми.

Значения предельных давлений по данным pressiометрических испытаний в сильно деформированных зонах отложений Qrgl оказались, как и ожидали авторы работы [1],

не ниже, чем при испытаниях в относительно ненарушенных зонах (см. таблицу 3 в первой части обзора). Фактически, как и в случае теста 132 (см. рис. 7), многие предельные давления при испытаниях в сильно деформированной глине были выше, чем при тестах в относительно ненарушенной глине (например, при испытании 136, см. рис. 6). Испытания 132 и 136 проводились на расстоянии около 30 м друг от друга и примерно на одной и той же высотной отметке, но тест 132 показал существенно более высокое предельное давление (рис. 8). Также стоит отметить, что в случае теста 132 глина имела более высокое число пластичности, чем при испытании 136, поскольку более высокая пластичность обычно коррелирует с большей прочностью (и, следовательно, с более высоким предельным давлением). Оба теста дали высококачественные данные после предела текучести. Следовательно, качество этих испытаний Хупс и Хьюз [1] сочли хорошим. Разница же в прочности, которая очевидна из рисунка 8, может быть связана с локальным предварительным горизонтальным нагружением (то есть с эффектом «бульдозера») во время наступания ледника.

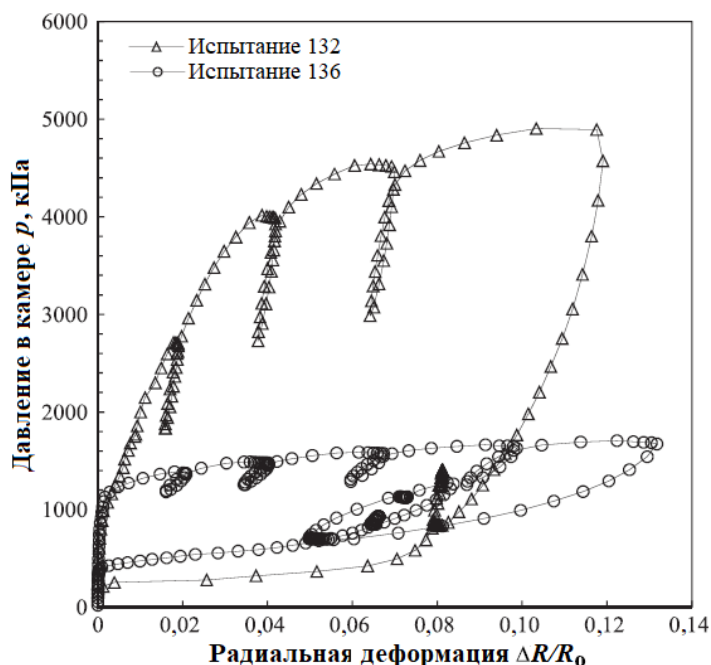


Рис. 8. Необработанные кривые по данным измерений при прессиометрических испытаниях 132 и 136 в скважинах ТБ-320 и ТБ-321 соответственно (по [1])

Новый метод: поиски равновесного давления путем тестов на ползучесть, выполняемых при прессиометрическом испытании на стадии разгрузки

Тесты на ползучесть, выполняемые при прессиометрическом испытании на стадии разгрузки, были использованы Джоном Хьюзом еще в 1995 году и отражены в неопубликованном отчете компании Hughes Insitu Engineering «Результаты прессиометрических испытаний на площадке для строительства резервуара для хранения сжиженного природного газа в городе Ла Бреа в Тринидаде». Тогда выполнялись исследования в грунте нефтегазонасной сланцевой формации. При расширении камеры прессиометра этот грунт вел себя как относительно высокопрочный материал связного типа. При разгрузке же давление в камере поддерживалось постоянным и было ниже ожидаемого вертикального напряжения. Когда давление в камере оставалось неизменным, радиус мембраны уменьшался. Это сужение было неожиданно большим – порядка 3–4% в течение

примерно 3 минут. Затем давление поднимали выше оцененного вертикального напряжения, и радиус камеры начинал увеличиваться. Следовательно, существовала возможность нахождения равновесного давления, при котором мембрана бы не двигалась. Но, учитывая нехватку времени, на площадке в Тринидаде это не было сделано.

При изысканиях для рассматриваемого в статье [1] проекта тоннеля предварительная стадия испытания прессиометром в отложениях Qpg1 показала более высокие, чем ожидалось, горизонтальные напряжения. После этого при последних 10 прессиометрических испытаниях в этих грунтах в целях сравнения использовался новый подход на основе вышеуказанной методики, предложенной Хьюзом. Он заключался в оценке горизонтальных напряжений в грунте *in situ* путем поиска равновесного давления с помощью ряда тестов на ползучесть, выполняемых во время разгрузки при определенных давлениях, поддерживаемых в измерительной камере определенное время (Хупс и Хьюз [1] называют этот подход по-английски *balance pressure creep testing*, или ВРС).

Такие тесты выполнялись при прессиометрических испытаниях на стадии разгрузки в скважинах ТБ-318, ТБ-320 и ТБ-321, пробуренных в отложениях Qpg1 (см. рис. 1 в первой части обзора). Процедура состояла в поддержании постоянного давления в камере в некоторой точке кривой разгрузки (в течение 2 минут) и в наблюдении за тем, куда смещается мембрана – внутрь или наружу. Предполагалось, что направление ее смещения указывает на то, выше или ниже это поддерживаемое давление, чем горизонтальное давление грунта *in situ*. Количество таких опробованных давлений (тестов на ползучесть) для каждого испытания приведено в таблице 3, представленной в первой части обзора.

На рисунке 9 показаны результаты пяти тестов при разных давлениях в камере на стадии разгрузки во время испытания SR-99-137. Видно, что давление величиной 916 кПа (№ 5) почти не привело к смещению мембраны, поэтому оно было принято авторами статьи [1] за равновесное для отложений Qpg1 на глубине проведения данного испытания.

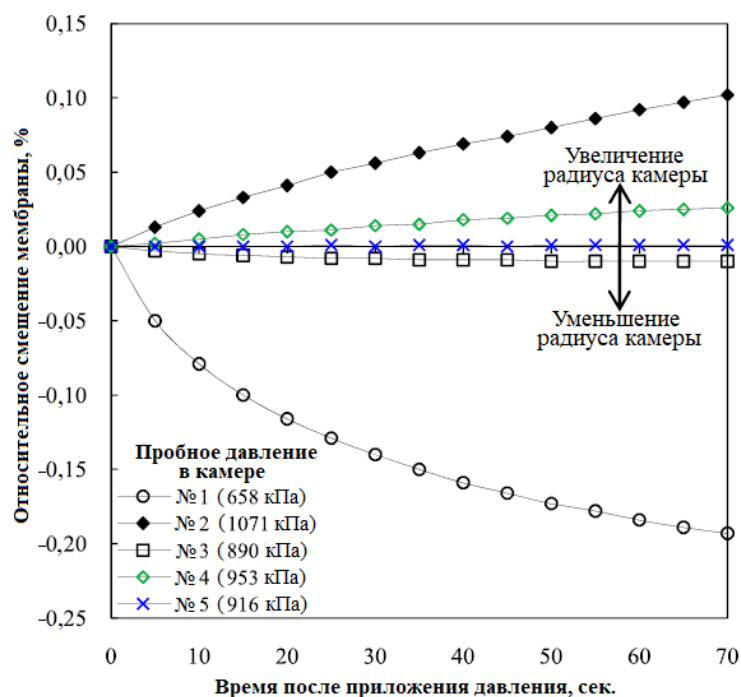
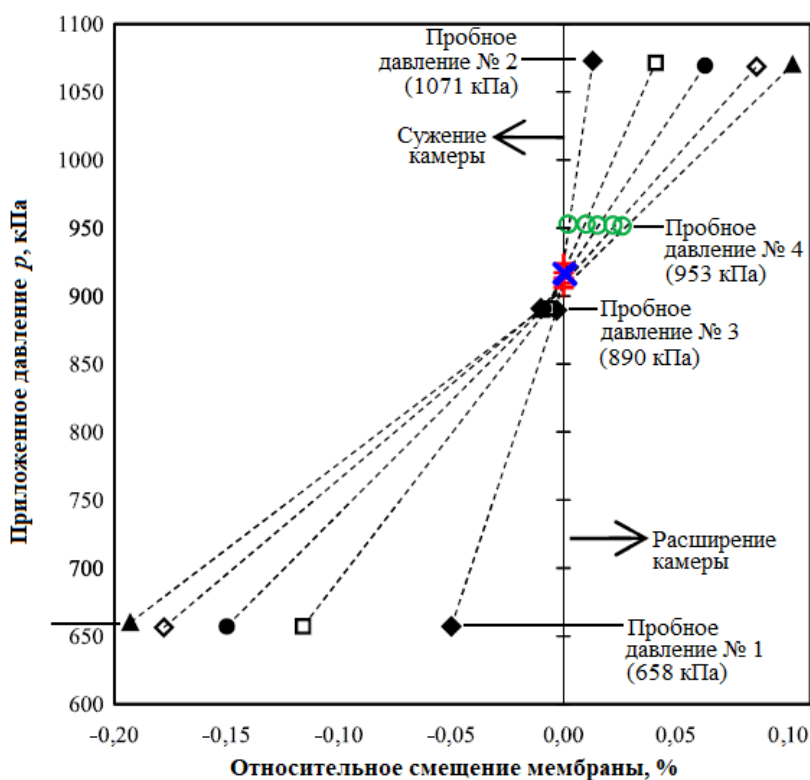


Рис. 9. Зависимости относительного смещения мембраны от времени, прошедшего после установления в камере пробного давления на стадии разгрузки, для прессиометрического испытания SR-99-137 (по [1])

Авторы работы [1] поняли, что относительная деформация ползучести (радиальная деформация) во время таких тестов пропорциональна разнице между равновесным давлением и давлением, поддерживаемым в камере. Чтобы использовать эту концепцию, были построены графики зависимости деформаций ползучести при различных временах поддержания пробных давлений от этих давлений (рис. 10). Точка равновесного давления оценивалась путем интерполяции величины давления, при которой указанные графики пересекают вертикальную линию, соответствующую нулевому смещению мембраны. Эти графики были приблизительно линейными, но имели разные наклоны по разные стороны от вертикальной линии нулевой деформации ползучести. Для проверки правильности этой методики Хупс и Хьюз [1] построили интерполяционные графики с использованием первых трех из пяти тестов на ползучесть (во время прессиометрического испытания SR-99-137) и нанесли на график вместе с данными для последних двух тестов (рис. 10). В результате интерполяционные графики и точки четвертого и пятого пробных давлений в камере отлично совпали (см. рис. 10).



Время после приложения давления, сек.
 ---◆--- 5
 ---□--- 20
 ---●--- 35
 ---◇--- 55
 ---▲--- 70

+ Точка равновесного давления на основе линейной интерпретации
 ○ Пробное давление № 4 (953 кПа)
 × Пробное давление № 5 (916 кПа)

Рис. 10. Зависимости между поддерживаемым в камере пробным давлением и относительным радиальным смещением мембраны для разного времени, прошедшего после начала поддержания этого давления, для испытания SR-99-137 (по [1])

На рисунке 11 показаны полученные Хупсом и Хьюзом [1] зависимости относительного смещения мембраны от времени, прошедшего после начала поддержания пробного давления для испытания SR-99-132. На рисунке 12 представлены зависимости

между поддерживаемым пробным давлением и относительным смещением мембраны для разного времени, прошедшего после начала поддержания этого давления, для того же испытания. Испытание SR-99-132 дало более высокое предельное давление, более низкую деформацию ползучести и гораздо большее начальное нарушение грунта во время стадии расширения, чем рассмотренное выше испытание SR-99-137, но все же показало четко определяемую точку равновесного давления при использовании рассматриваемого метода.

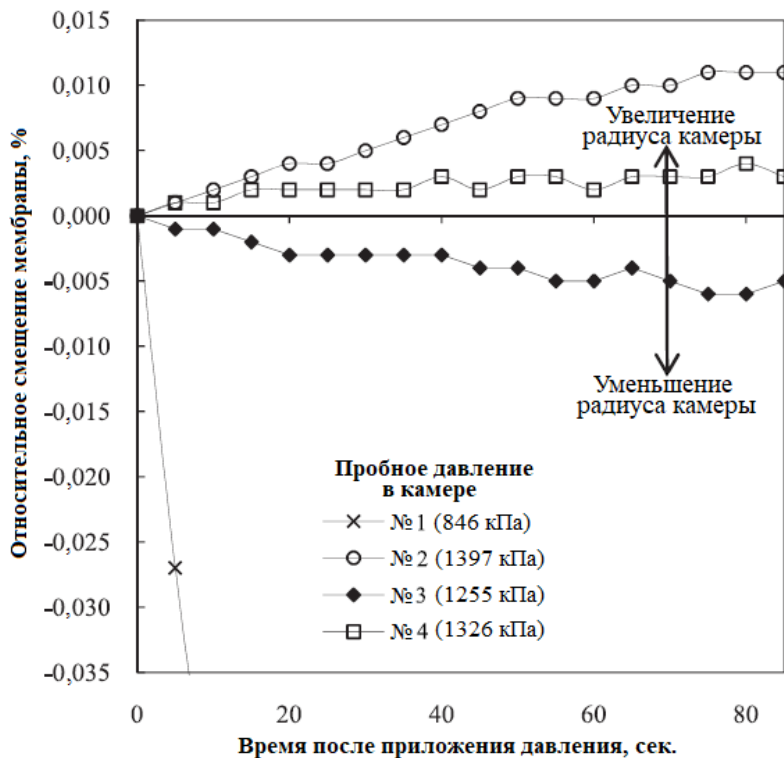


Рис. 11. Зависимости относительного смещения мембраны от времени, прошедшего после начала поддержания пробного давления на стадии разгрузки, для испытания SR-99-132 (по [1])

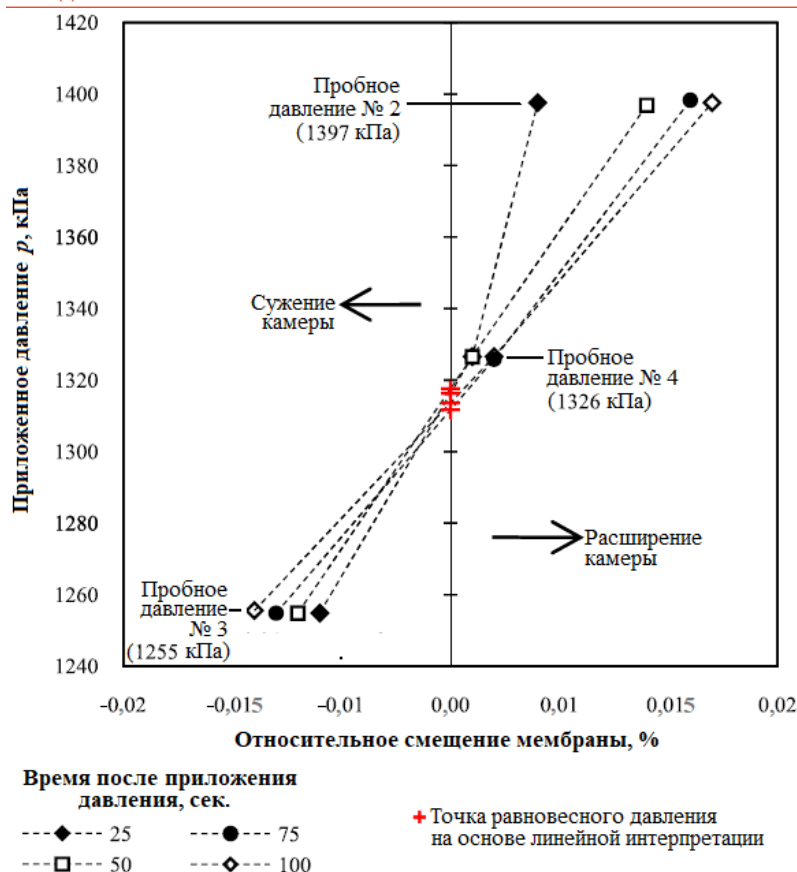


Рис. 12. Зависимости между поддерживаемым в камере пробным давлением и относительным радиальным смещением мембраны для разного времени, прошедшего после начала поддержания этого давления, для испытания SR-99-132 (по [1])

В следующей части обзора, которая будет опубликована в ближайшее время, речь пойдет о сопоставлении результатов полевых прессиометрических испытаний и лабораторных исследований на основе применения зависимости между коэффициентом горизонтального давления грунта в состоянии покоя K_0 и коэффициентом переуплотнения OCR и зависимости между K_0 и числом пластичности PI .

Список литературы, использованной авторами рассматриваемой работы [1].

можно посмотреть в конце оригинальной статьи по адресу: tarjomefa.com/wp-content/uploads/2017/10/7940-English-TarjomeFa.pdf.

Источник

1. Hoopes O., Hughes J. In situ lateral stress measurement in glaciolacustrine Seattle clay using the pressuremeter // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. ASCE, 2014. V. 140. P. 04013054-1 – 04013054-11. URL: tarjomefa.com/wp-content/uploads/2017/10/7940-English-TarjomeFa.pdf.