

О проблемах, связанных с классами точности статического зондирования (СРТ)



Предлагаем вниманию читателей обзор материалов доклада «Проблемы, связанные с классами точности статического зондирования» [3], который сделали представители голландской компании Fugro Й. Пойхен и Н. Параси на 17-й Европейской конференции по механике грунтов и геотехнике, которая проходила в Исландии в 2019 году. Следует отметить, что по состоянию на 2019 год только компания Fugro имела аккредитованную калибровочную лабораторию, предназначенную в том числе для калибровки конусных пенетрометров для статического зондирования грунтов.

АНАЛИТИЧЕСКАЯ СЛУЖБА «ГЕОИНФО»

info@geoinfo.ru

Введение

Статическое зондирование (испытания грунта на внедрение конусного зонда, или пенетрометра, – Cone Penetration Testing, СРТ) дает ценную информацию для безопасного и экономичного проектирования многих зданий и сооружений. Это наиболее популярный метод полевых испытаний грунтов при инженерно-геологических изысканиях на суше и в акваториях, особенно на первом их этапе. Он обладает такими преимуществами, как: низкая стоимость в расчете на одну точку измерений, быстрота исследований с получением большого объема информации, возможность непрерывного исследования грунтового разреза по глубине, получение результатов почти в реальном времени,

надежность данных для большинства типов дисперсных грунтов и некоторых слабых скальных пород [1, 3].

В данной статье представлен обзор материалов доклада «Проблемы, связанные с классами точности статического зондирования» [3], который сделали представители голландской компании Fugro Й. Пойхен и Н. Параси на 17-й Европейской конференции по механике грунтов и геотехнике, которая проходила в Рейкьявике (Исландия) в 2019 году.

Авторы доклада [3] напоминают, что первичный набор данных, получаемых с помощью СРТ, состоит из значений лобового сопротивления грунта внедрению конуса q_c , трения по боковой поверхности конуса f_s и порового давления u в зависимости от глубины. Каждое из этих значений характеризуется некой неотрицательной неопределенностью измерений, отражающей разброс величин измеряемого параметра. Международный стандарт по метрологической терминологии JCGM 200:2012 определяет понятие «точность измерения» как степень соответствия между измеренным и истинным значениями параметра, отмечая, что его нельзя представить в виде численной количественной величины.

При этом Пойхен и Параси [3] отмечают, что для точек измерений методом СРТ возможны оценки неопределенности (uncertainty estimates) (рис. 1, 2), но они не выполняются на практике в настоящее время (по состоянию на 2019 год). Вместо этого статическое зондирование с 1996 года обычно выполняется с учетом классов точности (accuracy classes) в соответствии со стандартами и рекомендациями. В 2012 году в международный стандарт ISO 22476-1:2012 был включен термин «классы применения» (application classes), объединивший классы точности и виды применения результатов СРТ. Чуть позже этот же термин был включен в ISO 19901-8:2014. В настоящее время эти два стандарта используются очень широко.

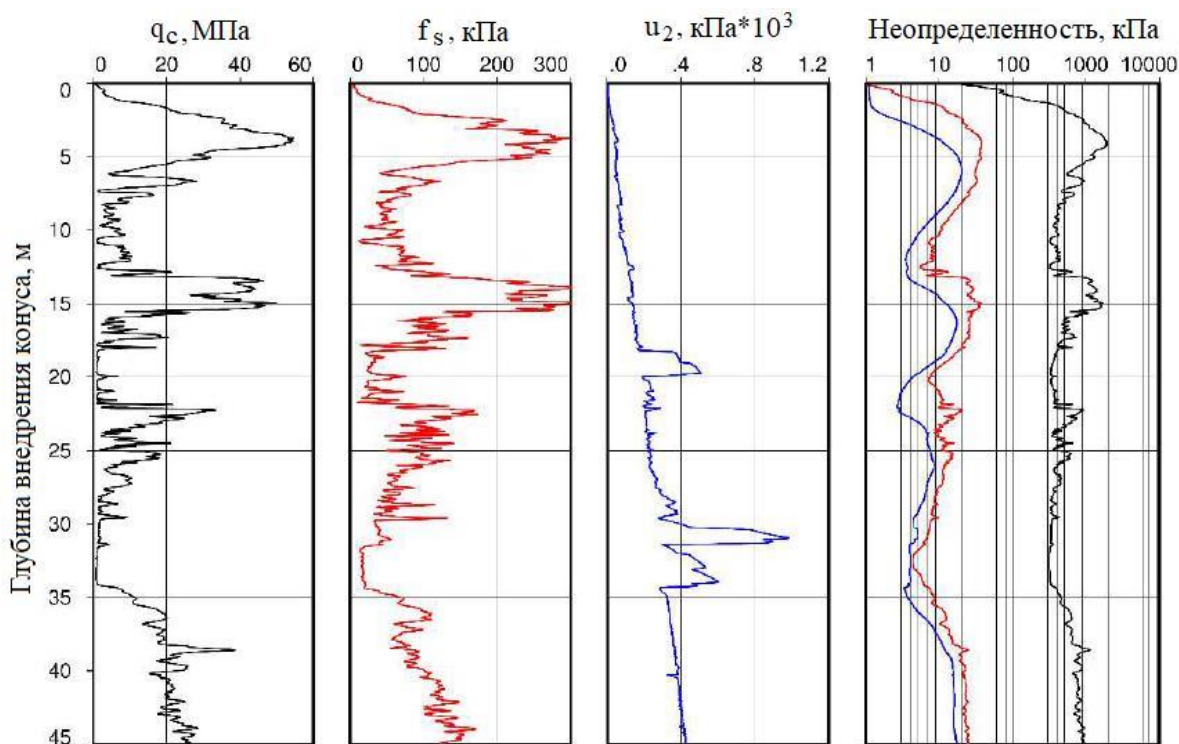


Рис. 1. Профили СРТ для сложных условий сильнослоистых песков и глин, включая значения расширенной неопределенности [3]

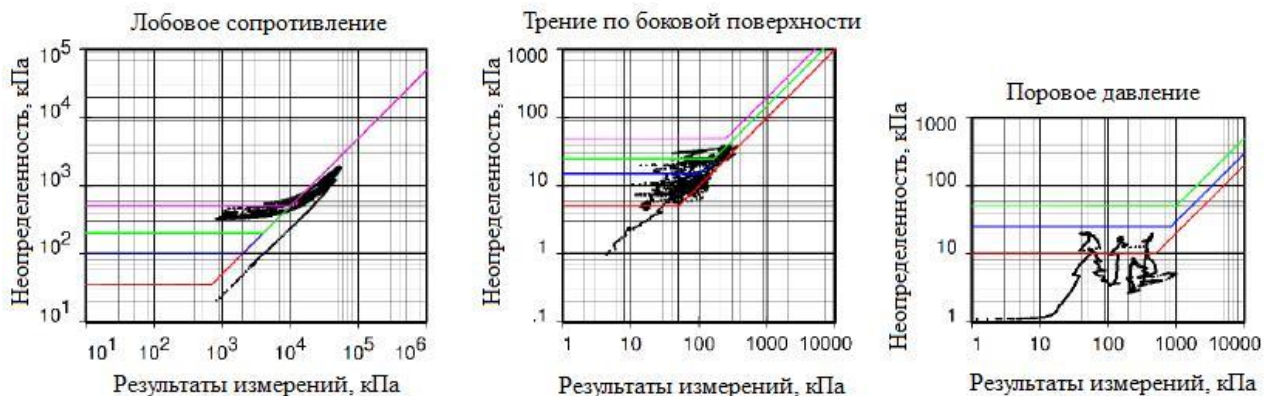


Рис. 2. Расширенная неопределенность с рис. 1, построенная в виде графиков относительно предельных значений по ISO 22476-1:2012. Классы применения: 1 – красный цвет; 2 – синий; 3 – зеленый; 4 – фиолетовый [3]]

В таблице 2 стандарта ISO 22476-1:2012 приведены 4 класса применения со значениями q_c , f_s , u , наклона и длины проникновения конуса. Допустимая минимальная точность (ассигасу) выражается как большее из пороговых табличных значений (например, 35, 100, 200 или 500 кПа для q_c), а табличные значения рассчитываются как процент от измеренных (например, 5% для q_c). Величины q_c , f_s , u по классам применения в соответствии с ISO графически представлены на рисунке 2.

Различия в интерпретации соответствия точности табличным значениям ISO по классам применения стали очевидны после публикации ISO 22476-1:2012 и затем ISO 19901-8:2014. К сожалению, проблемы интерпретации явно обнаружили себя из-за споров по контрактам и ненужных переделок – в итоге результатам СРТ стали доверять больше, чем следовало бы в действительности. А ведь текущая ситуация (на 2019 г.) такова, что соответствие определенному классу применения мало указывает на точность результатов СРТ.

В следующих разделах представлены комментарии авторов доклада [3] по поводу трудностей интерпретации. Различные интерпретации классов применения по ISO 22476-1:2012 могут быть связаны с такими вещами, как:

- класс применения;
- требования к анализу точности;
- правила принятия решений для табличных значений параметров по ISO и дрейфа нуля.

Определение класса применения

Пойхен и Параси [3] подчеркивают, что в международных стандартах ISO 22476-1:2012 и ISO 10012:2013 нет явного определения класса применения. Вместо этого в пункте 5.2 первого из них используется ряд пояснений, например:

- «Для заданных профилей грунта и использования результатов СРТ класс применения определяет необходимую минимальную точность и максимальную длину между измерениями с соответствующей степенью неопределенности.

Результаты СРТ используются с точек зрения профилирования, идентификации материалов и определения параметров грунта»;

- «Класс применения 2 предназначен для точной оценки профилей из слоистых массивов грунтов».

Авторы доклада [3] делают вывод, что стандарт ISO 22476-1:2012 объединяет конкретные виды использования результатов СРТ с концепцией классов точности, которая хорошо определена в метрологии: «Класс точности – это класс средств измерений или измерительных систем, которые соответствуют установленным метрологическим требованиям, что необходимо для того, чтобы ошибки измерений или инструментальных неопределенностей измерений не выходили за установленные пределы при определенных рабочих условиях» (JCGM 200:2012).

Табличные значения для классов применения по ISO можно интерпретировать как: 1) применяемые к выбранным измерительным системам СРТ, способным удовлетворять конкретным метрологическим требованиям (что заключается в сравнении величин, используемых для калибровки конусного пенетromетра, с табличными значениями по ISO, исключая все другие неопределенности измерений, – на практике это привело к неофициальным терминам типа «конус класса 1» или «конусный пенетromетр класса 2»); 2) применяемые к зарегистрированным результатам измерений для любых условий *in situ*.

Требования к анализу точности

Пункт 5.2 стандарта ISO 22476-1:2012 включает следующий текст: «Если добавлены все возможные источники ошибок, точность зарегистрированных результатов измерений должна быть лучше, чем наибольшее из значений, приведенных в таблице 2 стандарта ISO 22476-1:2012. Анализ точности должен включать внутреннее трение, ошибки в сборе данных, эксцентрическую нагрузку, температурные (внешние и переходные) эффекты и погрешности размеров». Далее Пойхен и Параси [3] подчеркивают, термин «анализ точности» используется только в этом пункте указанного стандарта, причем со словом «должен». При этом определение этого термина в стандартах ISO 22476-1:2012, ISO 10012:2003 и JCGM (1993).

В соответствии с более поздней версией последнего из указанных документов – JCGM 200:2012 – можно интерпретировать термин «анализ точности» как синоним «анализа неопределенности», о котором идет речь в приложении E этого стандарта: «Можно представить неопределенность как результат анализа неопределенности, в котором неопределенности могут быть представлены в соответствии с WECC DOC.19-1990 и ISO 10012». Здесь авторы доклада [3] обращают внимание читателей на то, что указанное приложение рассматривает выполнение анализа неопределенности как возможное, а не как обязательное.

Подход к анализу неопределенности, предложенный в приложении E стандарта JCGM 200:2012, соответствует обычным метрологическим принципам. Его можно применять и для СРТ, используя вычисления с помощью электронных таблиц (что один из авторов доклада [3] и его коллега продемонстрировали ранее (Peuchen, Terwindt, 2014). Результатом такого анализа является неопределенность для каждой точки измерения методом СРТ. При этом Пойхен и Параси [3] сожалеют о том, что, насколько им известно, адекватный анализ неопределенности (или анализ точности) результатов СРТ в настоящее время (на 2019 г.) на практике не выполняется.

Выбор подходящих входных величин для анализа неопределенности, вероятно, представляет значительные трудности для многих операторов СРТ. Одним из наиболее важных входных значений является неопределенность калибровки для лобового сопротивления внедрению конуса, которая включает в себя неопределенность эталонного средства измерений, далее – эталона. Эталонном обычно является эталонный тензодатчик с метрологической прослеживаемостью до национального стандарта измерений. Его технические характеристики обычно приблизительно эквивалентны характеристикам тензодатчика для измерения лобового сопротивления внедрению конуса. При этом Пойхен и Параси [3] отмечают, что неопределенность такого эталона игнорируется некоторыми авторами, которые ссылаются на американский стандарт ASTM D5778-12, хотя такое упрощение может оказаться недостаточным для анализа неопределенности в соответствии с приложением Е к документу ISO 22476-1:2012, что будет показано далее.

Правило принятия решений для табличных значений для классов применения по ISO

Правило принятия решений для табличных значений для классов применения по ISO, как указывают авторы доклада [3], относится к следующему утверждению пункта 5.2: «Если добавлены все возможные источники ошибок, точность зарегистрированных результатов измерений должна быть лучше, чем наибольшее из значений, приведенных в таблице 2».

Очевидно, что соблюсти этот пункт будет легче, если критерии точности СРТ применяются для всего конкретного испытания на основе результатов для отдельных точек измерений. На практике критерии точности СРТ для испытания обычно означают, что процентные значения в таблице 2 стандарта ISO 22476-1:2012 будут применяться к q_c и f_s . Например, если взять класс применения 2 и максимальное зарегистрированное при испытании значение лобового сопротивления $q_{c,max} = 7,8$ МПа, то минимальная точность, которая должна быть достигнута для любой точки измерений, составит 390 кПа (5% от 7,8 МПа).

Правило принятия решений для дрейфа нуля

Правило принятия решений для дрейфа нуля, как указывают авторы доклада [3], относится к пункту 5.10 стандарта ISO 22476-1:2012: «Если дрейф нуля измеренных параметров больше допустимой минимальной точности согласно требуемому классу применения по таблице 2, то результатами следует пренебречь или же можно отнести испытание к более низкому классу применения».

На практике используются два типа интерпретации значений допустимого дрейфа нуля:

- 1) значения, рассчитанные как функция максимального измеренного при испытании значения параметра;
- 2) соответствующие фиксированные значения для классов применения из таблицы 2 стандарта ISO 22476-1:2012.

Для приведенного ранее примера с классом применения 2 и $q_{c,max} = 7,8$ МПа это даст допустимые значения дрейфа нуля до 390 и 100 кПа для первого и второго вышеуказанных методов интерпретации соответственно.

Практика показывает, что на дрейф нуля влияет диапазон измеряемых значений во время испытания, что один из авторов доклада [3] со своим коллегой обосновали в более ранней работе (Peuchen, Terwindt, 2014).

Правило принятия решений, основанное на фиксированных значениях из таблицы 2 стандарта ISO 22476-1:2012, было бы трудно обосновать, если бы не сопротивление под конусом класса применения 1, которое можно интерпретировать как ограниченное до $q_c < 3$ МПа.

На практике некоторые используют дрейф нуля как доказательство соответствия определенному классу применения. Это, возможно, предполагает, что дрейф нуля может представлять собой результат «анализа точности», упомянутого в пункте 5.2 стандарта ISO 22476-1:2012. Но это, как замечают Пойхен и Параси [3], противоречит общепринятому метрологическому пониманию, согласно которому дрейф нуля является одним из многих факторов, способствующих неопределенности. Например, значения дрейфа нуля для двух комплексных профилей на рисунке 3 будут примерно одинаковыми, то есть не будут отражать различия в достигнутых уровнях неопределенности для отдельных точек измерений в зависимости от глубины внедрения конуса. Это можно сравнить с анализом неопределенности, который обычно показывает великолепные значения неопределенности для профиля q_c , изображенного на рисунке 3 справа. Неопределенность значений q_c для профиля, представленного на рисунке 3 слева, будет определяться эффектами гистерезиса. Обратите внимание, что для величин q_c на рисунке 1 на глубине около 33 м также будут преобладать эффекты гистерезиса, оцененные как $0,05q_{c,max}$ в примере расчета, который привели один из авторов доклада [3] со своим коллегой в более ранней работе (Peuchen, Terwindt, 2014) (здесь $q_{c,max}$ – это максимальная встреченная величина гистерезиса q_c до достижения глубины внедрения конуса).

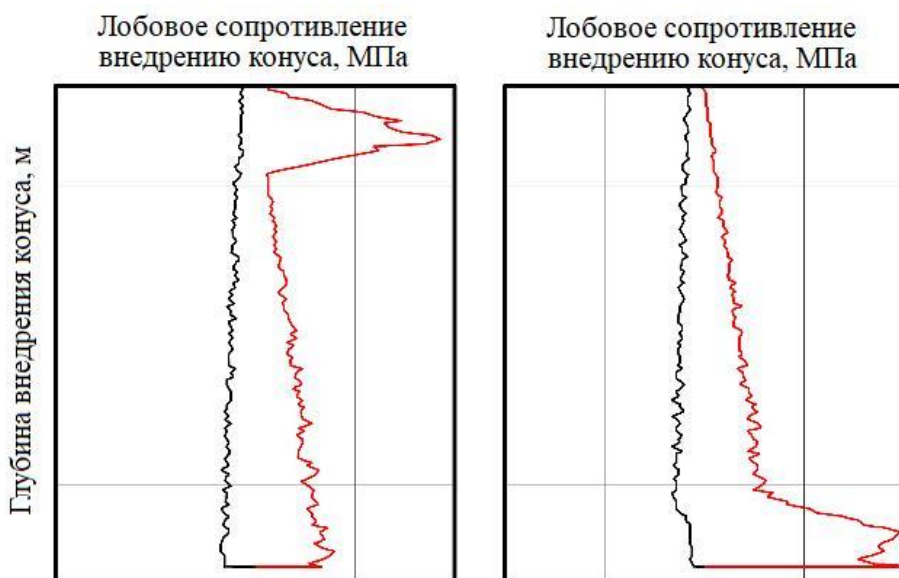


Рис. 3. Ограничения критерия дрейфа нуля. Красные кривые отражают внедрение (пенетрацию) конуса, а черные кривые – его перемещение в обратном направлении (ретракцию)

Пример неопределенности калибровки

Отрасль испытаний СРТ в настоящее время (на 2019 г.) в целом не имеет аккредитации для калибровки конусных пенетрометров. Насколько известно авторам доклада [3], только компания Fugro имеет соответствующую аккредитованную калибровочную лабораторию.

В таблице представлен подробный пример анализа неопределенности в соответствии с процедурами, одобренными национальным органом по аккредитации Нидерландов. Он приведен для одной точки измерений на калибровочной кривой лобового сопротивления внедрению конуса ($q_c = 8$ МПа), например для 2, 5, 10, 25, 50, 75 и 100% требуемого интервала измерений. Этот пример иллюстрирует использование европейского стандарта по оценке неопределенности измерений при калибровке EA-04/02 M:2013 и подчеркивает важность учета неопределенности измерений эталонным устройством, которая вносит основной вклад в величину расширенной неопределенности проверяемого устройства (DUT), что типично для калибровки конусных пенетрометров. Считается, что можно добиться значительного уменьшения неопределенности калибровки, если снизить неопределенность измерений эталонным устройством.

Таблица. Пример расширенной неопределенности, рассчитанной для сопротивления под конусом 8 МПа

Количественная величина X_i		Оценка X_i , МПа	Стандартная неопределенность $u(x_i)$, кПа	Распределение вероятностей; коэффициент охвата k	Коэффициент чувствительности c_i	Вклад в неопределенность $u_i(y) = c_i \cdot (u(x_i)/k)$, кПа
Измеренная количественная величина	$M_{reference}$ (эталона)	8.000	39.0	2.0	1	19.5
	$\delta M_{measurement}$ (измерения)	0.000	1.3	$\sqrt{3}$	1	0.8
Погрешности (ошибки)	$\delta M_{repeatability}$ (повторяемости)	0.000	1.0	$\sqrt{3}$	1	0.6
	$\delta M_{reversibility}$ (обратимости)	0.000	-1.7	$\sqrt{3}$	1	-1.0
	$\delta M_{resolution}$ (разрешения)	0.000	0.0372	$2\sqrt{3}$	1	0.0107
	$\delta M_{zero-drift}$ (дрейфа нуля)	0.000	0.0040	$\sqrt{3}$	1	0.0023
	δM_{noise} (шум)	0.000	0.0001	1.00	1	0.0001
Измеренная количественная величина	M_{DUT} (проверяемого устройства)	8.00 ± 0.04 МПа				Суммарная неопределенность: 19.7 кПа Степени свободы: 50 Коэффициент охвата: 2.050 Расширенная неопределенность: 40.4 кПа

Пойхен и Параси [3] обращают внимание читателей на то, что стандарты ISO 22476-1:2012 и ISO 10012:2003 ссылаются на версию 2005 года стандарта ISO/IEC 17025:2017 по общим требованиям к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий. Последний требует, чтобы калибровочный (поверочный) сертификат включал неопределенность измерения эталонным устройством. Неопределенность измерений при калибровке можно выразить в соответствии с европейским стандартом EA-04/02 M:2013, необходимым для аккредитации. Этот документ предназначен для калибровок, для которых более общим стандартом для выражения неопределенности измерений является JCGM 200:2012.

Расчет неопределенности измерения, связанной с измеренной количественной величиной Y , осуществляется согласно формуле:

$$Y = f(X_1, \dots, X_n), \quad (1)$$

где X_1, \dots, X_n – входные количественные величины.

Функция измерения при калибровке конусного пенетрометра может быть представлена в виде следующей формулы:

$$M_{DUT} = M_{reference} + \delta M_{measurement} + \delta M_{repeatability} + \delta M_{reversibility} + \delta M_{resolution} + \delta M_{zero-drift} + \delta M_{noise} \quad (2)$$

(проверяемого устройства) (эталоны) (измерения) (повторяемости) (обратимости) (разрешения) (дрейфа нуля) (шума)

Пойхен и Параси [3] расшифровывают обозначения в этой формуле (и, соответственно, в таблице) следующим образом.

M_{DUT} – это количественная величина, измеренная проверяемым устройством (в рассматриваемом примере – пьезодатчиком конусного пенетрометра).

$M_{reference}$ – количественная величина, измеренная эталонным устройством (она также имеет неопределенность измерения, которая включается в расчет неопределенности измерения проверяемого устройства – см. таблицу).

$\delta M_{measurement}$ – погрешность (ошибка) измерения, которая определяется как разница между количественными величинами, измеренными проверяемым и эталонным устройствами.

$\delta M_{repeatability}$ – погрешность повторяемости, которая для менее чем 10 повторных измерений определяется как разница между максимальной и минимальной количественными величинами, измеренными проверяемым устройством при использовании одного и того же эталонного значения.

$\delta M_{reversibility}$ – погрешность обратимости (или гистерезис), определяемая как разница между количественными величинами, измеренными проверяемым устройством, для случаев увеличения и уменьшения нагрузки (при постоянном эталонном значении). Для сравнения конкретных увеличения и уменьшения измеряемой величины для эталонного устройства с постоянным эталонным значением может использоваться интерполяция. Допускается экстраполяция самого низкого значения. При максимальной нагрузке $\delta M_{reversibility}$ всегда равна нулю. При нулевой нагрузке $\delta M_{reversibility}$ – это ошибка дрейфа нуля.

$\delta M_{resolution}$ – погрешность разрешения, то есть наименьшее изменение измеряемой количественной величины, которое может быть получено при использовании проверяемого устройства.

$\delta M_{zero-drift}$ – погрешность дрейфа нуля, которая представляет собой разницу между показаниями проверяемого устройства при нулевой «нагрузке» до и после применения ненулевого измерения «нагрузки».

δM_{noise} – погрешность шума, то есть среднеквадратичное значение для измерений проверяемым устройством при отсутствии нагрузки.

Далее авторы доклада [3] приводят следующие правила и возможности работы при калибровке.

Регулировка (выставление) нуля для конусного пенетрометра должна выполняться до регистрации данных для расчетов неопределенности измерений. Значение смещения приложенной нулевой нагрузки должно быть указано в сертификате калибровки.

Кроме того, измерения следует повторить не менее 3 раз (выполнить три цикла), чтобы можно было вычислить ошибки повторяемости и обратимости. Для вычисления, например, разницы между сопротивлением под конусом и эталонным значением можно использовать среднее из трех измерений.

При определении неопределенности измерений конусным пенетрометром могут быть также учтены погрешность работы оператора и температурная погрешность, вызванная колебаниями температуры. Ошибку оператора можно считать незначительной, если весь процесс измерений автоматизирован. Температурной погрешностью можно пренебречь, если калибровка выполняется в лаборатории с контролируемой температурой.

Вместо заключения. Предлагаемые действия на будущее

Итак, классы точности (accuracy classes) для статического зондирования (СРТ) начали применяться в 1996 году, а с 2012 года их использование в отрасли быстро увеличилось, поскольку такая система классификации была включена в международный стандарт ISO 22476-1:2012 (российский аналог – ГОСТ Р ИСО 22476-1-2017. – *Ред.*). В этом стандарте был принят термин «классы применения» (application classes), объединяющий классы точности с типами применения для использования результатов СРТ. Однако с течением времени становились все очевиднее проблемы, связанные с интерпретацией этих терминов.

Изученные авторами доклада [3] отзывы специалистов, работающих в области статического зондирования, указывают на фундаментальные трудности с использованием классов применения по ISO 22476-1:2012. Их удовлетворительное преодоление может оказаться невозможным – и тогда от этой концепции, возможно, придется отказаться при подготовке следующей редакции ISO 22476-1:2012. При таком повороте событий Пойхен и Параси [3] предлагают на замену два подхода, которые позволили бы создать новую систему ранжирования/классов:

- 1) четче определить нормативные требования к методу;
- 2) четче определить требования к рабочим характеристикам с учетом неопределенности точек измерений.

Предложенные подходы не обязательно являются исключительными. Может быть рассмотрен и вопрос, позволяющий пользователю стандарта выбрать один из них.

Первый подход подразумевает попытку классифицировать эквивалентные и конкурирующие системы с помощью подробных описаний конкретных устройств и пошаговых методик работы с ними.

Второй подход, которому следует отдать предпочтение при использовании метода СРТ, соответствует приложению Е стандарта ISO 22476-1:2012. Однако это приложение просто является информативным, то есть содержит рекомендации типа «следует...» и «можно...». В будущую редакцию ISO 22476-1:2012 может быть включен нормативный текст, то есть указания типа «требуется». Авторы доклада [3] предлагают, чтобы система ранжирования учитывала ряд эталонных профилей СРТ, каждый из которых имеет критерии неопределенности, например основанные на кумулятивных функциях плотности (CDF). Системы СРТ могут быть протестированы на соответствие эталонным СРТ и соответствующим критериям CDF.

Для обеспечения единообразия работы отрасли статического зондирования авторы доклада [3] предлагают предоставить открытый доступ к руководствам типа справочников, на которые можно ссылаться в стандартах по СРТ. Для обеспечения надлежащей практики,

специфичной для СРТ, следует разработать такое руководство в соответствии со стандартами ISO 10012:2003 и ISO/IEC 17025:2017. Оно может охватывать оба вышеуказанных подхода. Тем более что второй из них обычно получает свои входные значения на основе нормативных процедур первого подхода.

Источники

1. Шокальский М.Ю. Методы статического зондирования грунтов СPTU, SCPT и RCPT: практика применения, анализа и обработки их результатов // Geoinfo.ru. 06.06.2015. URL: geoinfo.ru/product/shokalskij-maksim-yulevich/metody-staticeskogo-zondirovaniya-gruntov-cptu-cstp-i-rcpt-praktika-primeneniya-analiza-i-obrabotki-ih-rezultatov-34606.shtml.
2. Fugro. Оборудование // Fugro.ru. Дата последнего обращения: 27.08.2010. URL: fugro.ru/ru/.
3. Peuchen J., Parasie N. Challenges for CPT accuracy classes // Proceedings of the 17-th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ECSMGE-2019), Reykjavik, Iceland, 2019. URL: media.fugro.com/media/docs/default-source/published-articles/peuchen_and_parasie_2019.pdf?sfvrsn=8705f919_2.

Список литературы, использованной авторами доклада [3]

- ASTM International, 2012. *ASTM D5778-12 Standard Test Method for Electronic Friction Cone and Piezocone Penetration Testing of Soils*. West Conshohocken: ASTM International.
- Deltares 2016. *Protocol sonderen voor Su-bepaling*. Report 1220083-010 to Rijkswaterstaat – Dutch ministry of public works, 33 p. (in Dutch).
- European Co-operation for Accreditation of Laboratories 2013. *Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration*. European Accreditation, [s.l.], 79 p. (Publication; EA-4/02 M:2013).
- International Organization for Standardization, 2003. *ISO 10012:2003 Measurement Management Systems - Requirements for Measurement Processes and Measuring Equipment*. Geneva: ISO.
- International Organization for Standardization, 2012. *ISO 22476-1:2012 Geotechnical Investigation and Testing – Field Testing – Part 1: Electrical Cone and Piezocone Penetration Tests*. Geneva: ISO. (With Technical Corrigendum 1, January 2013). (With amendment, 15 January 2013)
- International Organization for Standardization, 2014. *ISO 19901-8:2014 Petroleum and Natural Gas Industries - Specific Requirements for Offshore Structures – Part 8: Marine Soil Investigations*. Geneva: ISO.
- International Organization for Standardization, 2015. *ISO 2394:2015 General principles on reliability for structures*. Geneva: ISO.
- International Organization for Standardization, 2017. *ISO/IEC 17025:2017 General requirements for the competence of testing and calibration laboratories*. Geneva: ISO.
- International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. 1999. International reference test procedure for the cone penetration test (CPT) and the cone penetration test with pore pressure (CPTU): Report of the ISSMGE Technical Committee 16 on Ground Property Characterisation from In situ Testing. In F.B.J. Barends et al. (eds.), *Geotechnical engineering for transportation infrastructure; Proceedings of the twelfth European conference on soil mechanics and geotechnical engineering, Amsterdam, Netherlands, 7-10 June 1999, Vol. 3*: 2195-2222. Rotterdam: A.A. Balkema.

- JCGM Joint Committee for Guides in Metrology 2012. *International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM)*. 3rd edition, 2008 version with minor corrections, JCGM 200:2012.
- Joint Committee For Guides In Metrology (JCGM), 1993. *International vocabulary of metrology: basic and general concepts and associated terms (VIM)*. JCGM.
- Lunne, T., Santos, R. and Brink Clausen, 2017. Guidelines for Use of CPTU Application Classes According to ISO 19901-8: (2014). In: Society For Underwater Technology Offshore Site Investigation and Geotechnics Committee, ed. *Offshore Site Investigation and Geotechnics: Smarter Solutions for Future Offshore Developments: Proceedings of the 8th International Conference 12-14 September 2017, Royal Geographical Society, London, UK: Volume 2*. London: Society for Underwater Technology, pp. 300-307.
- Nederlands Normalisatie-instituut NEN. 1996. *Geotechnics. Determination of the cone resistance and the sleeve friction of soil. Electric cone penetration test*. Dutch Standard NEN 5140. Delft: Nederlands Normalisatie-instituut. (in Dutch).
- Peuchen, J. and Terwindt, J. 2014. Introduction to CPT accuracy, *Keynote in 3rd International Symposium on Cone Penetration Testing CPT'14*. May 12-14, 2014 – Las Vegas, Nevada, 45 p.
- Peuchen, J., Kaltsas, D. and Sinjorgo, G. 2018. Calibration of cone penetrometers in accredited laboratory. In Hicks, M.A., Pisant, F. and Peuchen, J. eds. *Cone Penetration Testing 2018: Proceedings of the 4th International Symposium on Cone Penetration Testing (CPT'18): Delft, The Netherlands, 21-22 June 2018*. Boca Raton: CRC Press, pp. 513-517.