

## Комплекс для испытаний грунтов при обследовании фундаментов

Болдырев Г.Г., д.т.н., проф., Меркульев Е.В., магистр, ООО «НПП-Геотек»

Кубецкий В.Л., д.т.н., проф., ГУП «НИИМострой»

Одним из видов работ при проведении инженерно-геотехнических изысканий являются полевые испытания грунтов с определением их стандартных прочностных и деформационных характеристик (штамповые, сдвиговые, прессиометрические, срезные). К стандартным прочностным характеристикам относятся угол внутреннего трения  $\varphi$ , силы удельного сцепления  $c$  и недренированная прочность  $c_u$ , а к деформационным модуль деформации  $E$  и упругий модуль деформации  $E_0$ . Кроме того, одним из видов работ по инженерным изысканиям является обследование состояния грунтов оснований зданий и сооружений, которые выполняются при реконструкции зданий или усилении фундаментов. В последнем случае также необходимо определить прочностные и деформационные характеристики грунтов, залегающие на глубине заложения фундаментов.

Общие требования к полевым испытаниям грунтов приведены в ГОСТ 30672 [5]. В табл. 1 приведена часть этих требований, касающаяся методов определения прочностных и деформационных свойств немерзлых, непросадочных грунтов.

Табл. 1. Методы определения прочностных и деформационных характеристик

Характеристика грунта	Метод определения характеристик грунта	Область применения метода
Сжимаемость и набухаемость немерзлых грунтов:  - модуль деформации	Статическое нагружение штампов в горных выработках и в массиве, нагружение с постоянной скоростью прессиометров и дилатометров в скважинах и в массиве	Крупнообломочные грунты, пески, глинистые, органоминеральные и органические грунты
Прочность немерзлых грунтов:  -угол внутреннего трения; удельное сцепление; сопротивление срезу	Срез целиков грунта консолидированный	Крупнообломочные грунты, пески и глинистые грунты с показателем текучести $I_L < 1$ (независимо от степени влажности в стабилизированном состоянии)

-угол внутреннего трения; удельное сцепление	Срез целиков грунта неконсолидированный	Водонасыщенные глинистые грунты (при степени влажности $S_r > 0,85$ с показателем текучести $I_L \geq 0,5$ в нестабилизированном состоянии)
-сопротивление срезу	Вращательный срез крыльчаткой	Глинистые, органоминеральные и органические грунты с крупнообломочными включениями размером 2-10 мм не более 15% по массе

В тоже время, в настоящее время определение прочностных и деформационных характеристик в полевых условиях рекомендуется проводить в соответствии с требованиями ГОСТ 20576-2012 [4]. В данном ГОСТ приведено два метода определения прочностных характеристик грунтов и несколько методов определения модуля деформации. В первом методе определение прочностных характеристик рекомендуется выполнять путем испытания «целика» грунта нагружения нормальной и сдвигающей нагрузками (рис. 1). Во втором, испытания проводятся путем среза грунта крыльчаткой (рис. 2). На практике очень сложно и трудоемко, причем не во всех грунтах, удастся подготовить в шурфе «целик» в виде цилиндра или

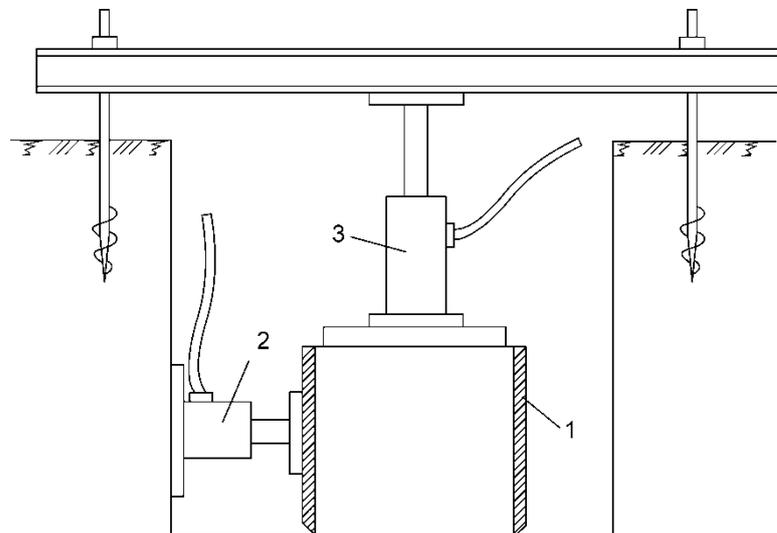


Рис. 1. Испытания блока грунта на сдвиг: 1 – стальной цилиндр; 2 – дократ горизонтальной нагрузки; 3 – дократ вертикальной нагрузки

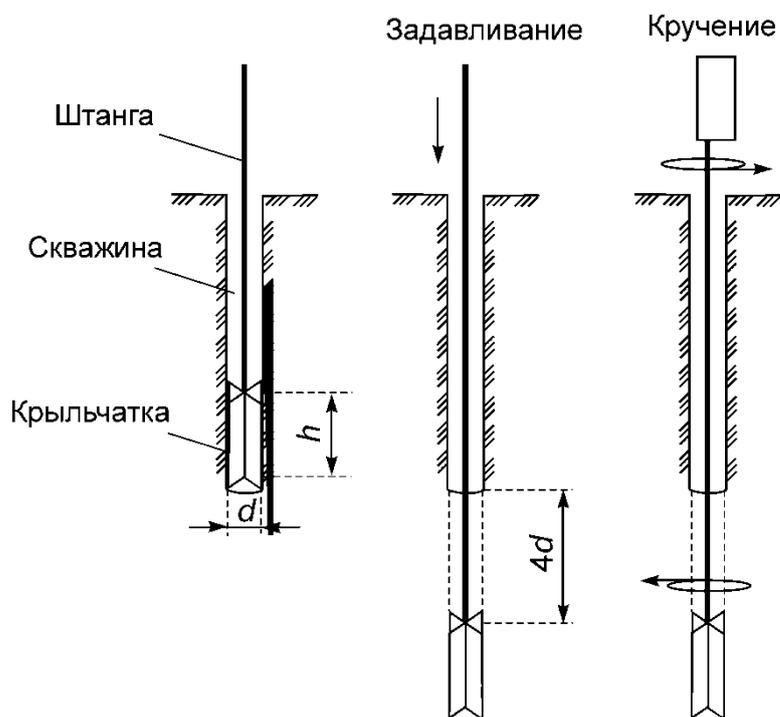


Рис. 2. Схема испытаний методом лопастного среза

призмы. Поэтому этот метод редко применяется в полевых условиях. Вторым методом значительно проще, но позволяет определить только характеристику недренированной прочности  $c_u$  в слабых, водонасыщенных глинистых грунтах, характеристики в виде угла внутреннего трения  $\phi'$  и силы удельного сцепления  $c'$  при этом не определяется.

Цель настоящей работы заключается в разработке полевого метода определения прочностных характеристик дисперсных грунтов (угол внутреннего трения и силы удельного сцепления), для чего необходимо решить следующие задачи:

- 1) выполнить анализ различных методов определения прочностных характеристик грунтов;
- 2) разработать конструкцию устройства для полевых испытаний грунтов с целью определения их прочностных характеристик;
- 3) используя новую конструкцию устройства провести лабораторные и полевые испытания грунтов;
- 4) выполнить анализ данных лабораторных и полевых испытаний и разработать рекомендации по использованию метода испытаний.

В большинстве практических случаев использование стандартного комплекса оборудования и методик инженерно-геологических изысканий (бурение инженерно-геологических скважин с использованием стандартной буровой техники, стандартное статическое зондирование и т.д.) либо затруднено, либо невозможно в связи со стесненностью условий (ограниченный доступ к основанию фундаментов, подвальные помещения и т.д.). На практике, при обследовании фундаментов, отрываются шурфы и из них отбираются монолиты для последующих лабораторных испытаний.

Как правило, это занимает много времени как на отбор качественных монолитов, так и на лабораторные испытания.

Одним из полевых методов определения прочностных свойств является метод испытаний кольцевым срезом, который отличен от рекомендуемого в ГОСТ 20276. Основное отличие заключается в том, что срез грунта выполняется при помощи штампа в виде полого кольца [1, 7].

Принципиальная схема испытаний показана на рис. 3 и рис. 4.

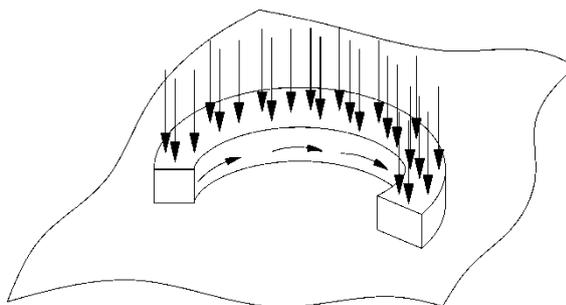


Рис. 3. Принципиальная схема испытаний методом кольцевого сдвига (ВНИИГ, 1990)

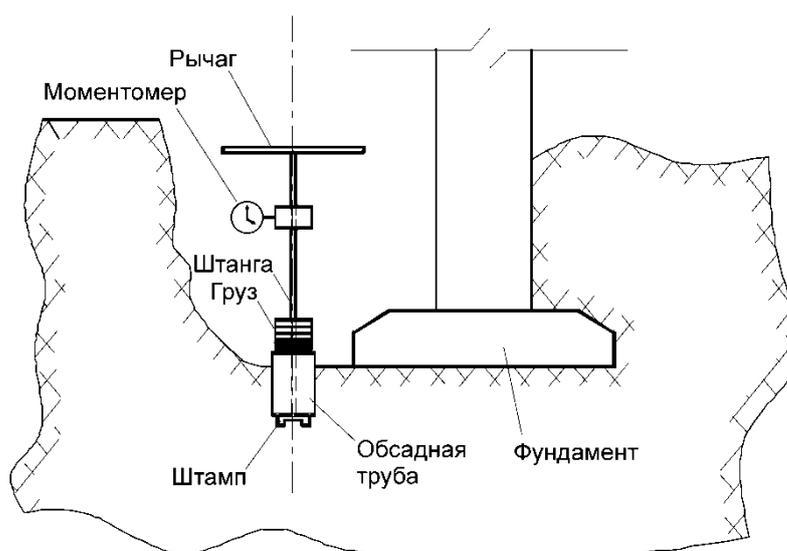


Рис. 4. Схема испытаний в шурфе: 1 – обследуемый фундамент; 2 – кольцевая нагрузка; 3 – обсадная труба; 4 – грузовая платформа; 5 – грузы; 6 – штанга; 7 – моментомер; 8 – рычаг приложения кольцевой нагрузки (Кубецкий, 1979)

Данный метод испытаний при определении характеристик грунтов имеет следующие достоинства:

– характеристики прочности и деформируемости грунтов в основании фундаментов, в шурфах или на дне котлованов определяются в условиях естественного залегания практически без нарушения их естественного состояния;

– за счет использования кольцевого среза достигается высокая точность определения параметров сопротивления сдвигу;

– возможность отказа от определения характеристик прочности и деформируемости в лабораторных условиях, что значительно снижает сроки и стоимости выполнения изысканий;

– испытания проводятся в открытых шурфах непосредственно при обследовании фундаментов и их оснований. Трудоемкость не увеличивается, так как шурфы выполняются в обязательном порядке при обследовании фундаментов;

– возможность определения плотности и влажности грунта в полевых условиях;

– полная автоматизация процесса нагружения, записи данных измерений и их обработка с хранением результатов в базе данных.

Испытания проводятся аналогично методу одноплоскостного среза (ГОСТ 1248-2010). Касательная нагрузка доводится до предельного состояния, обеспечивая срез грунта по кольцевой плоскости. Испытания проводятся при различных нормальных напряжениях, что позволяет настроить диаграмму  $\tau_{\text{ср}} = f(\sigma)$  и определить расчетные характеристики прочности условия прочности Кулона: угол внутреннего трения  $\varphi$  и удельное сцепление  $c$  грунта в условиях естественного залегания; недренированную прочность  $c_u$ . Если в опытах использовать вместо кольцевого штампа, плоский штамп, то используя метод испытаний грунтов штампом, площадью  $600 \text{ см}^2$  можно определить дополнительно модуль деформации  $E$  и упругий модуль деформации на цикле разгрузка-повторное нагружение,  $E_e$ .

Рекомендуемые характеристики оборудования для испытаний методом кольцевого среза:

– внутренний диаметр кольца 6 см, наружный диаметр кольца 10 см, соотношение  $d_b/d_n = 0,6$ . При данном соотношении  $d_b/d_n$  обеспечивается практически равномерное распределение нормальных и касательных напряжений по плоскости среза;

– при указанных выше размерах площадь кольцевой нагрузки составит  $60 \text{ см}^2$ , что аналогично размерам образцов, принятых в отечественной практике лабораторных испытаний на срез в приборах одноплоскостного среза;

– нормальное напряжение на плоскости среза обеспечивается путем укладки тарированных грузов на грузовую площадку прибора в ручном устройстве (рис. 5,6) или путем управления автоматизированной системой осевого нагружения (рис. 10). В зависимости от программы испытаний нормальное напряжение на плоскости среза может достигать 300 – 600 кПа;



Рис. 5. Установка для испытаний с ручным режимом нагружения: 1 – устройство для создания крутящего момента; 2 – грузы; 3 – лоток с песчаным грунтом; 6 – измерительная система

– касательное напряжение на плоскости среза обеспечивается путем приложения крутящего момента. Крутящий момент измеряется датчиком;

– в испытаниях в лидерной скважине глубина испытаний может быть до 3 м ниже поверхности грунта или дна котлована/шурфа.

В ООО «НПП Геотек» разработано два варианта опытной конструкции установки для комплексных полевых испытаний грунтов, в том числе и методом кольцевого среза.



а)



б)

Рис. 6. Схема установки для комплексных испытаний грунтов: а – общий вид с кольцевым штампом; б – датчики силы для измерения вертикальной нагрузки и крутящего момента: 1 – складная опорная балка; 2 – анкера; 3 – датчик вертикальной нагрузки; 4 – датчик крутящего момента; 5 – ручки; 6 – штанга; 7 – кольцевой штамп

Конструктивно первое устройство содержит два винтовых анкера, складную упорную балку, на которой закреплен винт с датчиком силы для создания осевой нагрузки (рис. 6,7). Датчик измерения крутящего момента посредством штанг соединен с кольцевым штампом (рис. 6,б). Устройство

содержит набор сменных приспособлений: кольцевой штамп с площадью среза  $60 \text{ см}^2$ , круглый штамп с площадью  $600 \text{ см}^2$ , крыльчатку и пробоотборник.

Испытания данной конструкции показали, что ручной режим нагружения и контроля вертикальной и вращательной нагрузками не обеспечивает ста-



Рис. 7. Автоматизированная установка для комплексных испытаний грунтов: а – общий вид; б – конструктивное решение; 1 – блок силового нагружения; 2 – Т-образная рама; 2 – опоры для крепления анкеров; 4 – винт; 5,6 – шаговый двигатель и датчики силы вертикальной нагрузки; 7,8 – шаговый двигатель и датчик крутящего момента; 9 – верхняя опорная плита; 10 – нижняя опорная плита; 11 – направляющие

бильность измерений и постоянство нормального давления и касательных напряжений в плоскости среза. Поэтому в дальнейшем был разработан второй вариант установки с автоматическим управлением силовым нагружением. Конструкция данной установки показана на рис. 7,8.



Рис. 8. Испытания грунта в шурфе на полигоне ООО «НПП-Геотек»: 1 – установка для комплексных испытаний грунтов; 2 – пробоотборник; 3 – кольцо пробоотборника; 4 – устройство для испытаний грунтов методом лопастного среза

Модифицированная установка включает блок силового нагружения, который представляет собой жесткую раму, состоящую из двух вертикальных направляющих штанг (11) и каретки, состоящая из верхней (9) и нижней (10) опорных пластин, соединенные четырьмя стержнями. Каретка имеет возможность вертикального поступательного перемещения под управлением верхнего (5) шагового двигателя по направляющим из двух стержней (11). На нижней опорной плите каретки закреплен шаговый двигатель (7) который используется для создания крутящего момента. Ось шагового двигателя соединена с датчиком крутящего момента (8). Вертикальная нагрузка и перемещение каретки управляются верхним шаговым двигателем и двумя датчиками силы (6). К датчику крутящего момента присоединяется резьбовым соединением составная штанга, к которой крепятся цилиндрический пробоотборник, круглый плоский штамп, круглый кольцевой штамп или крыльчатка, в зависимости от выбранного метода испытаний.

Блок силового нагружения (1) монтируется на жесткое Т-образное основание (2), которое в свою очередь устанавливается на закрученные в грунт три винтовых анкера. Все узлы крепления сделаны с помощью резьбовых соединений, что полностью устраняет люфты, имевшие место в предыдущей конструкции.

Шаговый двигатель срезающей нагрузки снабжен редуктором с коэффициентом передачи 1 к 50. Шаговые двигатели позволяют создавать нагрузку в автоматическом режиме. Вертикальное перемещение каретки составляет 300 мм.

Устройство позволяет создавать вертикальную нагрузку до 200 кгс. Второй шаговый двигатель позволяет создавать вращательную нагрузку до 40 кг\*м.

Кольцевой штамп (рис. 9) состоит из двух колец (диаметрами 114 и 74 мм) высотой 30 мм, соединенные диском.

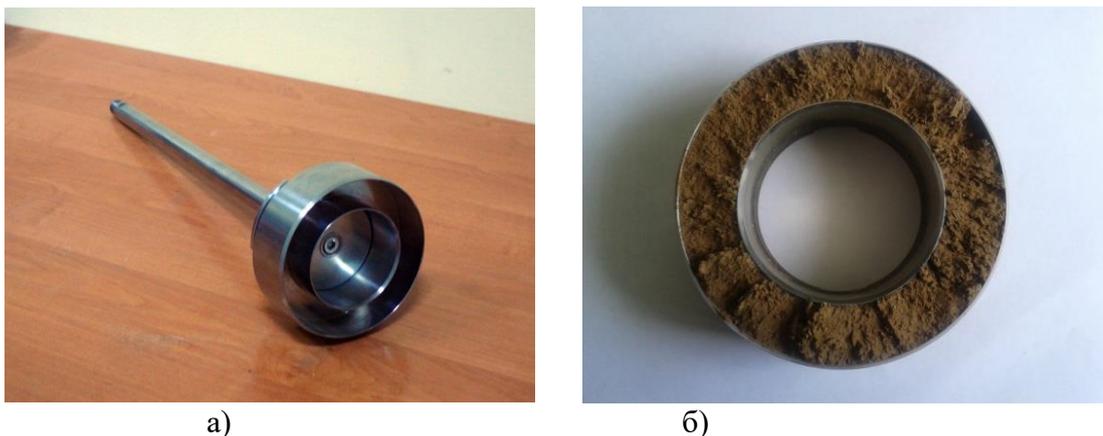


Рис. 9. Кольцевой штамп с присоединительной штангой (а) и вид кольца с грунтом после испытаний (б)

Данная конструкция позволяет сформировать целик грунта, необходимый для проведения испытания по схеме метода кольцевого нагружения, путем вдавливания кольцевого штампа в грунт с контролем усилия и перемещения шаговым двигателем и датчиком перемещений. Подобным образом может быть задавлено в грунт режущее кольцо пробоотборника для отбора монолита грунта и последующих испытаний в лабораторных условиях с целью определения физических и механических свойств исследуемых грунтов.

Управление силовым нагружением и регистрация всех данных измерений осуществляется, используя компьютер и программу АСИС 4.0 (ООО «НПП Геотек»). Последнее позволяет проводить испытания по разным схемам, с учетом стабилизации деформации или без нее. Возможно программное контролирование и изменения различных параметров испытаний.

Модернизированная модель устройства для комплексных испытаний грунтов работает следующим образом.

*Этап 1. Подготовка устройства к испытаниям*

1. На поверхности грунта, дне котлована или шурфа в грунт заворачивают три винтовых анкера на расстоянии, равном расстоянию между цилиндрическими захватами на Т-образной балке.

2. Т-образная балка ставится и закрепляется винтами на анкерах. На Т-образную балку крепится болтами устройство силового нагружения.

3. В случае испытаний штампом площадью 600 см<sup>2</sup> на поверхности грунта устанавливают репер и прикрепляют к нему держатели датчиков вертикальных перемещений. Шток датчика перемещений устанавливают в любом месте на поверхности штампа. Датчики силы, датчик крутящего момента и датчики перемещений подключают к блоку управления и компьютеру.

*Этап 2. Реализация способа испытания и последовательность проведения испытаний*

1. Выбирают тип приспособления для испытаний грунта: круглый штамп крыльчатка, кольцевой штамп или пробоотборник.

*2.1. Испытания круглым штампом площадью 600 см<sup>2</sup>*

2.1.1. Круглый штамп устанавливают на защищенную поверхность грунта соосно с винтом осевого нагружения, а датчик перемещений закрепляют на неподвижном репере.

2.1.2. Используя метод ГОСТ 20276, проводят испытания штампом. Осевую нагрузку создают путем управления шаговым двигателем вертикальной нагрузки. Измерение осадки штампа и управление нагрузкой выполняют автоматически, используя показания датчика перемещений и датчика силы. Данные измерений заносятся в базу компьютера.

2.1.3. Используя результаты измерений, по формулам ГОСТ 20576 находят модуль деформации грунта при нагружении и упругий модуль деформации на цикле «разгрузка-повторное нагружение»:

$$E = \frac{(1 - \nu^2) \omega d \Delta p}{\Delta s}, \quad (1)$$

где  $\nu$  – коэффициент Пуассона, равный 0,3 для песков и супесей, 0,35 для суглинков и 0,42 для глин;  $\omega$  – безразмерный коэффициент, равный 0,8 для круглого штампа;  $d$  – диаметр штампа;  $\Delta p$  – приращение давления на штамп;  $\Delta s$  – приращение осадки штампа, соответствующее  $\Delta p$ .

*2.2. Испытания кольцевым штампом*

2.2.1. Кольцевой штамп соединяют со штангами и с датчиком крутящего момента, после чего под управлением шаговым двигателем вертикальной нагрузки его опускают до поверхности грунта и вдавливают медленно в грунт до касания верхнего торца штампа с грунтом. Момент касания определяется показаниями датчиков силы и датчика перемещений.

2.2.2. Далее испытания проводятся по схеме аналогичной методу одноплоскостного среза (ГОСТ 12248) при различном нормальном давлении. Нормальное давление создается шаговым двигателем и измеряется двумя датчиками силы. Измерение касательной нагрузки выполняют автоматически с использованием датчика крутящего момента. Данные измерений заносятся в базу компьютера.

Используя данные измерений нормальное и предельное (пиковое) касательное напряжения определяются из выражений:

$$\tau_{max} = \frac{3 \cdot M_{max}}{2 \cdot \pi \cdot (r_2^3 - r_1^3)} ; \quad (2)$$

$$\sigma = \frac{N}{\pi \cdot (r_2^2 - r_1^2)} \quad (3)$$

Где  $N$  – нормальная нагрузка;  $r_1, r_2$  – внутренний и наружный радиусы кольцевого штампа;  $M_{max}$  – максимальный крутящий момент.

2.2.3. Используя условие прочности Кулона находят угол внутреннего трения и силы удельного сцепления.

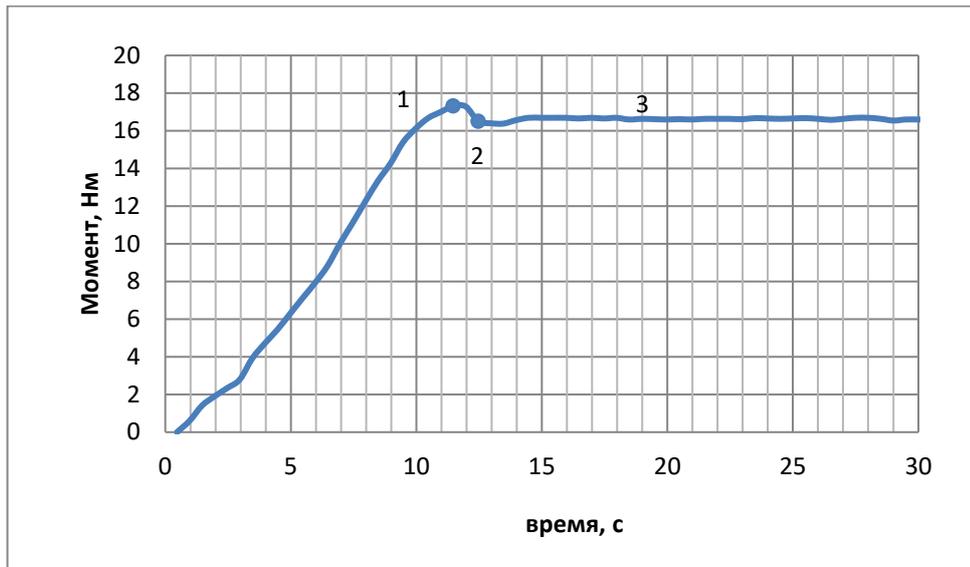


Рис. 10. Зависимость крутящего момента от времени/деформации среза: 1- пиковое значение момента; 2 – падение момента за счет уменьшения сопротивления грунта; 3 - остаточное значение момента

2.2.4. Если продолжить срез грунта вращением кольцевого штампа до остаточных значений крутящего момента  $M_{ост}$  (рис. 10), то используя формулу (2) можно найти остаточное сопротивление грунта срезу  $\tau_{ост}$  и из условия прочности Кулона найти остаточные значения угла внутреннего трения  $\varphi$ , и сил удельного сцепления  $c_r$ . Следует заметить, что это невозможно сделать в приборе одноплоскостного среза из-за конструктивной ограниченности величины деформации среза. В ГОСТ 12248 рекомендуют использовать для этого срез грунта «плашка по плашке», что не сложно, но при этом неизвестна истинная величина деформации среза.

### 2.3. Испытания крыльчаткой

Этап 1. Подготовка устройства к испытаниям.

1. Крыльчатку соединяют со штангами длиной, равной расчетной глубине погружения. После чего свободный конец набора штанг соединяют с датчиком крутящего момента (рис.6,б). Погружение крыльчатки в грунт можно выполнять вручную вдавливанием или с использованием блока

силового нагружения. В первом случае регистрация значения крутящего моменты выполняется с использованием специального регистратора, который показан на рис. 7.

Этап 2. Последовательность проведения испытаний

2.1. Используя метод вращательного среза ГОСТ 20276, проводят срез грунта крыльчаткой. Измерение крутящего момента выполняют автоматически с использованием датчика. Значения крутящего момента отображаются на панели цифрового индикатора ручного устройства или на экране компьютера, если используется блок силового нагружения.

2.2. Используя результаты измерений, находят недренированную прочность глинистого грунта:

$$c_u = \frac{M_{кр}}{0,5\pi d^2 (h + 0,33d)}, \quad (4)$$

где  $d$  – диаметр и  $h$  – высота крыльчатки;  $M_{кр}$  – измеренный максимальный крутящий момент.

Если по достижению пика крутящего момента продолжить вращение крыльчатки (не менее 10 раз), то можно получить остаточное значение крутящего момента  $M_{rest}$ , соответствующее полному разрушению грунта. Отношение  $M_{кр}/M_{rest}$  называется чувствительностью глинистого грунта. Этот показатель используется в виде одного из классификационных показателей связных грунтов и используется также при оценке усилия необходимого для погружения свай в глинистые грунты.

На рис. 11 приведены сравнительные испытания глинистого грунта естественного сложения на опытной площадке ООО «НПП «Геотек» [3]. Опыты выполнены магистром Меркульевым Е.В. в слое полутвердого суглинка, физические характеристики которого приведены в табл. 2.

Табл. 2. Физические характеристики суглинка

Природная влажность, %	Влажность на границе текучести, %	Влажность на границе раскатывания, %	Число пластичности	Показатель текучести	Плотность, г/см <sup>3</sup>
22,0	37,9	19,8	13,8	0,01	1,84

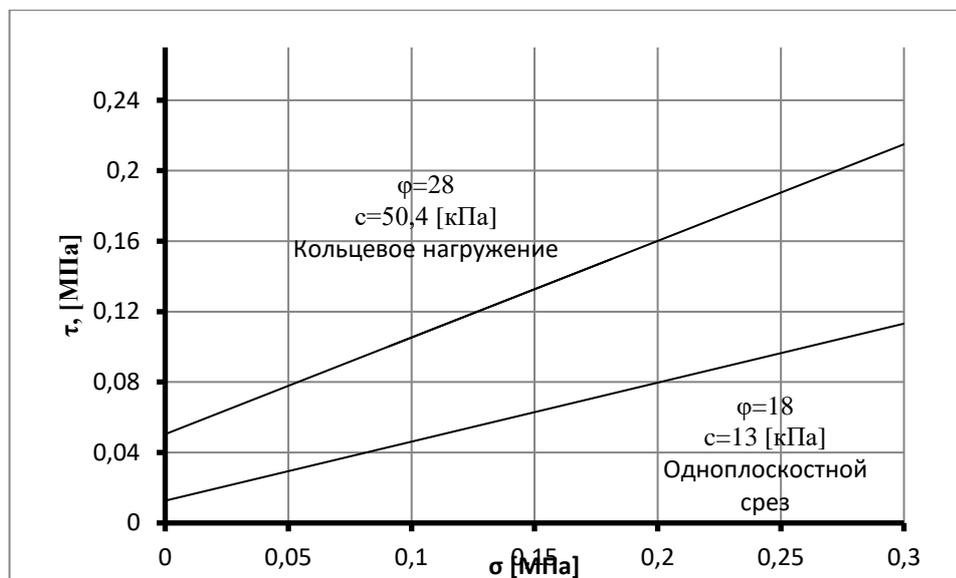


Рис. 11. Графики результатов испытаний грунтов методами кольцевого и одноплоскостного среза: 1 – метод одноплоскостного среза; 2 – метод кольцевого среза

Результаты испытаний, приведенные на рис. 11 показывают на существенные различия в полученных характеристиках прочности. Исследования показывают влияние формы кольцевого штампа и скорости среза на сопротивление сдвигу глинистого грунта. В лабораторных условиях скорость консолидированно-дренированного среза составляет сотые доли миллиметра в минуту, тогда как в методе кольцевого среза сам срез происходит значительно быстрее, за одну-две минуты. Полученные данные показывают на необходимость проведения дополнительных исследований с целью совершенствования рассмотренного метода испытаний.

### Выводы и задачи будущих исследований

1. Сравнение результатов испытаний методом кольцевого среза и результатов испытаний в условиях одноплоскостного среза дают различные значения характеристик прочности Кулона. Количественная разница в значениях может быть объяснена как влиянием скорости среза, так и видом кольцевого штампа.

2. Устройство для испытаний методом кольцевого нагружения показало свою работоспособность и может быть использовано в дальнейших исследованиях с целью совершенствования метода комплексных испытаний грунтов в полевых условиях.

### Литература

1. Авторское свидетельство СССР № 657315 А1, заявка 2362128/25-28 от

17.05.1976, МПК 5 G01N3/08, G01N3/22, заявитель Московский ордена Трудового Красного Знамени инженерно-строительный институт им. В.В. Куйбышева. Способ испытания грунтов, автор В.Л. Кубецкий, опубликовано 15.04.1979.

2. Болдырев Г.Г. Полевые методы испытаний грунтов (в вопросах и ответах). - Саратов: Издательский центр «РАТА» 2013. – 356 с.

3. Болдырев Г.Г., Мельников А.В., Меркульев Е.В., Новичков А.Г. Сравнение методов полевых и лабораторных методов испытаний грунтов. Инженерные изыскания, №14, 2013, с. .

4. ГОСТ 20276-2012. Грунты. Методы полевого определения характеристик прочности и деформируемости. – М.: МНТКС, 2013. – 50 с.

5. ГОСТ 30672-2012. Грунты. Полевые испытания. Общие положения. – М.:МНТКС, 2013. - 10 с.

6. Патент на изобретение № .

7. Рекомендации по определению характеристик реологических свойств скальных и полускальных грунтов методом кольцевого нагружения. ВНИИГ, Ленинград, 1990. – 112 с.