

# ИССЛЕДОВАНИЯ АНИЗОТРОПНОГО ПОВЕДЕНИЯ ГРУНТОВ В УСЛОВИЯХ СЛОЖНОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ЧАСТЬ 3. ПРИБОРЫ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ПОЛЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ

**DOI:**

БОЛДЫРЕВ Г.Г.

ООО «НПП «Геотек»», г. Пенза, Россия, g-boldyrev@geotek.ru

ИДРИСОВ И.Х.

ООО «НПП «Геотек»», г. Пенза, Россия, idrisov@npp-geotek.ru

УДК 624.131.37

**АННОТАЦИЯ**

В статье рассмотрены новые приборы и измерительные системы для испытаний полых цилиндрических образцов дисперсных и скальных грунтов. Показано их преимущество по сравнению с приборами стандартного трехосного сжатия и истинного трехосного сжатия. Приборы для испытаний полых цилиндрических образцов позволяют проводить испытания с независимым контролем величин трех главных напряжений и вращением их осей при различных траекториях напряжений или деформаций. Представлены результаты моделирования циклического нагружения грунтов с использованием приборов различной конструкции для испытаний полых образцов. Показано, что все приборы входят в состав измерительных систем, включающих датчики, устройства силового нагружения, управления нагружением и сбора данных измерений. Исследование механических свойств грунтов и других материалов в условиях сложного напряженного состояния целесообразно проводить путем испытания полых цилиндрических образцов. В этом случае возможно реализовать различные траектории напряжений, в том числе и с вращением наибольшего главного напряжения как при монотонном, так и циклическом изменении девиатора напряжений. Опыт подобных испытаний показывает их преимущество по сравнению с приборами стандартного или истинного трехосного сжатия, которое выражается в меньшей степени влияния граничных условий и полной определенности напряженно-деформированного состояния, которое может быть измерено. Замкнутая система управления с прямой и обратной связью обеспечивает точность и независимый контроль среднего напряжения, девиатора напряжений, промежуточного главного напряжения и направления наибольшего главного напряжения от малых  $10^{-6}$  до больших деформаций  $10^{-1}$ .

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА**

Испытания; приборы; цилиндрические полые образцы, измерительная система; датчики; компьютер

**ССЫЛКА ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:**

Болдырев, Г.Г., Идрисов, И.Х., 2018. Исследования анизотропного поведения грунтов в условиях сложного напряженного состояния. Состояние вопроса. Часть 3. Приборы для испытаний полых цилиндрических образцов. Геотехника, Том X, № 1, с. XX-XX.

Болдырев Г.Г., Идрисов И.Х., 2018

# STATE OF THE ART: STUDIES OF SOILS ANISOTROPIC BEHAVIOR UNDER CONDITIONS OF A COMPLEX STRESS STATE. PART 2. HOLLOW CYLINDER TORSIONAL MACHINES

BOLDYREV G.G.

«NPP “Geotek”» Ltd, Penza, Russia, g-boldyrev@geotek.ru

IDRISOV I.H.

«NPP “Geotek”» Ltd, Penza, Russia, idrisov@npp-geotek.ru

## ABSTRACT

The article considers new instruments and measuring systems for testing hollow cylindrical samples of dispersed and rock soils. Their advantage is shown in comparison with standard triaxial compression and true triaxial compression machines. Hollow cylindrical specimens testing machines allow testing with independent control of three principal stresses magnitude and their axes rotation under different stress or strain paths. The results of soils cyclic loading simulation using machines of various designs for testing hollow samples are presented. It is shown that all the machines are part of the measuring systems, including sensors, load-sensing devices, load control and acquisition of measurement data. Investigation of soils mechanical properties and other materials under conditions of a complex stress state is expedient to be carried out by testing hollow cylindrical samples. In this case, it is possible to realize various stress paths, including the rotation of principal stresses, both for monotonic and cyclic changes in the stress deviator. The experience of such tests shows their advantage in comparison with the instruments of standard or true triaxial compression, which is expressed to a lesser degree by the influence of boundary conditions and the complete definiteness of the stress-strain state, which can be measured. A closed control system with direct and feedback provides accuracy and independent control of medium stress, deviator stress, intermediate main stress and direction of the principal stresses from small  $10^{-6}$  to large deformations  $10^{-1}$ .

## KEY WORDS

Tests; device; cylindrical hollow samples; measuring system; sensors; computer

## FOR CITATION:

Boldyrev, G.G., Idrisov, I.H., 2018. State of the art: studies of soils anisotropic behavior under conditions of a complex stress state. Part 2. Hollow cylinder torsional machines. *Geotechnics*, Vol. X, No. 1, pp. XX-XX.

Приведенное ниже описание приборов для испытаний полых цилиндрических образцов грунта является дополнением к ранее опубликованному обзору в монографии Г.Г. Болдырева «Методы определения механических свойств грунтов с комментариями к ГОСТ 12248-2010» (глава 9) [1]. За прошедшие годы появились новые работы, посвященные испытаниям грунтов с целью определения их механических свойств. В настоящей статье рассмотрены приборы и измерительные системы для испытаний полых цилиндрических образцов дисперсных и скальных грунтов.

Приборы с полыми цилиндрическими образцами позволяют проводить испытания с независимым контролем величины трех главных напряжений ( $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ) и вращением их осей при различных траекториях напряжений или деформаций. Наибольшее применение подобные приборы нашли при исследовании напряженно-деформированного состояния дисперсных и, в существенно меньшей степени, скальных грунтов, бетонов и асфальтобетонов.

Управляя внешними нагрузками ( $p_0, p_r, W, M$ ), можно создать внутри образца напряжения:  $\sigma_z, \sigma_r, \sigma_\theta$  и  $\tau_{z\theta}$  (рис. 1). Значения трех главных напряжений  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  совместно с ориентацией наибольшего напряжения (угол  $\alpha$ ) могут изменяться независимо друг от друга. В современных приборах создается

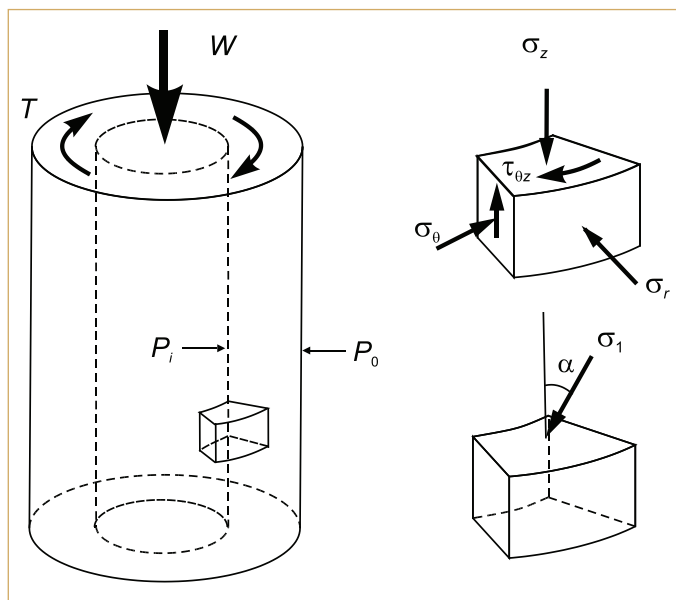


Рис. 1. Образец материала в виде полого цилиндра и компоненты напряжений на элементе среды

не только крутящий момент, но и осевое усилие, при этом обе нагрузки могут быть динамическими.

Производители оборудования	
Наименование фирмы/университета	Источник
Wykeham Farrance, Англия	<a href="http://www.wfi.co.uk/eng/">http://www.wfi.co.uk/eng/</a>
GDS	<a href="http://www.gdsinstruments.com">www.gdsinstruments.com</a>
CGDS	<a href="http://www.avantech.in/products/dynamic-hollow-cylinder-testing-system-(hca-100).aspx">http://www.avantech.in/products/dynamic-hollow-cylinder-testing-system-(hca-100).aspx</a>
Wille Geotechnik	<a href="http://www.wille-geotechnik.com/ru/hollow-cylinder.html">http://www.wille-geotechnik.com/ru/hollow-cylinder.html</a>
University British Columbia, Department of Civil Engineering	<a href="http://geotechnicalgradlab.civil.ubc.ca/technology/hollow-cylinder-torsional-shear-device/">http://geotechnicalgradlab.civil.ubc.ca/technology/hollow-cylinder-torsional-shear-device/</a>
University of Cambridge. Department of Engineering	<a href="http://www-civ.eng.cam.ac.uk/geotech_new/facilities/elementtesting/hollow_cylinder/">http://www-civ.eng.cam.ac.uk/geotech_new/facilities/elementtesting/hollow_cylinder/</a>
Industrial Science University of Tokyo	<a href="https://www.tus.ac.jp/">https://www.tus.ac.jp/</a>

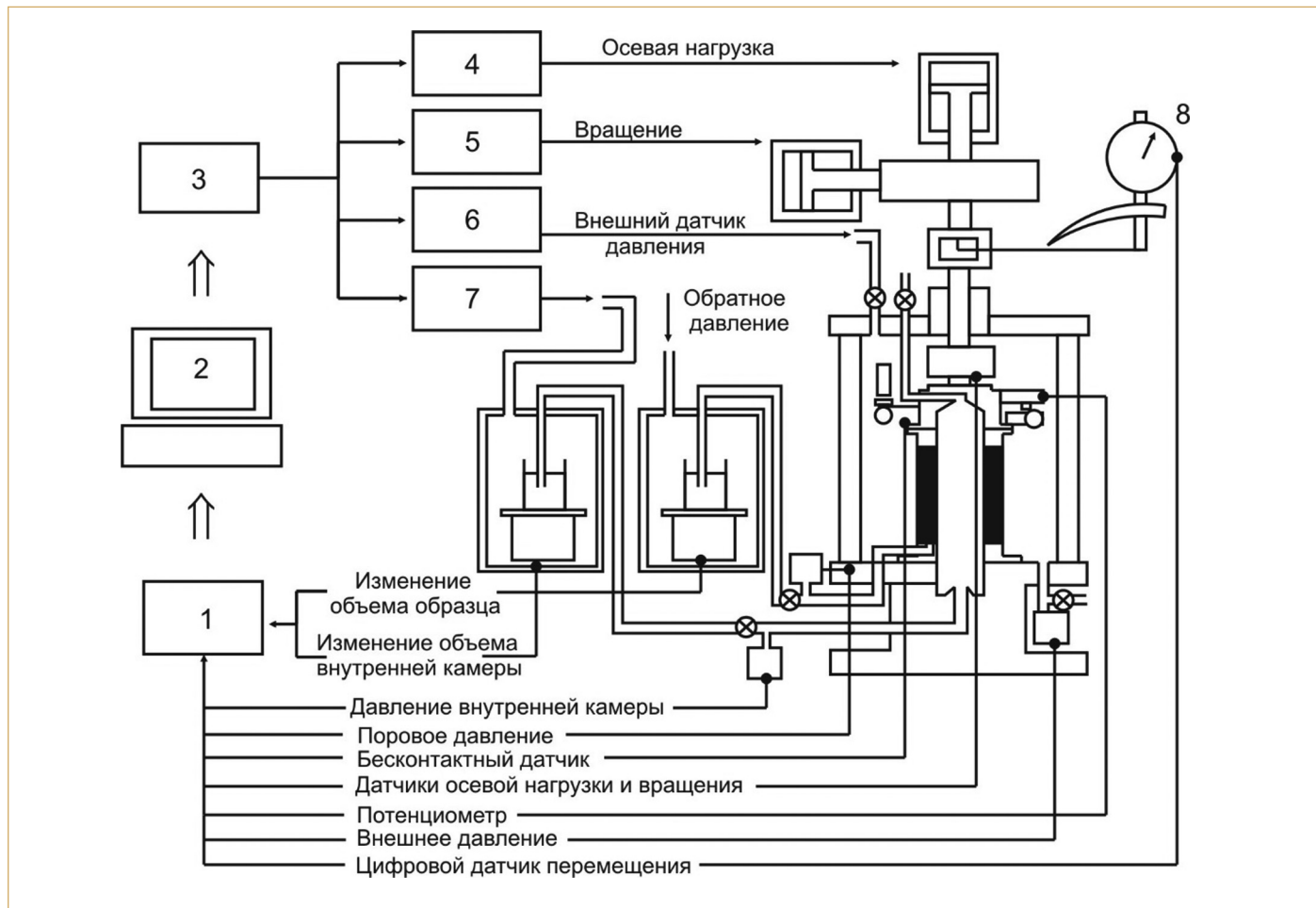


Рис. 2. Схема системы для испытания полых образцов грунта [6]:  
 1 — 16-разрядный АЦП; 2 — компьютер; 3 — 16-разрядный ЦАП; 4,6,7 — датчик давления; 5 — сервоконтроллер

Одна из первых конструкций для испытаний полых образцов грунта на кручение была разработана в ВОДГЕО (Всесоюзный научно-исследовательский институт водоснабжения, канализации, гидротехнических сооружений и инженерной гидрогеологии) в начале 50-х годов прошлого столетия [3]. Конструкция прибора основана на принципе определения сопротивления образца грунта, имеющего форму полого ци-

линдра, кручению при созданном вначале и не изменяющемся гидростатическом обжатии. Такое силовое воздействие соответствует чистому сдвигу. Образец при этом находится практически в однородном напряженно-деформированном состоянии. Малышев М.В. отмечает, что осуществление чистого сдвига представляется наиболее целесообразным при определении модуля сдвига, а также угла внутреннего трения



Рис. 3. Система нагружения и трехосная камера [8]

и сцепления, так как указанные характеристики определяются в этом случае непосредственно.

В настоящее время приборы для испытаний цилиндрических полых образцов производятся несколькими зарубежными фирмами и разработаны самостоятельно в некоторых зарубежных университетах (таблица).

В работе авторов [6] приводится описание измерительной системы для испытания полых образцов на кручение. Система была разработана с целью определения параметров деформируемости для анизотропной модели грунта.

Схематическая диаграмма системы для испытания полых цилиндрических образцов, описанная в работе [6], показана на рис. 2. Образец имеет следующие размеры: высота составляет 200 мм; внутренний радиус 30 мм и внешний радиус 50 мм. Детали данной системы более подробно приведены в работе [20]. Несмотря на то, что измерительная система была предложена в 1998 году, ее состав практически без изменений используется в большинстве исследований в настоящее время.

Все измерения и управление выполняются компьютером через 16-разрядный АЦП и ЦАП. Осевая нагрузка создается при помощи воздуха пневмоцилиндром двойного действия. Крутящий момент контролируется давлением масла при помощи устройства гидравлического нагружения. Внутреннее

и внешнее давления на цилиндрический полый образец создается давлением воздуха. Полость образца полностью заполнена дегазированной водой. Давление в камере с внешней стороны образца создается воздухом через воду, которая покрывает верхний штамп. Осевая нагрузка и крутящий момент измеряются внутренними датчиками силы, которые размещены выше нагрузочного штампа. Внутреннее и внешнее давления измеряются датчиками давления, расположенными в основании рабочей камеры прибора.

Среднее значение напряжений и соответствующие деформации вычисляются с использованием выражений, которые приведены в работе [2]. Тангенциальное  $\sigma_\theta$  и радиальное  $\sigma_r$  напряжения вычислялись с использованием предположения линейно упругого распределения напряжений и деформаций поперек стенки образца, сделанное ранее [10, 24]. Касательное напряжение  $\tau_{z\theta}$  **saki et al.** определялось, предполагая линейно упругое и **идеально** пластическое поведение грунта [11]. Малые значения вертикального перемещения  $\Delta h$  и **горизонтальное** перемещение  $\theta$  измеряются бесконтактным датчиком **на** верхнем штампе. Большие значения  $\Delta h$  и  $\theta$  измеряются датчиком перемещения LVDT и потенциометрическим датчиком, соответственно, вне рабочей камеры прибора. Текущие значения внутреннего и внешнего радиусов в опытах вычислялись из из-

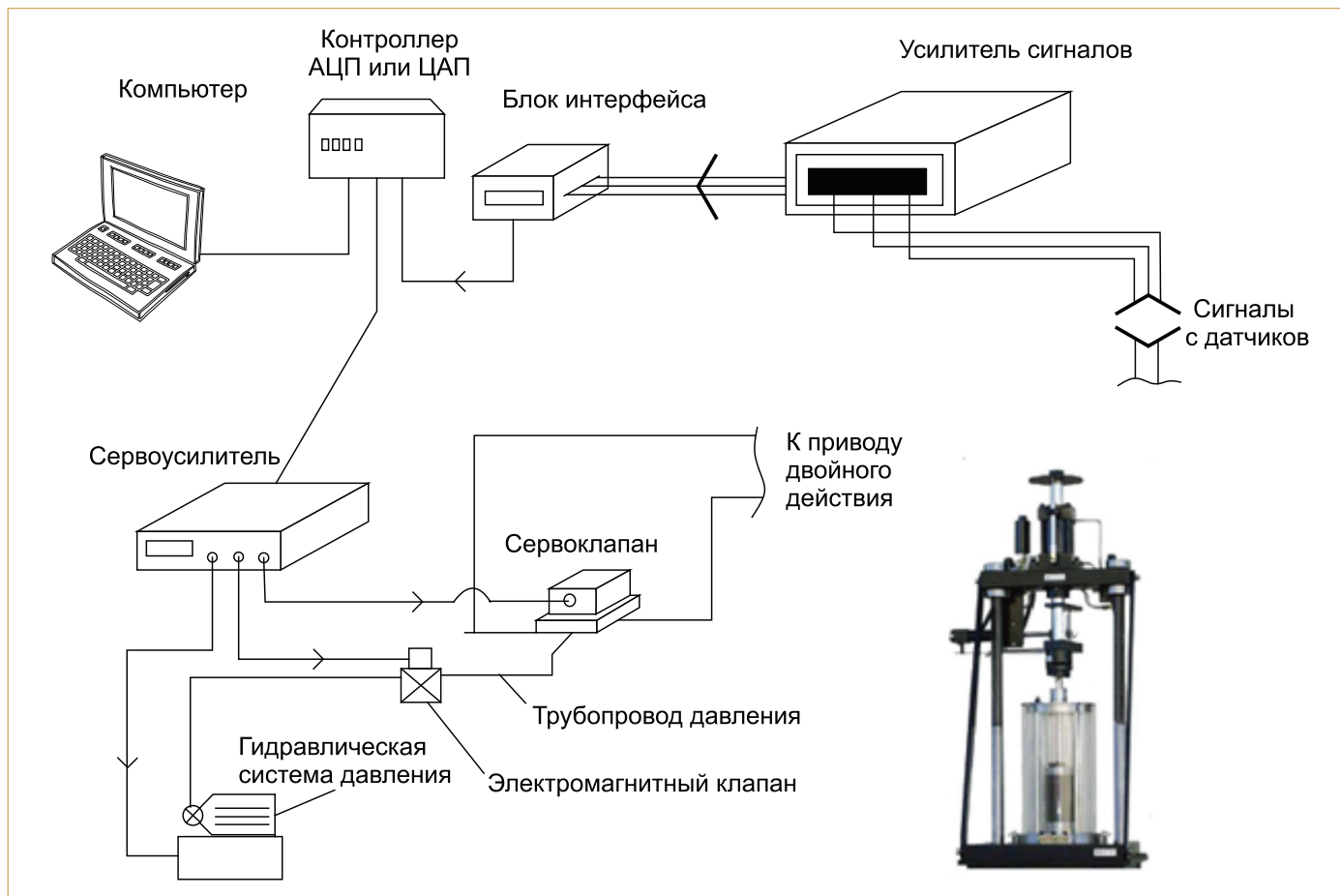


Рис. 4. Состав измерительной системы [12]

менения объема образца. В опытах учитывалось также изменение объема вследствие деформации резиновой оболочки.

### Прибор GCTS (Geotechnical Consulting and Testing System)

Прибор фирмы GCTS [6] (рис. 3) применяется многими исследователями при оценке анизотропного поведения грунтов [12, 21]. Система сбора данных показана на рис. 4 и позволяет выполнять управление с интервалами обновления в 60 секунд. Данные измерений регистрируются электронным путем с помощью компьютера. Все преобразователи в установке подключаются к контроллеру через компьютерный интерфейс для сбора данных и контроля управлением. Сам контроллер также подключен к компьютеру. Программное обеспечение CATS [8] использовалось для автоматизации различных этапов испытаний, таких как водонасыщение и создание нагрузки для заданной траектории напряжения или траектории деформации.

Рабочая камера прибора с системой силового нагружения относительно легкая, но очень устойчива, и может быть размещена на небольшом рабочем столе (см. рис. 3). Крестовина поддерживает цилиндры нагрузки двойного действия, используемые для создания осевой нагрузки и крутящего момента.

Эти два GCTS нагрузочных устройства обеспечивают низкое давление в момент приложения нагрузок, чрезвычайно чувствительный отклик, очень низкое трение и низкое усилие страгивания, обеспечивая тем самым плавность хода. Эти нагружатели имеют сервопривод с электроприводом и гидравлическим давлением. Система нагружения способна создавать осевую нагрузку, или крутящий момент отдельно, или одновременно. С использованием этой системы нагружения к образцу могут быть приложены максимальная нагрузка 22,25 кН и максимальный крутящий момент 225 Нм. Нагрузочные штампы являются интерфейсом между блоком управления давлением/объемом и испытуемым образцом. Штампы нагружают образец, имеющий размеры: 200 мм в высоту, 100 мм в наружном диаметре и 50 мм по внутреннему диаметру. Каждый штамп (верхний и нижний, в основании) имеет восемь пористых дисков (14 мм в диаметре) и восемь выступов (1,7 мм в ширину и 3 мм в высоту), они используются для водонасыщения образцов и могут обеспечить передачу крутящего момента без какого-либо проскальзывания.

Система управления давлением состоит из пяти электрогидравлических серво-управляемых регуляторов давления/объема, преобразователей для прямых измерений объемов и давления (рис. 4, рис. 6). Пять контроллеров отве-



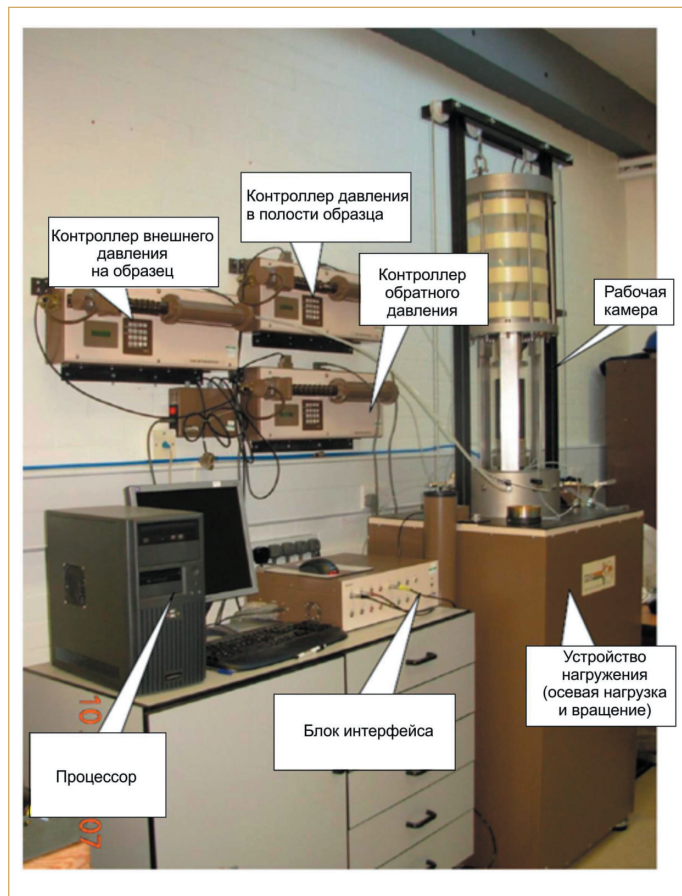


Рис. 5. Общий вид прибора [5]

чают за внешнее давление на образец, внутреннее давление внутри образца, верхнее противодействие, нижнее противодействие и поровое давление в основании образца. В системе используется гидравлически-цифровое серво-управление для поддержания необходимых условий испытаний. Каждый контроллер давления/объема имеет емкость 280 см<sup>3</sup> и способен обеспечивать контроль и измерения изменений объема с точностью до 0,01 см<sup>3</sup>; максимальное допустимое давление составляет 1000 кПа с точностью до 0,1 кПа. Датчик силы и внешний LVDT датчик перемещения используются для обратной связи в процессе управления. Работа системы интегрирована с простым в использовании программным обеспечением CATS [8], которое позволяет управлять простыми или сложными условиями испытаний. Все параметры, которые необходимо контролировать для сохранения фиксированной ориентации главных напряжений работают с системой PID-регулирования. Таким образом, достигается достаточно хороший контроль, и PID-регулирование обеспечивает почти точную регулировку напряжений. Преимущества PID-регулирования были кратко обсуждены в работе [16].

### Прибор фирмы GDS

В работах [4, 5] описана система (рис. 5) для испытаний полых образцов грунта, разработанная фирмой GDS



Рис. 6. Устройство управления гидравлическим нагружением [18]: а — GDS ([www.gdsinstruments.com](http://www.gdsinstruments.com)); б — НПП Геотек ([www.npp-geotek.ru](http://www.npp-geotek.ru))

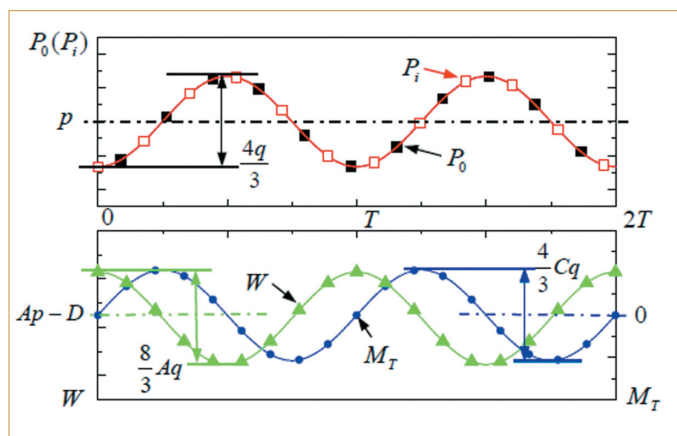


Рис. 7. Функции циклической нагрузки ( $p_0 = p_i$ ) [27]

([www.gdsinstruments.com](http://www.gdsinstruments.com)). Нагружение выполняется тремя гидравлическими электро-механическими приводами, которые позволяют контролировать и измерять давление и изменение объема воды, подаваемой с внешней и внутренней стороны образца, а также обратное давление. Система может измерять осевую деформацию через изменение объема или прямым образом датчиком перемещений. Разрешение датчиков давления составляет  $\pm 0,2$  кПа в диапазоне до 2000 кПа. Точность измерения: давление  $\leq 0,1\%$  в полном диапазоне; объема  $\leq 0,1\%$  измеренного значения с колебанием  $\pm 20$  мм<sup>3</sup>.

Образец имеет следующие размеры: внешний диаметр — 100 мм, внутренний диаметр — 60 мм, высота — 200 мм. Максимальная осевая нагрузка — 12 кН, крутящий момент — 200 Нм. Вращение передается через шток вертикальной нагрузки. Разрешение датчиков для измерения осевого усилия и крутящего момента: осевая нагрузка  $< 0,7$  Н; осевое перемещение энкодера  $< 1$  микрон; крутящий момент  $< 0,008$  Нм; энкодер вращения  $< 0,00011^\circ$ .

Персональный компьютер связан с гидравлической трехосной камерой и полым образцом грунта через семь управляемых микропроцессором гидравлических устройств, называе-

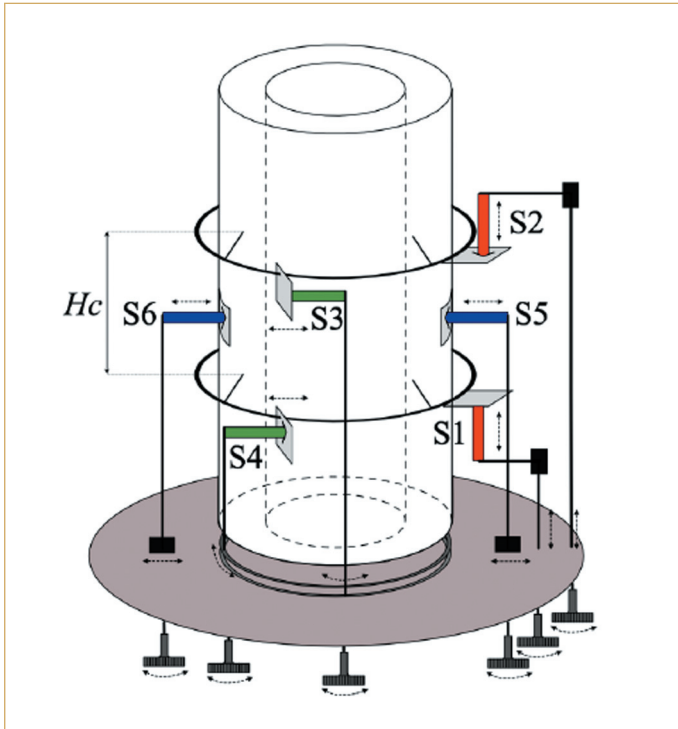


Рис. 8. Схематический вид системы измерения малой деформации вокруг полого образца (Mandolini et al., 2016) [17]

мых цифровыми контроллерами давления/объема [18, 19, 26]. Контроллеры (рис. 6) точно регулируют и измеряют давление и изменение объема дегазированной воды, подаваемой в нагрузочный цилиндр прибора для создания осевой нагрузки или определения радиальной деформации по величине изменения объема образца; внешнее и внутреннее давление в образце; обратное давление и поровое давление в трех различных точках. Система также измеряет осевую деформацию косвенным методом по изменению объема внутри рабочей камеры или прямым измерением, используя цифровой датчик перемещений. Поровое давление может быть измерено цифровым контроллером или датчиками давления. Цифровые контроллеры, датчики порового давления и датчик осевой деформации связаны через IEEE 488 стандартный параллельный интерфейс с компьютером.

Принцип работы цифрового контроллера следующий. Дегазированная вода в цилиндре сжимается поршнем, который соединен червячной передачей с шаговым двигателем. Перемещение поршня измеряется датчиком типа LVDT, а давление в воде датчиком давления. В данных опытах применялся цифровой контроллер с максимальным изменением объема  $1000 \text{ мм}^3$  при диапазоне давления  $0\text{--}2000 \text{ кПа}$ . Точность измерения давления  $0,2 \text{ кПа}$ , объема —  $0,5 \text{ мм}^3$ .

Измерительная система в виде 16-разрядного контроллера подключена к компьютеру через USB порт. Программа включает по умолчанию три модуля управления испытаниями:

1. *Сложное нагружение.* Этот модуль независимо управляет пятью главными параметрами: осевой нагрузкой,

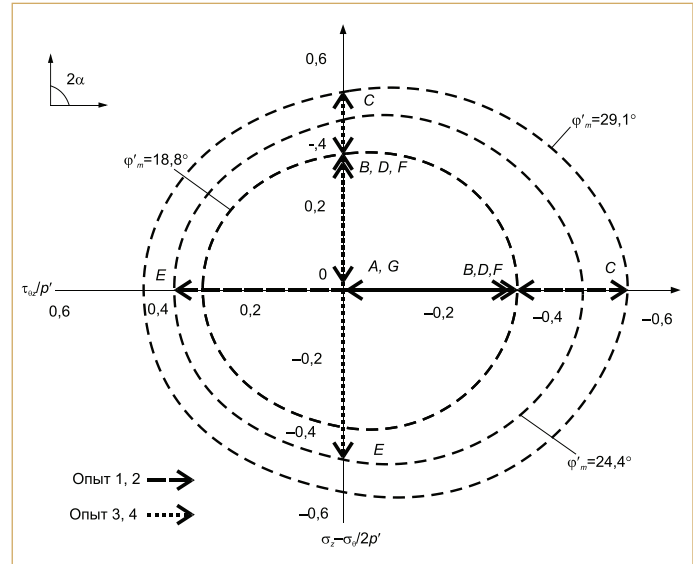


Рис. 9. Траектории напряжений в плоскости нормализованно девиатора напряжений (Mandolini et al., 2016) [17]

крутящим моментом, внешним давлением, внутренним давлением и обратным давлением. Осевой контроль может быть осуществлен через: осевое напряжение (кПа), осевое перемещение (мм) или осевую нагрузку (кН). Управление вращением может быть осуществлено путем вращения напряжения (кПа), вращения нагрузки (кН) или вращения перемещения (град.).

2. *Нагружение по различным траекториям.* Этот модуль контролирует в испытаниях четыре параметра:  $p$ ,  $q$ ,  $b$  и  $\alpha$ , а также выбор схемы испытаний, дренированные или недренированные.
3. *Динамические испытания.* Модуль обеспечивает контроль создания синусоидальных циклических осевых перемещений или осевой нагрузки и вращения/кручения (рис. 7).

Система GDS позволяет проводить испытания при вращении угла  $\alpha$  в диапазоне от  $-90^\circ$  до  $90^\circ$ , а вращение  $\alpha$  от  $0^\circ$  до  $180^\circ$  не может быть создано. В этом случае, циклические испытания с непрерывным вращением  $\alpha$  не могут быть выполнены.

В работе Mandolini et al. (2016) [17] представлены результаты моделирования циклического нагружения песка с использованием прибора для испытаний полых образцов. Прибор оборудован комплексной измерительной системой, основанной на использовании бесконтактных датчиков высокой степени разрешения, способной обеспечить точное измерение жесткости песка в области малых деформаций.

Измерительная система имеет шесть бесконтактных датчиков высокой точности, смонтированных вокруг полого цилиндрического образца с внешним диаметром  $100 \text{ мм}$ , внутренним диаметром  $60 \text{ мм}$  и высотой  $200 \text{ мм}$  (рис. 8). Водозащищенные датчики с разрешением  $0,1 \text{ микрона}$  являются точным средством для измерения очень малых деформаций (до  $10^{-6}$ ) в трех направлениях. Две пары датчиков перемещения S1, S2, S3 и S4,

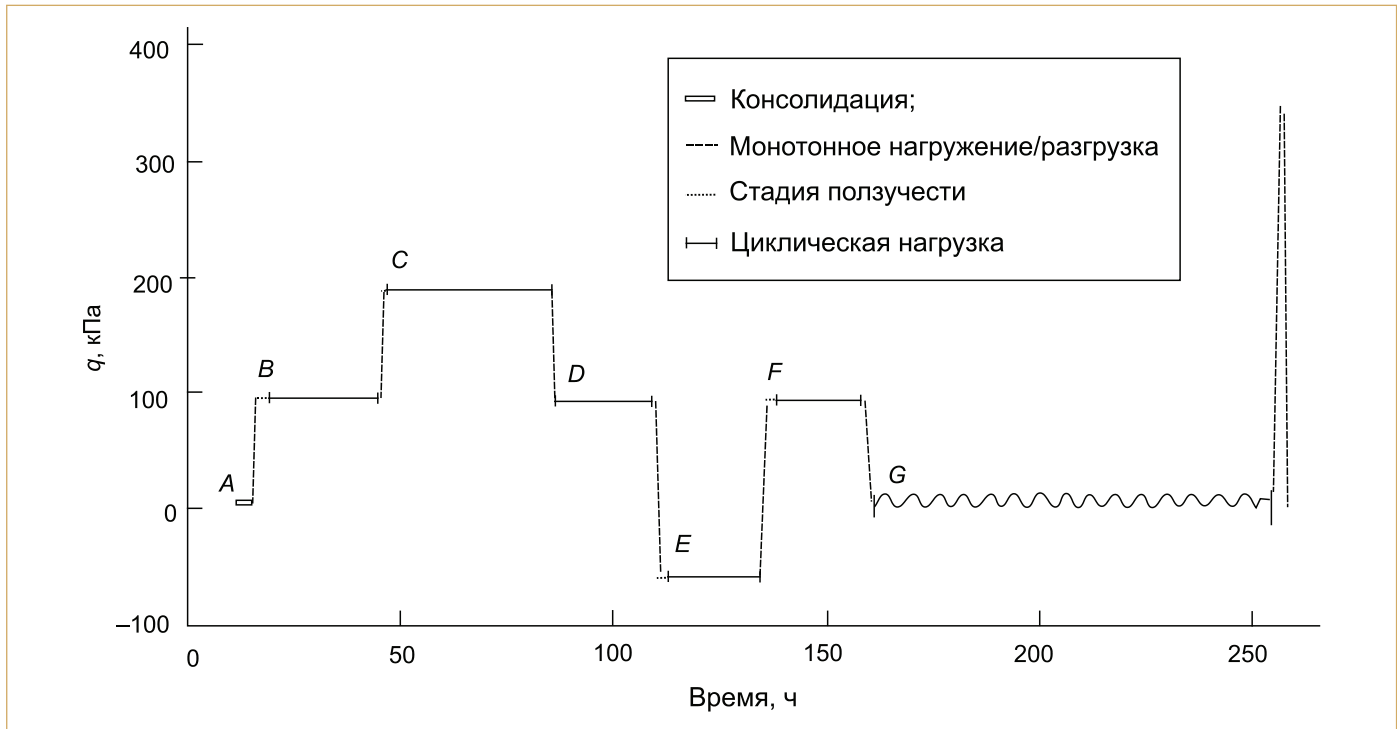


Рис. 10. Управление девиатором напряжения в программе испытаний (Mandolini et al., 2016) [17]

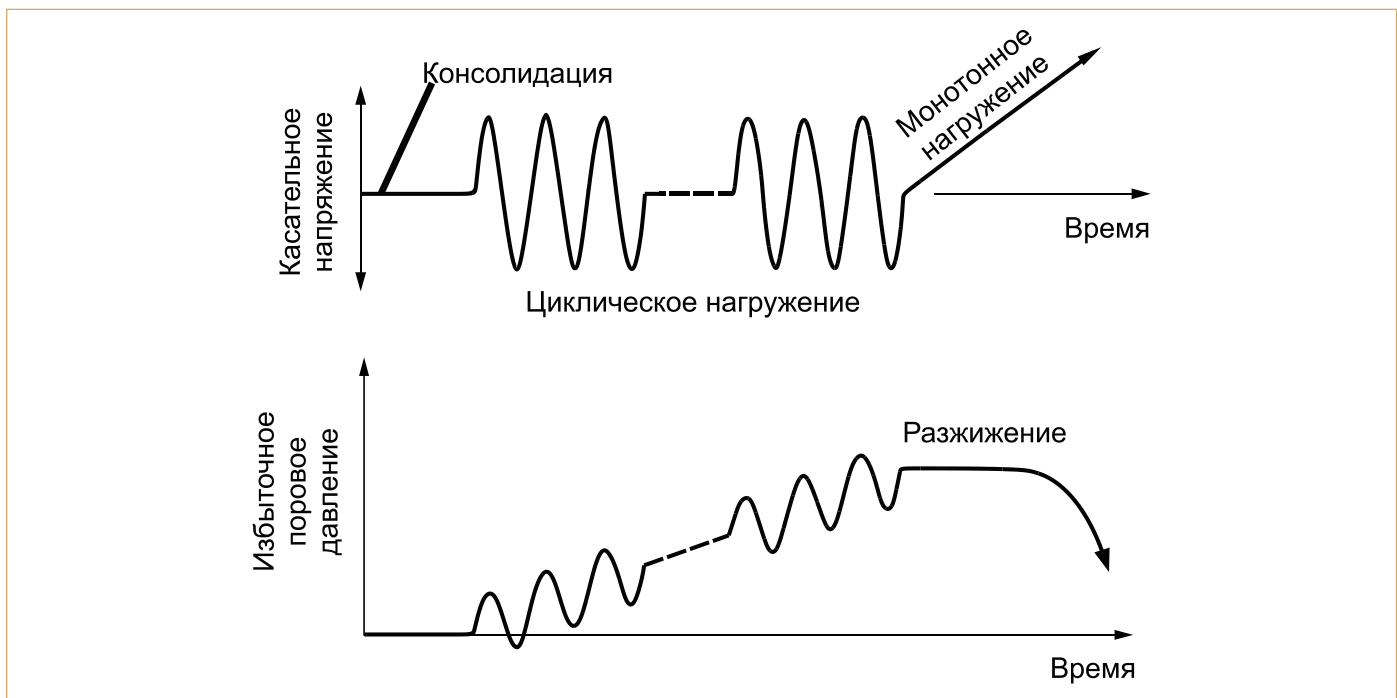


Рис. 11. Процедура циклического и монотонного нагружения [26]

соответственно, измеряют смещение датчиков вокруг образца относительно марок из фольги, закрепленных на двух стальных кольцах. Кольца расположены горизонтально на расстоянии 100 мм друг от друга ( $H_z$ ). Они прикреплены к образцу тонкой пластиковой полоской, приклеенной к внешней оболочке. Ра-

диальная деформация оценивается как разница из измерения радиальных перемещений S5 и S6. Изменения во внутреннем радиусе сложно измерить прямым образом, поэтому они оценены путем изменения внутреннего объема и вертикальных перемещений образца. Из-за ограниченного «хода» в 2 мм каж-



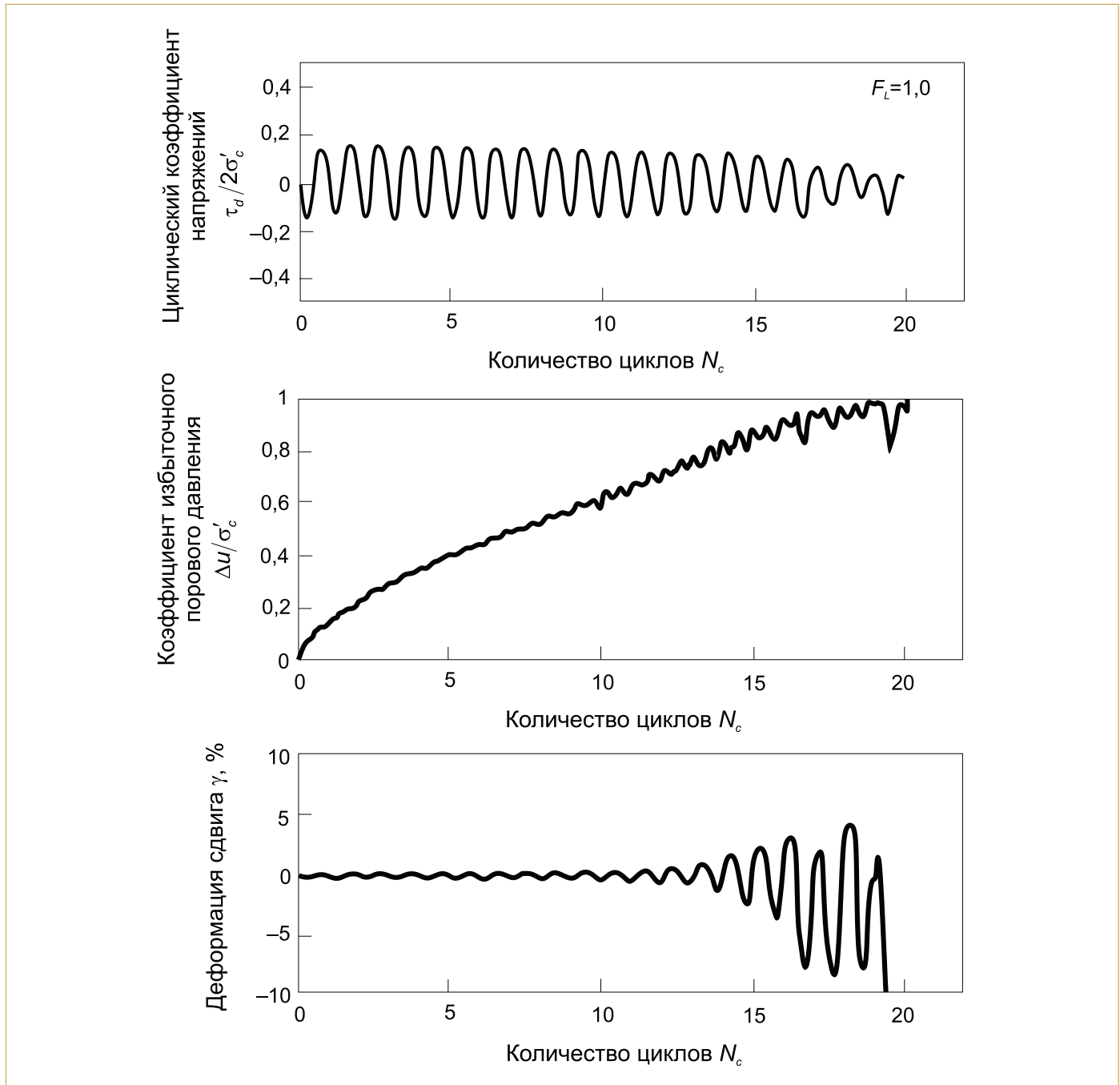


Рис. 12. Типичные результаты испытаний при циклическом нагружении полностью водонасыщенной глины [28]

дый датчик переустанавливался в начальное положение (0,2 мм) с использованием специальной системы регулирования, расположенной с внешней стороны рабочей камеры.

Образец из песка формировался путем отсыпки и вибрации с частотой около 55 Гц, что позволило достичь величины коэффициента пористости 0,82. Затем образец был продут углекислым газом и водонасыщен под давлением 300 кПа.

Программа испытаний включала изменение девиатора напряжений в многоосном пространстве напряжений и затем создание большого количества циклов девиатора напряжений

малой амплитуды ( $\pm 5$  кПа) с измерением модуля упругости и модуля сдвига в начале и в конце каждого цикла нагружения. Траектория напряжений в девиаторной плоскости ( $\tau_{z\theta} / p' - (\sigma_z - \sigma_\theta) / 2$ ) показана на рис. 9. Испытания выполнены при различном уровне девиатора напряжений,  $\alpha = 0^\circ$  (сжатие) и  $\alpha = 90^\circ$  (расширение), соответствующие значения угла внутреннего трения показаны на рис. 9, для каждого уровня девиатора напряжений.

На рис. 10 показана последовательность изменения напряженного состояния в одном из испытаний. Скорость нагруже-

ния для каждой монотонной нагрузки и разгрузки (голубая линия на рис. 10) была равна 0,5 кПа/мин. Зеленая линия показывает возникновение деформации ползучести после достижения заданного уровня девиатора напряжения. Затем образец подвергался большому количеству малых циклов нагружения (черная линия) в осевом или круговом направлении с частотой 0,05 Гц, что соответствует циклу каждые 20 секунд.

На рис. 11 показаны типичные результаты испытаний на разжижение с использованием полых цилиндрических образцов гравелистого грунта с максимальным диаметром частиц до 19 мм и относительной плотностью 60%.

Нагрузка прикладывалась блоками по 20 циклов с частотой 0,1 цикл/с, как показано на рис. 11, в недренированных условиях. После циклического нагружения было применено монотонное нагружение со скоростью 10% деформации сдвига в минуту.

Типичные результаты испытаний показаны на рис. 12.


Для испытаний полых образцов скальных грунтов разработаны подобные приборы [7, 9, 14, 15, 23, 25]. В специальных целях испытания полых образцов были использованы для исследования поведения сухих трещиноватых скальных грунтов [13, 22, 29]. Эти исследования показали, что основным преимуществом испытаний разрывов в горных породах с полыми цилиндрическими образцами являются: 1) способ-

ность приборов создавать однородное распределение напряжений на стыке двух частей скальной породы и 2) способность приборов управлять полным напряженным состоянием на стыке в течение всего испытания.

### Заключение

Исследование механических свойств грунтов и других материалов в условиях сложного напряженного состояния целесообразно проводить путем испытания полых цилиндрических образцов. В этом случае возможно реализовать различные траектории напряжений, в том числе и с вращением наибольшего главного напряжения как при монотонном, так и циклическом изменении девиатора напряжений.

Опыт подобных испытаний показывает их преимущество по сравнению с приборами стандартного или истинного трехосного сжатия, которое выражается в меньшей степени влияния граничных условий и полной определенности напряженно-деформированного состояния, которое может быть измерено.

Замкнутая система управления с прямой и обратной связью обеспечивает точность и независимый контроль среднего напряжения, девиатора напряжений, промежуточного главного напряжения и направления наибольшего главного напряжения от малых ( $10^{-6}$ ) до больших ( $10^{-1}$ ) деформаций. 

### Список литературы

1. Болдырев, Г.Г., 2014. Методы определения механических свойств грунтов с комментариями к ГОСТ 12248-2010. Изд-во ООО «Прондо», М.
2. Болдырев, Г.Г., Идрисов, И.Х., 2017. Исследования анизотропного поведения грунтов в условиях сложного напряженного состояния. Состояние вопроса. Часть 1. Влияние направления главного напряжения на прочность грунтов. Геотехника, № 5, с. 4–19.
3. Малышев, М.В., 1955. Прибор для определения механических характеристик прочности и деформируемости грунтов методом кручения. АН СССР, институт технико-экономической информации. Серия 31. Земляные работы, основания и фундаменты, № 516/6.
4. Bile Serra, J.P., Hooker P., 2011. A New Computer Controlled Hollow Cylinder Torsional Shear Apparatus. GDS Instruments Ltd, United Kingdom, pp. 1–8.
5. Cai, Yanyan, 2010. An Experimental Study of Non-Coaxial Soil Behaviour Using Hollow Cylinder Testing. University of Nottingham.
6. Chaudhary, S.K., 2004. Measurement of Quasi-Elastic Stiffness Parameters of Dense Toyora Sand in Hollow Cylinder Apparatus and Triaxial Apparatus with Bender Elements. Geotechnical Testing Journal, Vol. 27, No. 1, pp. 23–35.
7. Christensen, R.J., Swanson, S.R., Brown, W.S., 1974. Torsional shear measurements of the frictional properties of Westerly granite. Proceedings of the 3rd Congress of the International Society for Rock Mechanics, Denver, CO, Vol. IIA, pp. 221–225.
8. GCTS official site, 2007. URL: [www.gcts.com](http://www.gcts.com). (Дата обращения 15 января 2018)
9. Handin, J., Heard, H.C., Magourik, J.N., 1967. Effects of the intermediate principal stress on the failure of limestone, dolomite, and glass at different temperatures and strain rates, Journal of Geophysical Research, Vol. 72, No. 2, pp. 611–640.
10. Hight, D.W., Gem, A., Symes, M.J., 1983. The development of investigating a new hollow cylinder the effects of principal rotation in soils. Geotechnique, Vol. 33, No. 4, pp. 355–383.
11. Iwasaki, T. Tatsouka, F., Takagi, Y., 1978. Shear moduli of sands under cyclic torsional shear loading. Soils Found, Vol. 18, No. 1, pp. 39–56.
12. Kumruzzaman, M., Yin, J.-H., 2010. Influence of principal stress direction on the stress-strain-strength behaviour of completely decomposed granite. Facta Universitatis. Series: Architecture and Civil Engineering, Vol. 8, No. 1, pp. 79–97.
13. Kutter, H.K., 1974. Rotary shear testing of rock joints. Proceedings of the 3rd Congress of the International Society for Rock Mechanics, Denver, CO, pp. 254–262.
14. Lee, D., Juang, C.H., Chen, J., Lin, H., Shieh, W., 1999. Stress paths and mechanical behavior of a sandstone in hollow cylinder tests. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 36, No. 7, pp. 857–870.
15. Lee, D., Lin, H., 2002. Technical Note: Yield surface of Mu-San sandstone by hollow cylindertests. Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 35, No. 3, pp. 205–216.

16. Mandeville, D., Penumadu, D., 2004. True triaxial testing system for clay with proportional-integral-differential (PID) control. *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 27, No. 2, pp. 1–11.
17. Mandolini, A., Diambra, A., Ibraim, E., 2016. Evolution of small strain stiffness of granular soils with a large number of small loading cycles in the 3D multiaxial stress space. *MetroGeotechnics 2016. Proceedings of a meeting held 17–18 March 2016, Benevento, Italy*, pp. 175–180
18. Menzies, B.K., 1984. Soil Testing Systems. *Geotechnical News*, Vol. 1, No. 3, pp. 38–39.
19. Menzies, B.K., 1988. Computer Controlled Hydraulic Triaxial System. *Proceedings, Advanced Triaxial Testing of Soil and Rock, ASTM STP 977*, pp. 82–94.
20. Nakamura, Y., Hashimoto, S., Kuwano, J., 1998. The Development of a Hollow Cylinder Apparatus for a Measurement in a Wide Strain Range. *Proceedings 33rd Japan National Conference on Geotechnical Engineering, Yamaguchi, JGS, Vol. 1*, pp. 519–520.
21. Novak, M.E., 2007. Creation of a laboratory testing device to evaluate instability rutting in asphalt pavements. PhD thesis, University of Florida.
22. Olsson, W.A., 1988. The effects of normal stress history on rock friction. *Proceedings, 29th U.S. Rock Mechanics Symposium, Minneapolis, MN*, pp. 111–117.
23. Roger, W.C., 2002. Interface Behavior of Water Saturated Limestone Rock Joints Using Hollow Cylinder Testing and A Case History Regarding Mine Roof Stability: Fort Hartford Mine Superfund Site. Master's Thesis, University of Tennessee.
24. Saada, A.S., 1988. State of the art: Hollow cylinder torsional devices: their advantages and limitations. *Advance triaxial testing of soil and rock. ASTM STP 977, Philadelphia*, pp. 766–795.
25. Santarelli, F.J., Brown, E.T., 1989. Failure of three sedimentary rocks in triaxial and hollow cylinder compression tests. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, Vol. 26, No. 5, pp. 401–413.
26. Sheahan, T.C., Germaine, J.T., Ladd, C.C., 1990. Automated Triaxial Testing of Soft Clays: an Upgraded Commercial System. *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 13, No. 3, pp. 153–163.
27. Tong, D., Mei, Z., 2016. Controlling and Realizing of Generalized Stress Paths in HCA Test. *EJGE*, Vol. 21, pp. 5269–5283.
28. Yasuda, S., Tsuruda, T., 2010. Cyclic Torsional Shear Tests to Obtain Dynamic Soil Properties for Seismic Design of Road Embankments. *Fifth International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, pp. 1–6.
29. Xu, S., de Freitas, M.H., 1988. Use of a rotary shear box for testing the shear strength of rock joints. *Geotechnique*, Vol. 38, No. 2, pp. 301–309.

### References

1. Boldyrev, G.G., 2014. Soils mechanical properties obtaining methods wit comments on GOST 12248-2010. LLC “Prondo”, Moscow. (in Russian).
2. Boldyrev, G.G., Idrisov, I.H., 2017. State of the art: studies of the anisotropic behavior of soils under conditions of a complex stress state. Part 1. Effect of the principal stress direction on the soils strength. *Geotechnics*, No. 5, pp. 4–19. (in Russian).
3. Malyshev, M.V., 1955. Torsional machine for obtaining soils mechanical properties of strength and deformability. Academy of Sciences of USSR, Institute of technical and economic information. Series 31. Earthwork, bases and foundations, No. 516/6. (in Russian).
4. Bile Serra, J.P., Hooker P., 2011. A New Computer Controlled Hollow Cylinder Torsional Shear Apparatus. GDS Instruments Ltd, United Kingdom, pp. 1–8.
5. Cai, Yanyan, 2010. An Experimental Study of Non-Coaxial Soil Behaviour Using Hollow Cylinder Testing. University of Nottingham.
6. Chaudhary, S.K., 2004. Measurement of Quasi-Elastic Stiffnes Parameters of Dense Toyora Sand in Hollow Cylinder Apparatus and Triaxial Apparatus with Bender Elements. *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 27, No. 1, pp. 23–35.
7. Christensen, R.J., Swanson, S.R., Brown, W.S., 1974. Torsional shear measurements of the frictional properties of Westerly granite. *Proceedings of the 3rd Congress of the International Society for Rock Mechanics, Denver, CO, Vol. IIA*, pp. 221–225.
8. GCTS official site, 2007. URL: [www.gcts.com](http://www.gcts.com). (Accessed 15 January 2018)
9. Handin, J., Heard, H.C., Magourik, J.N., 1967. Effects of the intermediate principal stress on the failure of limestone, dolomite, and glass at different temperatures and strain rates, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 72, No. 2, pp. 611–640.
10. Hight, D.W., Gem, A., Symes, M.J., 1983. The development of investigating a new hollow cylinder the effects of principal rotation in soils. *Geotechnique*, Vol. 33, No. 4, pp. 355–383.
11. Iwasaki, T. Tatsouka, F., Takagi, Y., 1978. Shear moduli of sands under cyclic torsional shear loading. *Soils Found*, Vol. 18, No. 1, pp. 39–56.
12. Kumruzzaman, M., Yin, J.-H., 2010. Influence of principal stress direction on the stress-strain-strength behaviour of completely decomposed granite. *Facta Universitatis. Series: Architecture and Civil Engineering*, Vol. 8, No. 1, pp. 79–97.
13. Kutter, H.K., 1974. Rotary shear testing of rock joints. *Proceedings of the 3rd Congress of the International Society for Rock Mechanics, Denver, CO*, pp. 254–262.
14. Lee, D., Juang, C.H., Chen, J., Lin, H., Shieh, W., 1999. Stress paths and mechanical behavior of a sandstone in hollow cylinder tests. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 36, No. 7, pp. 857–870.
15. Lee, D., Lin, H., 2002. Technical Note: Yield surface of Mu-San sandstone by hollow cylindertests. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 35, No. 3, pp. 205–216.
16. Mandeville, D., Penumadu, D., 2004. True triaxial testing system for clay with proportional-integral-differential (PID) control. *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 27, No. 2, pp. 1–11.

17. Mandolini, A., Diambra, A., Ibraim, E., 2016. Evolution of small strain stiffness of granular soils with a large number of small loading cycles in the 3D multiaxial stress space. *MetroGeotechnics 2016. Proceedings of a meeting held 17–18 March 2016, Benevento, Italy*, pp. 175–180
18. Menzies, B.K., 1984. Soil Testing Systems. *Geotechnical News*, Vol. 1, No. 3, pp. 38–39.
19. Menzies, B.K., 1988. Computer Controlled Hydraulic Triaxial System. *Proceedings, Advanced Triaxial Testing of Soil and Rock, ASTM STP 977*, pp. 82–94.
20. Nakamura, Y., Hashimoto, S., Kuwano, J., 1998. The Development of a Hollow Cylinder Apparatus for a Measurement in a Wide Strain Range. *Proceedings 33rd Japan National Conference on Geotechnical Engineering, Yamaguchi, JGS, Vol. 1*, pp. 519–520.
21. Novak, M.E., 2007. Creation of a laboratory testing device to evaluate instability rutting in asphalt pavements. PhD thesis, University of Florida.
22. Olsson, W.A., 1988. The effects of normal stress history on rock friction. *Proceedings, 29th U.S. Rock Mechanics Symposium, Minneapolis, MN*, pp. 111–117.
23. Roger, W.C., 2002. Interface Behavior of Water Saturated Limestone Rock Joints Using Hollow Cylinder Testing and A Case History Regarding Mine Roof Stability: Fort Hartford Mine Superfund Site. Master's Thesis, University of Tennessee.
24. Saada, A.S., 1988. State of the art: Hollow cylinder torsional devices: their advantages and limitations. *Advance triaxial testing of soil and rock. ASTM STP 977, Philadelphia*, pp. 766–795.
25. Santarelli, F.J., Brown, E.T., 1989. Failure of three sedimentary rocks in triaxial and hollow cylinder compression tests. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, Vol. 26, No. 5, pp. 401–413.
26. Sheahan, T.C., Germaine, J.T., Ladd, C.C., 1990. Automated Triaxial Testing of Soft Clays: an Upgraded Commercial System. *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 13, No. 3, pp. 153–163.
27. Tong, D., Mei, Z., 2016. Controlling and Realizing of Generalized Stress Paths in HCA Test. *EJGE*, Vol. 21, pp. 5269–5283.
28. Yasuda, S., Tsuruda, T., 2010. Cyclic Torsional Shear Tests to Obtain Dynamic Soil Properties for Seismic Design of Road Embankments. *Fifth International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, pp. 1–6.
29. Xu, S., de Freitas, M.H., 1988. Use of a rotary shear box for testing the shear strength of rock joints. *Geotechnique*, Vol. 38, No. 2, pp. 301–309.

### Captions to figures

Fig. 1. A sample of material in the form of a hollow cylinder and stress components on a medium element

Fig. 2. Scheme of a system for testing hollow soil samples [6]:

1 — 16 bit ADC; 2 — computer; 3 — 16 bit DAC; 4, 6, 7 — pressure sensor; 5 — servo controller

Fig. 3. Loading system and triaxial chamber (GCTC 2007) [8]

Fig. 4. The composition of the measuring system (Kumruzzaman & Yin 2010) [12]

Fig. 5. General view of the device [5]

Fig. 6. Hydraulic loading control device [18]: a — GDS ([www.gdsinstruments.com](http://www.gdsinstruments.com)): b — Geotech NPP ([www.npp-geotek.ru](http://www.npp-geotek.ru))

Fig. 7. Functions of cyclic loading ( $p_0 = p_1$ ) [27]

Fig. 8. Schematic view of a system for measuring small deformation around a hollow sample (Mandolini et al., 2016) [17]

Fig. 9. Stress path in the plane of the normalized stress deviator (Mandolini et al., 2016) [17]

Fig. 10. The control of the deviator stress in the test program (Mandolini et al., 2016) [17]

Fig. 11. The procedure of cyclic and monotonic loading [26]

Fig. 12. Typical test results for cyclic loading of fully water-saturated clay [28]

### Caption to table

Table. Manufacturers of equipment

### Информация об авторах

**БОЛДЫРЕВ Г.Г.**

Директор по научной работе и инновациям

ООО «НПП «Геотек»», д.т.н., профессор, г. Пенза, Россия

**ИДРИСОВ И.Х.**

Генеральный директор ООО «НПП «Геотек»», к.т.н.,

г. Пенза, Россия

### Information about the authors

**BOLDYREV G.G.**

Director for research and innovation of the «NPP «Geotek»» Ltd, DSc (Doctor of Science in Technics), professor, Penza, Russia

**IDRISOV I.H.**

General director of the «NPP «Geotek»» Ltd, PhD (Candidate of Science in Technics), Penza, Russia