

## **ЛАБОРАТОРНЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРУНТОВ**

### **Общие положения**

Испытания грунтов в лабораторных условиях проводятся с целью определения их физических и механических характеристик. Методика проведения большинства подобных испытаний регламентирована ГОСТ 121248-96 «Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости». В некоторых случаях, для определенного класса моделей грунтов, в действующих ГОСТ отсутствуют рекомендации по определению параметров (механических характеристик) этих моделей. В частности, ГОСТ 12248-96, который объединил в себе ранее действующие ГОСТ, приведена методика определения параметров прочности только для условия прочности Мора-Кулона и параметров деформируемости для расчета линейно-упругого поведения грунта при нагружении без рекомендаций по определению модуля деформации при разгрузке или циклическом ее действии.

В табл. 1, 2 приведены прочностные и деформационные характеристики грунтов, рекомендуемые к определению ГОСТ 12248-96 для немерзлых и мерзлых грунтов. Для каждого метода испытаний необходимы соответствующие приборы, конструкция которых и схематично показана в табл. 3, а реализуемые условия нагружения образцов грунта в табл. 4.

Для определения всех характеристик согласно ГОСТ необходимо использовать несколько приборов: одноосного сжатия, одноплоскостного среза, компрессионного сжатия и трехосного осесимметричного сжатия (стабилометр). Однако, все эти характеристики могут быть получены при проведении испытаний в стабилометре как для немерзлых, так и мерзлых грунтов.

Табл. 1. Механические характеристики песчаных и пылевато-глинистых грунтов

Наименование определяемых характеристик														
Метод испытания	предел прочности на одноосное сжатие, $R$ , кПа	сопротивление на сдвигу, $c_u$ , кПа	угол внутреннего трения, $\varphi$ , град.	удельное сцепление, $c$ , кПа	коэф. Пуассона, $\nu$	коэф. магии, $E$ , МПа	модуль деформации, $G$ , МПа	модуль объемной деформации, $K$ , МПа	структурная прочность, $p_{emp}$	коэф. фильтрационной способности, $c_\alpha$	коэф. вторичной консолидации, $c_v$	относит. суффозионное сжатие, $p_{sf}$	нач. давл. набухания, $p_n$	давление свободна-бахание, $\delta_o$
Одноосное сжатие	+	+												
Одноплоскостной срез			+	+										
Трехосное сжатие			+	+	+	+	+	+						
Компрессионное сжатие						+			+	+	+	+	+	+

Табл. 2. Механические характеристики мерзлых грунтов

Наименование определяемых характеристик

Метод испытания	пределы прочности на одноосное сжатие, тие,	эквивалентное сцепление $c_{eq}$ , кПа	сопротивление срезу $R_{af}, R_{sh}, R_{sh,i}$	коэф. нелин. деформации, А	коэф. Пуассона, $\nu$	модуль деформации, Мпа	коэф. вязкости, $\eta$	коэф. сжимаемости, $m_f$	коэф. оттаивания, $A_{th}$
Одноосное сжатие	+			+	+	+	+		
Одноплоскостной срез			+						
Компрессионное сжатие Шариковый штамп		+						+	+

## 2. Условия нагружения образцов грунта

Характер деформации образцов грунта зависит как от конструкции приборов, так и от условий их нагружения. Из рис. 1 а видно существенное различие наблюдаемое при нагружении образцов грунта в зависимости от вида напряженного состояния. Первая кривая, соответствует случаю одномерной деформации имеющей место в основании протяженных в плане сооружений плотин, насыпей, дамб и т.п. Подобный характер деформации можно реализовать в условиях компрессионного сжатия, схема нагружения в котором показана на рис. 1 б.

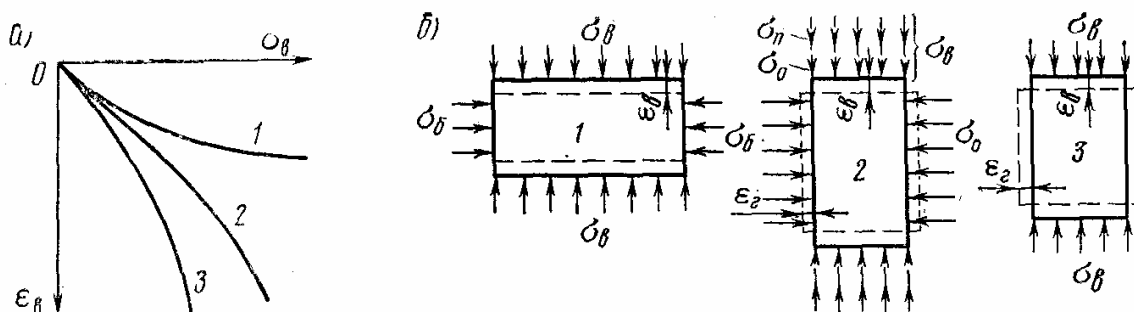


Рис. 1. Кривые зависимости «деформация-напряжение» для трех видов испытаний (а) и схемы загрузки (б)

1 – компрессия; 2 – трехосное сжатие; 3 – одноосное сжатие

Зависимость 2 на рис. 1 а и схема нагружения на рис. 1 в, соответствуют случаю осесимметричной деформации, которая имеет место в основании круглых или кольцевых в плане фундаментов сооружений подобных градирням, дымовым трубам, водонапорным башням и т.п.

Последний третий случай соответствует условиям одноосного нагружения (рис. 1 г). Напряженное состояние возникающее в образце грунта не имеет места в основании реальных фундаментов, а результаты испытаний используются при определении прочности строительных материалов.

На рис. 2 а показан кубический элемент среды и компоненты напряжений

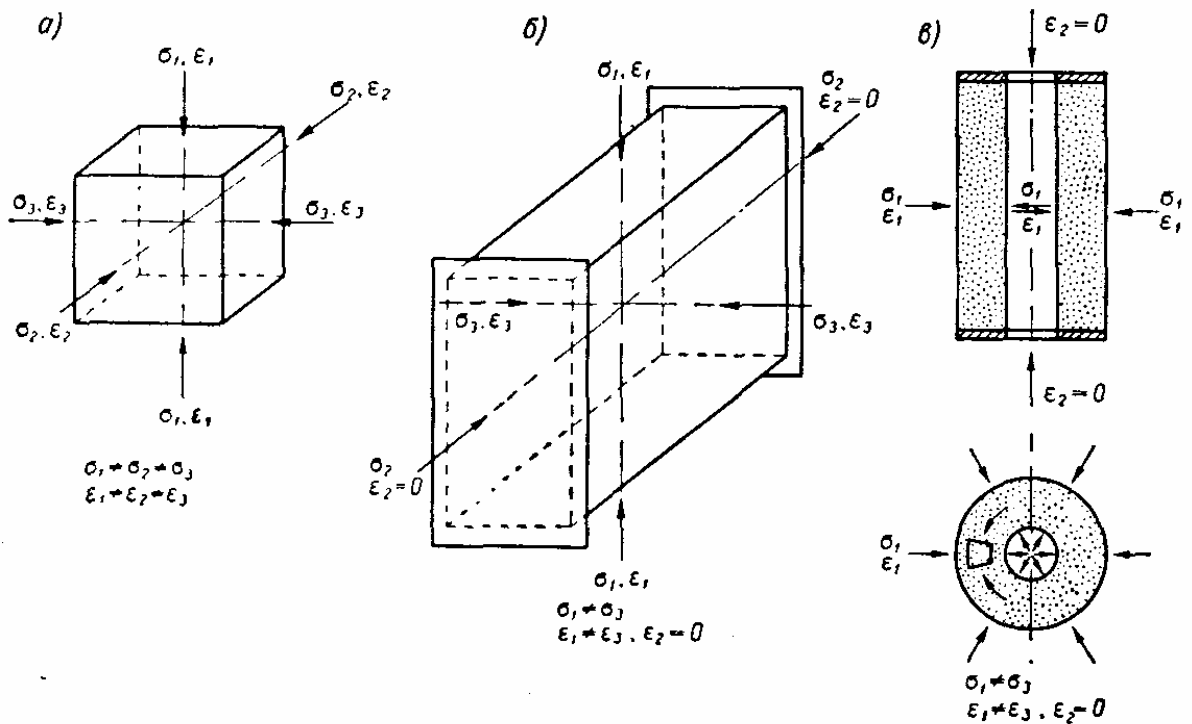


Рис. 2. Схемы нагружения образцов грунта

а – истинное трехосное сжатие; б – плоская деформация; б – трехосное сжатие

действующие на его сторонах, так как это принято в механике сплошной среды. Под действием этих шести независимых компонент напряжений элемент деформируется различным образом. Подобным образом мы и должны нагружать образцы грунта при исследовании их напряженно-деформированного состояния. В действительности, конструктивно реализовать нагружение образца, как нормальными, так и касательными напряжениями одновременно, независимо на каждой стороне кубического элемента достаточно сложно. Подобные условия нагружения в условиях плоской деформации были реализованы при исследовании песчаных грунтов Arthur J. et all (1981) и Wong R. et all (1985) (рис. 3).

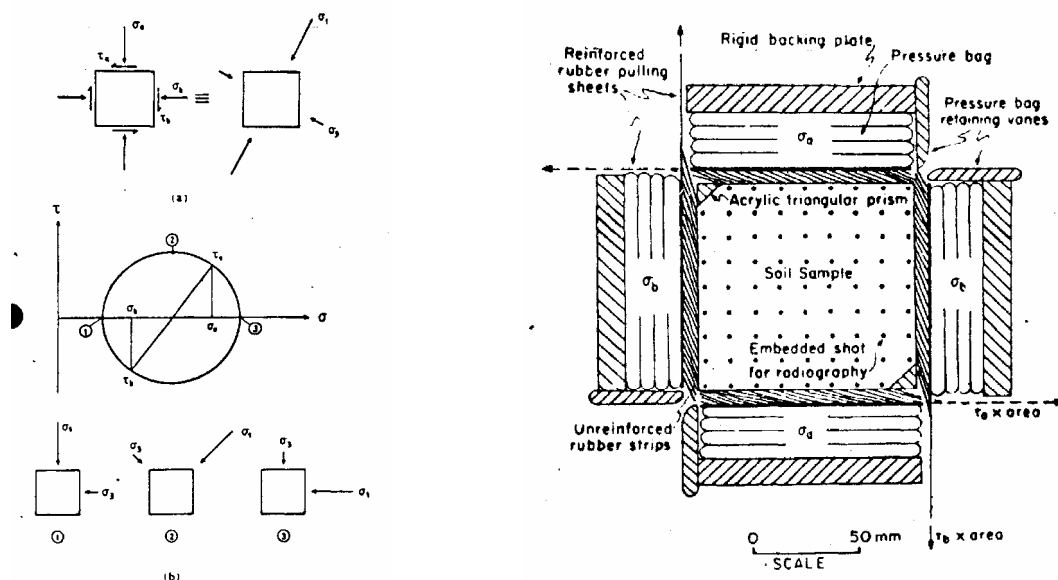


Рис. 3. Нагружение с вращением главных напряжений (Wong R., 1985)  
 а – круги Мора для трех случаев напряженного состояния; б – условия нагружения на сторонах образца грунта

Нормальная нагрузка прикладывалась с использованием четырех гибких оболочек заполненных жидкостью, а касательная нагрузка создавалась при помощи резиновых полос (удлинение до 300%) выдерживаемых с поверхности контакта между грунтом и гибкой оболочки. Для усиления эффекта сцепления резиновых полос с нагружаемым грунтом к ним были приклеены частички песка. Оставшиеся две стороны кубического образца размером 100x100x100 мм были выполнены из стекла с целью наблюдения за деформациями в процессе нагружения.

Подобные приборы позволяют исследовать деформируемое поведение грунтов с вращением главных напряжений. Несмотря на влияние несоосности между осями деформации и напряжений на характер исследуемого напряженно-деформированного состояния в большинстве случаев принимается, что при нагружении образцов грунта направления осей напряжений и деформации совпадают.

Этот подход значительно упрощает конструкцию приборов для испытания грунтов, так как отпадает необходимость в нагружении касательными напряжениями. Полагается, что на трех взаимно перпендикулярных парах

сторон кубического образца грунта действуют только нормальные напряжения. Эти напряжения создаются с использованием жестких штампов или гибких оболочек заполненных водой или глицерином.

Приборы данного вида называются приборами истинного трехосного сжатия, так как в них возможно нагружение общего случая, когда  $\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$ . Конструкция данного типа приборов была разработана в Московском инженерно-строительном институте (ныне МГСУ) Крыжановским А.Л. в 1968 г. В данной конструкции нагрузка на кубический образец прикладывалась через гибкие штампы (рис. 4, 7 а).

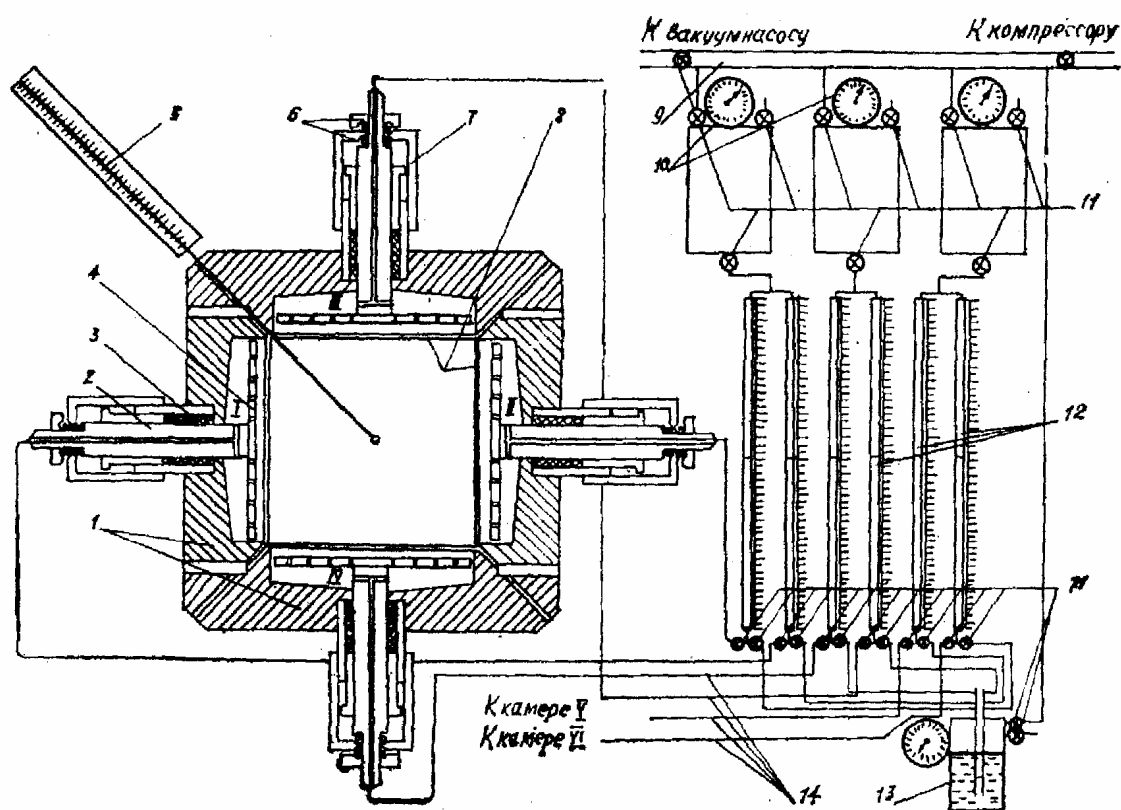


Рис .4. Прибор истинного трехосного сжатия

1 – плиты корпуса; 2 – перемещаемый шток; 3 – сальник; 4 – перфорированный штамп; 5 – датчик для измерения порового давления; 6 – подшипник; 7 – гайка для принудительного перемещения штока; 8 – гибкие резиновые мембраны; 9 – коллектор сжатого воздуха; 10 – манометры; 11 – краны; 12 – трубки волюмометров; 13 – бак с резервной жидкостью; 14 – трубки высокого давления

Общий вид стенда для подобных исследований показан на рис. 5.

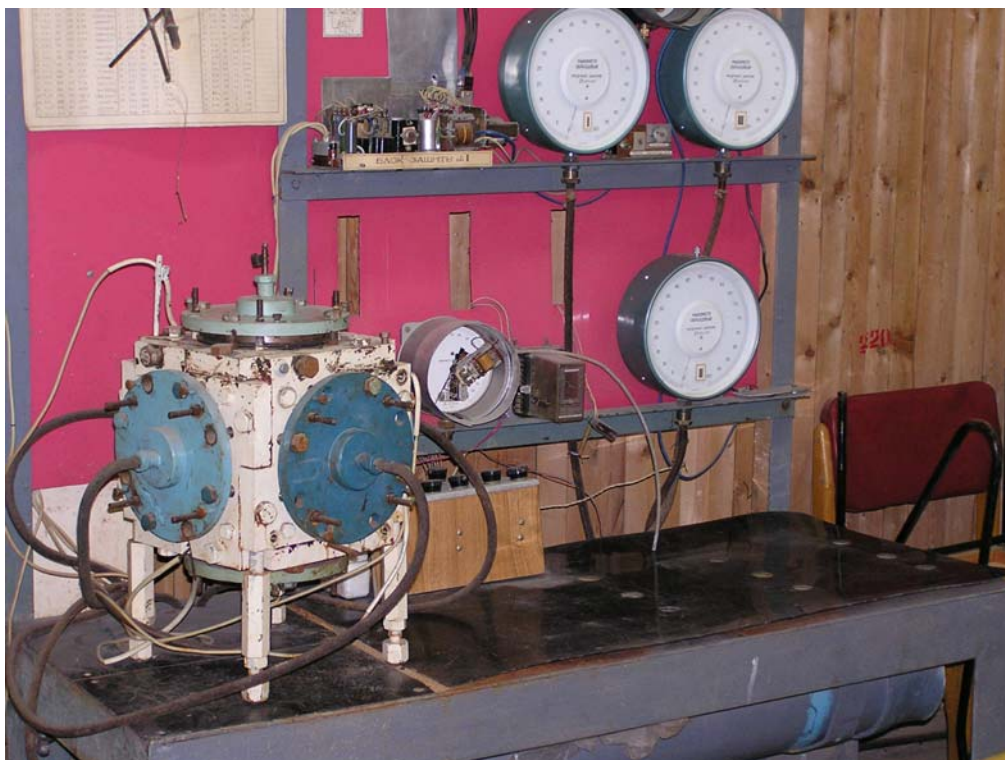


Рис. 5. Общий вид конструкции стенда истинного трехосного сжатия

К недостатку данной конструкции следует отнести наличие мертвых, т.е. недеформируемых зон в углах образца грунта. С целью устранения данного недостатка Hambly E.C. (1969) предложил конструкции прибора истинного трехосного сжатия с жесткими взаимно смещаемыми нагрузочными штампами (рис. 6,7).

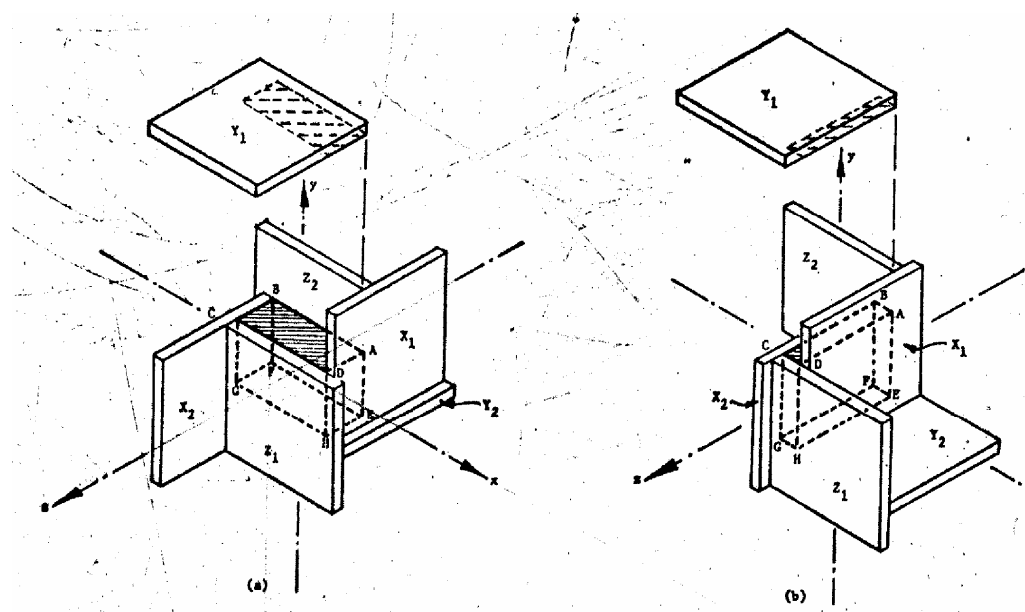


Рис. 6. Прибор истинного трехосного сжатия конструкции Hambly E.



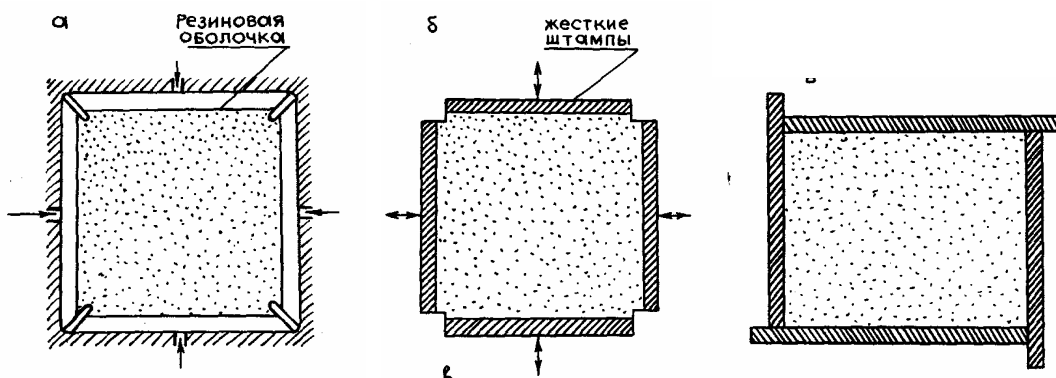


Рис. 7. Способ приложения нагрузки на гранях кубического образца грунта

В отличие от конструкции А.Л.Крыжановского этот прибор позволяет производить испытания при больших деформациях. Это важно при испытании мягкопластичных и текучих глинистых грунтов. Если для твердой глины и плотных песков величина деформации, как правило, не превышает 5%, то для мягких глинистых грунтов деформация при достижении предельного состояния может превышать 50%. Существенным недостатком жестких нагрузочных штампов (рис. 7 б, в) является их шероховатость, что приводит к возникновению деформаций сдвига на их контакте с грунтом. Трение снимается полировкой нагрузочных штампов с введением силиконовой или тефлоновой смазки.

Использование жестких штампов позволяет легко измерять нормальную деформацию и деформацию сдвига по перемещениям штампов. При этом вследствие плоскопараллельного перемещения штампов выполняется соосность между деформациями и напряжениями. В случае гибких штампов прямое измерение деформаций выполнить сложно и они измеряются по перемещению уровня жидкости в трубках волюмометра. Неравномерность прогиба резиновых мембран штампов вызывает неоднородность деформации внутри образца грунта

#### 4. Классификация типов испытаний

В общем случае хотелось бы иметь устройство для испытания грунтов, которое реализовывало бы общий случай нагружения в пространстве главных напряжений с вращением главных осей. Однако этого сделать пока не удалось, поэтому используются различные типы приборов, в которых образцы грунта нагружаются соответствующим образом и вращение главных осей напряжений отсутствует. В испытаниях полых цилиндрических образцов на кручение удается реализовать нагружение с вращением главных осей напряжений или деформаций.

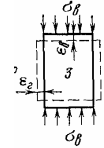
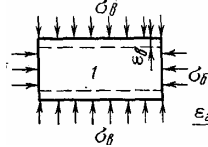
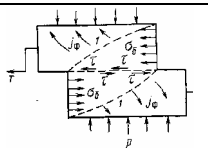
В табл. 1 приведены наиболее часто применяемые условия нагружения образцов грунта, реализуемые в приборах различной конструкции. Образцы грунта могут иметь форму: куба, параллелепипеда, сплошного цилиндра, полого цилиндра, сплошной или полый катушки.

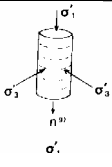
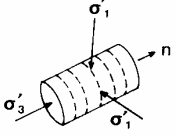
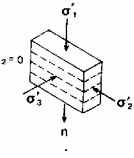
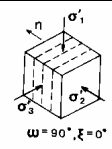
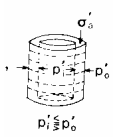
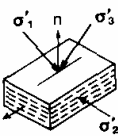
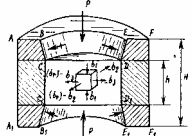
Для случая истинного трехосного сжатия:  $\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3 \neq 0, \varepsilon_1 \neq \varepsilon_2 \neq \varepsilon_3 \neq 0$ .

Для случая плоской деформации:  $\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3 \neq 0, \varepsilon_1 \neq \varepsilon_3 \neq 0, \varepsilon_2 = 0$ .

Для случая осесимметричной деформации:  $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3, \varepsilon_1 > \varepsilon_2 = \varepsilon_3$ .

Табл. 1. Классификация методов испытаний

Наименование	Схема нагружения	$b = \frac{\sigma_2' - \sigma_3'}{\sigma_1' - \sigma_3'}$	Определяемые параметры	Методы
Одноосное сжатие			$R, E, \nu, c_u$	ГОСТ 12248-96
Компрессионное сжатие			$E, c_v, c_\alpha, P_{str}, \varepsilon_{sf}, P_{sf}, \varepsilon_{sl}, P_{sl}, \varepsilon_{sw}, P_{sw}$	ГОСТ 12248-96 ГОСТ 20276-85 ГОСТ 24143-80
Прямой срез			$\varphi, c, c_u$	ГОСТ 12248-96

Трехосное сжатие $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$		-1	$E, E_o, G, K, \nu,$ $\xi, \varphi, \psi, c, c_u$	
Трехосное расширение $\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$		+1	$E, E_o, G, K, \nu,$ $\xi, \varphi, \psi, c, c_u$	
Плоская деформация $\sigma_1 > \sigma_2, \sigma_3$ $\varepsilon_1 > \varepsilon_2, \varepsilon_3 = 0$			$E, E_o, G, K, \nu,$ $\xi, \varphi, \psi, c, c_u$	
Истинное трехосное сжатие $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$		0 – 1	$E, E_o, G, K, \nu,$ $\xi, \varphi, \psi, c, c_u$	
Истинное трехосное сжатие $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$			$E, E_o, G, K, \nu,$ $\xi, \varphi, \psi, c, c_u$	
Чистый сдвиг $\sigma_1 = \sigma_3, \sigma_2 = 0$		0	$\varphi, c, c_u$	
Растяжение $\sigma_3 = \sigma_2 > \sigma_1$			$R_t$	Воробьев Е.А. АС №966149

Случай осесимметричной деформации является частным случаем трехосного сжатия. В механике грунтов принято испытания в условиях общего случая независимого действия главных напряжений  $\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3 \neq 0$  и осесимметричной деформации при  $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3, \varepsilon_1 > \varepsilon_2 = \varepsilon_3$  называть одним и тем же термином «испытания в условиях трехосного сжатия». В ГОСТ 12248-96 приведен метод испытания грунтов в условиях трехосного сжатия, когда цилиндрические образцы грунта подвергаются нагружению в

условиях осесимметричной деформации. Поэтому с целью различия в дальнейшем будем называть прибор трехосного сжатия с реализацией условий осесимметричной деформации – стабилометром, а прибор с кубическим образцом грунта и независимым действием главных напряжений – прибором истинного трехосного сжатия.

В отдельную группу можно выделить приборы для испытания образцов грунта прямым образом прикладывая срезающие усилия (табл. 2). Нагрузочные штампы выполняются, как правило, жесткими и шероховатыми и могут вращаться. Отсюда направления между главными напряжениями и деформациями могут не совпадать.

Табл. 2. Испытания на срез

Наименование	Схема нагружения	Штампы
Прямой срез		Жесткие, не вращаются
Чистый сдвиг		Жесткие, вращаются
Срез с кручением		Жесткие, не вращаются

Наиболее часто на практике используются стабилометр, одометр и прибор прямого среза. Прибор истинного трехосного сжатия, прибор плоской деформации, чистого сдвига, кручения применяются обычно в исследовательских лабораториях. Однако, как будет показано далее, для

определения параметров некоторых моделей грунта стандартных приборов недостаточно.

### 5. Испытания в стабилометре

Испытания грунтов в стабилометре подробно описаны в монографиях Сидорова Н.Н., Сипидина В.П. /10/, Бугрова А.К и др. /11/, С.Р.Месчаня /12/, Бишоп и Хенкеля /13/.

Конструкция стандартного стабилометра показана на рис. 8 а и б. В зависимости от способа создания среднего напряжения в образце грунта они подразделяются на тип А и тип Б. В приборе типа А образец грунта со всех сторон подвержен действию давления и испытывает случай гидростатического сжатия, в приборе типа Б, напряжения на боковой поверхности и торцах образца создаются отдельно.

Стабилометр типа А, рекомендуется использовать для определения характеристик прочности грунта, а стабилометр типа Б как для прочностных, так и деформационных характеристик грунтов. В ГОСТ 12248-96 приведена методика, которая позволяет применять стабилометр типа А для определения прочностных и деформационных характеристик грунтов.

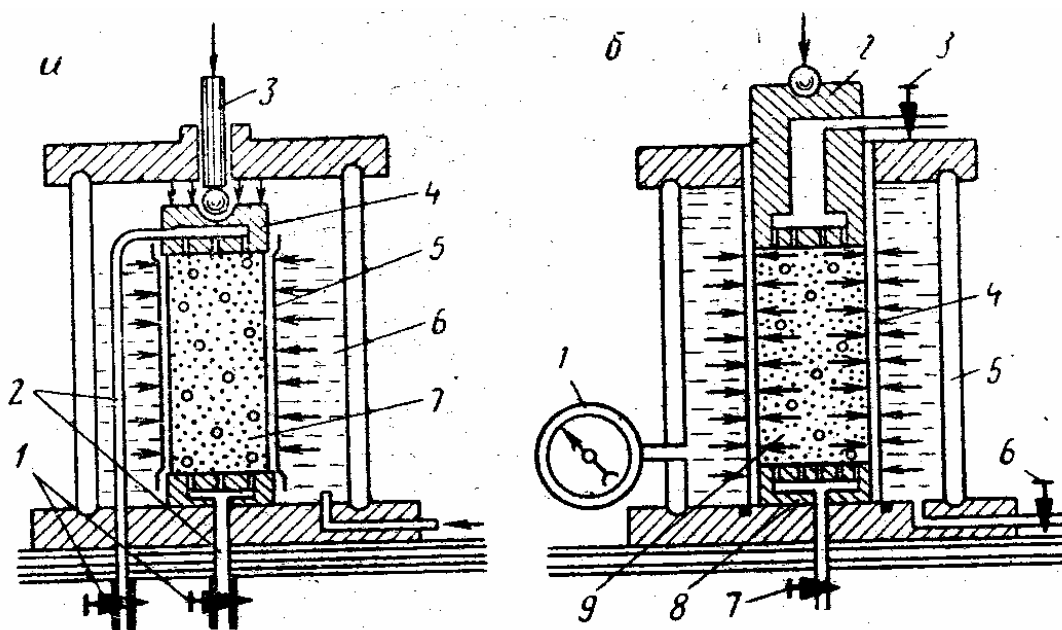


Рис. 8. Схемы стабилометров типа А (а) и типа Б (б)

Испытания проводят с цилиндрическими образцами грунта высотой равной двум диаметрам. Обычно диаметр образцов принимается равным 38 мм, 50 мм или 100 мм. Чем больше диаметр, тем большая физическая неоднородность (включения) сложения образцов грунта допускается при испытаниях.

Предполагается, что нагрузочный штамп и основание являются гладкими, а нагрузочный штамп перемещается плоскопараллельно без вращения в процессе деформирования образца грунта. Последнее допущение не выполняется в стабилометрах типа А, так при нагрузке близкой к предельной по прочности наблюдается поворот нагрузочного штампа, что при дальнейшем деформировании приводит к несоосности между главными напряжениями и деформациями.

При определении вертикальных напряжений учитывается изменение площади сечения образца при относительной деформации  $\varepsilon_1 > 0,03$ , предполагая, что форма образца не изменяется, т.е. он остается цилиндром и ее изменение находят из выражения:

- для недренированного испытания

$$A_i = \frac{A}{1 - \varepsilon_1}; \quad (2)$$

- для дренированного испытания

$$A_i = A \frac{1 - \varepsilon_v}{1 - \varepsilon_1}. \quad (3)$$

Осевая нагрузка в стабилометре создается двумя способами. В первом случае нагрузка прикладывается ступенями (статическое нагружение), а во втором случае непрерывно (кинематическое нагружение) с заданной скоростью деформации  $\varepsilon_1$  в мм/мин. Обычно скорость деформации изменяется от 0,01 до 10 мм/мин. Статическая нагрузка создается давлением

воздуха или жидкости, а кинематическая нагрузка с использованием шагового двигателя и червячного редуктора (сервопривод).

Основной проблемой испытаний образцов грунта является возникающая неоднородность деформаций в образце обусловленная не уровнем напряжений, а наличием сил трения между нагрузочными штампами и торцами образцов грунта. На рис. 9 а показана желательная форма разрушения (деформации) образца, а на рис. 12 б, в наблюдаемая в опытах.

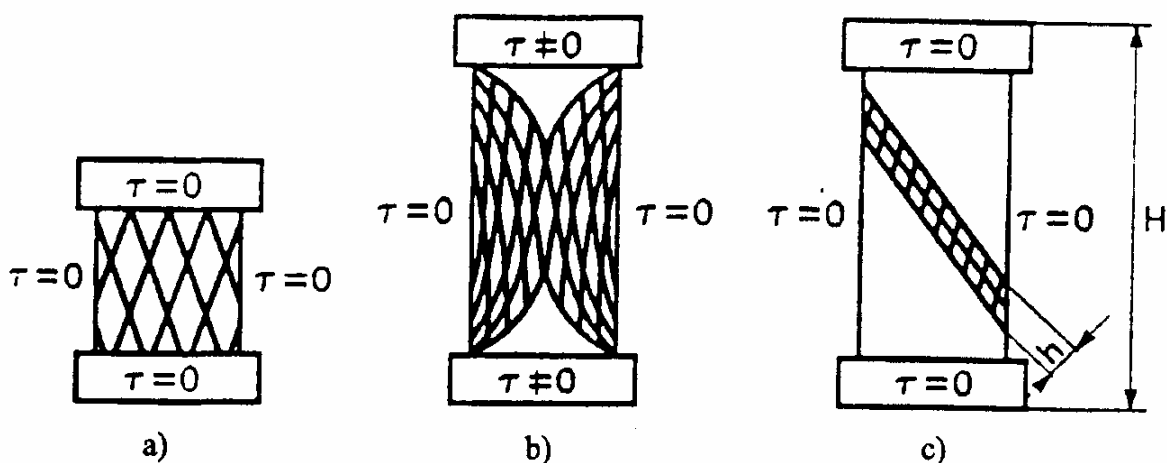


Рис. 9. Форма (мода) разрушения образцов грунта в стабилометре: а – однородная деформация; б – неоднородная деформация, результат влияния трения на штампах; в – локализация деформаций

## 6. Испытания с полыми образцами грунта

Kirpatrick W. в 1957 предложил проводить испытания грунтов в виде полого цилиндра (рис. 10). В отличие от стабилометра этот способ позволяет провести испытания при различной комбинации между напряжениями действующими на торце, внутренней и внешней боковой поверхности полого цилиндрического образца грунта. Позднее З.Г.Тер-Мартirosян предложил подобный метод испытаний, но с большей разновидностью условий нагружения.

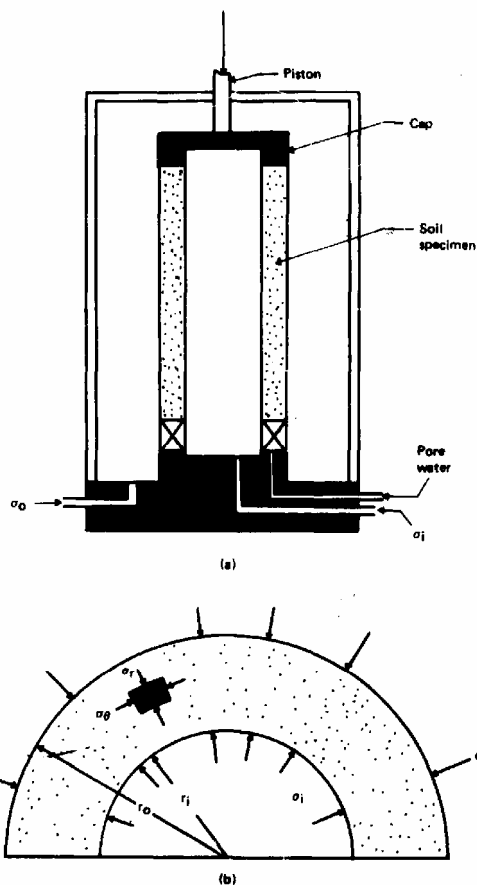


Рис. 10. Схема испытаний с полыми образцами

В отличие от стабилометра, в данной конструкции прибора боковое давление на образец может создаваться различным на внутренней и внешней сторонах образца грунта. Осевая нагрузка может прикладываться через шток на штамп или, при фиксированном положении штампа, быть функцией давления на внутренней и внешней поверхности цилиндрического образца грунта.

Соотношение для главных напряжений в образце грунта может быть получено из следующего осесимметричного уравнения равновесия [1]:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0, \quad (4)$$

где  $\sigma_r$  - радиальное напряжение;  $\sigma_\theta$  - тангенциальное напряжение,  $r$  - расстояние (радиус) от центра до рассматриваемой точки.



В связи с тем, что деформация и распределение напряжений являются симметричными, так как сечение по любому радиусу можно рассматривать как плоскость симметрии, и поэтому в этих сечениях не могут возникать касательные напряжения т.е.  $\tau_{r\theta} = 0$  и отсюда  $\sigma_r$  и  $\sigma_\theta$  являются напряжениями главными.

На внешней поверхности образца  $\sigma_r = \sigma_o$ , на внутренней поверхности  $\sigma_r = \sigma_i$ . Между осевым и радиальным напряжениями существует зависимость

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_o [(r_o / r_i)^2 - (\sigma_i / \sigma_o)]}{(r_o / r_i)^2 - 1}. \quad (5)$$

В данном типе испытаний, когда внутреннее давление  $\sigma_i$  возрастает, а внешнее давление  $\sigma_o$  остается постоянным, наибольшим и наименьшим главными напряжениями являются  $\sigma_r$  и  $\sigma_\theta$ , а промежуточным  $\sigma_1$ .

### 7. Испытания с вращением главных напряжений

Испытания выполненные рядом авторов Oda (1972), Arthur and Menzies (1972), Nakata (1998) и др. с песчаным грунтом показали, что этому виду грунтов присуща естественная анизотропия и поэтому деформации сдвига и

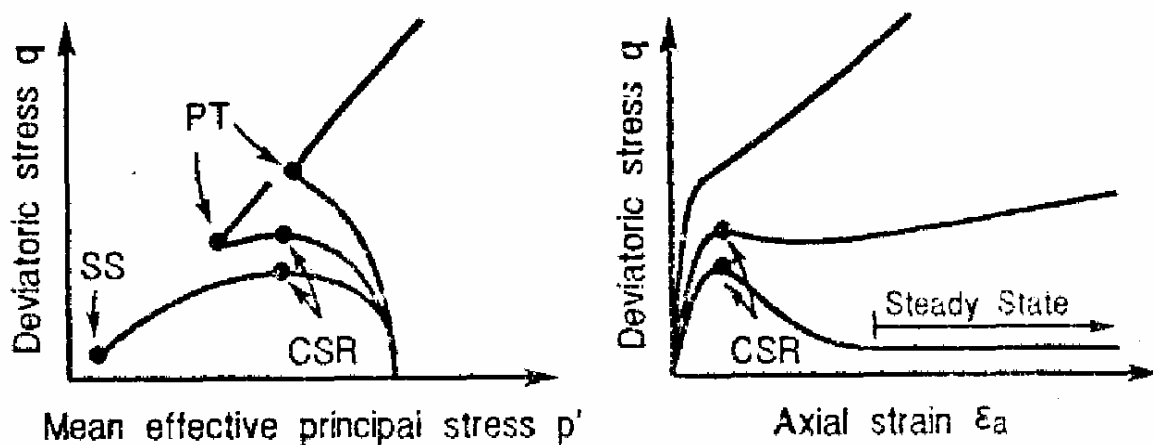


Рис. 11. Поведение песка при недренажном сдвиге: CSR - начало разупрочнения; PT - начало упрочнения; SS – остаточная прочность

прочностные характеристики песка зависят от направления главных напряжений. Испытание песчаных грунтов в условиях недренированного сдвига с контролем деформации (непрерывное нагружение) показывают на возникновение эффекта разупрочнения (рис. 11).

Испытания с вращением главных напряжений можно выполнить используя приборы, в которых одновременно с нормальной нагрузкой на торце полого цилиндрического образца создается кручение. На рис. 12 показана конструкция подобного прибора (Nakata, 1998). Образец грунта в виде цилиндра имеет высоту 200 мм, внешний диаметр 100 мм и внутренний диаметр 60 мм. В опытах изменяются крутящий момент  $T$ , осевая нагрузка  $W$ , внутреннее давление  $p_i$ , внешнее давление  $p$  и обратное давление внутри образца  $p_r$ . Эти величины контролируются и записываются компьютером. Направление и скорость приложения крутящего момента (касательной нагрузки) определяются шаговым двигателем, в то время как осевая нагрузка,

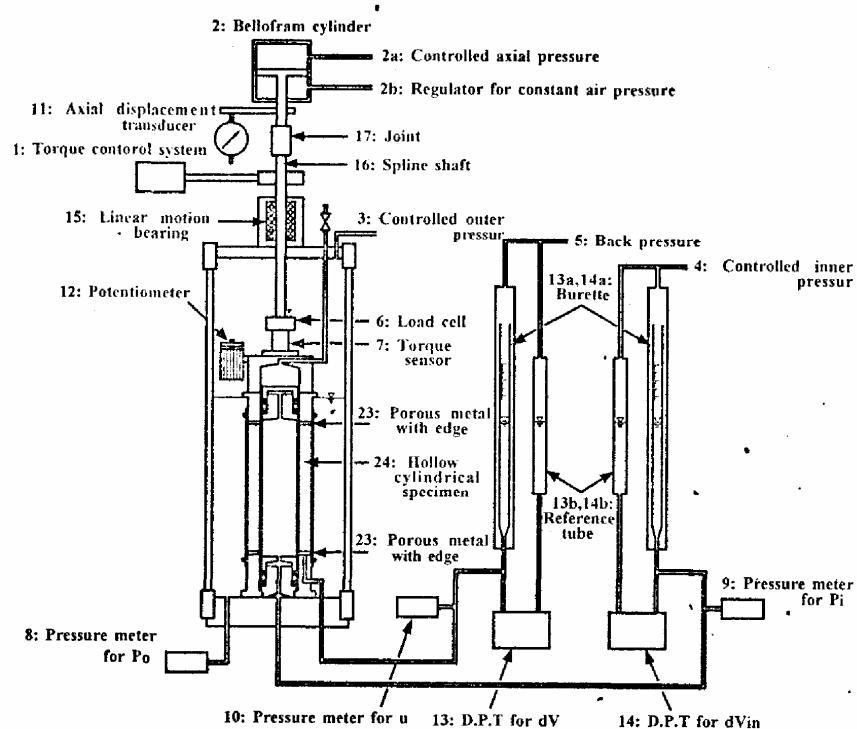


Рис. 12. Стенд для испытания полых образцов грунта с кручением /14/

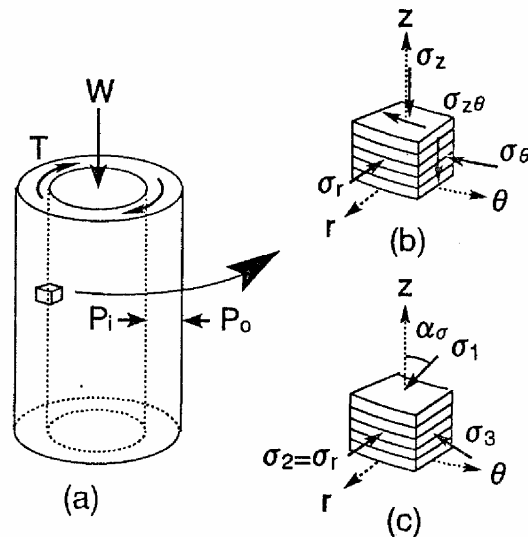


Рис. 13. Схема нагружения образца и компоненты напряжений /14/

внешнее и внутреннее давление управляются с использованием электропневматических преобразователей с разрешением 1 кПа. Девять параметров: крутящий момент  $T$ , осевая нагрузка  $W$ , внутреннее давление  $p_i$ , внешнее давление  $p$ , поровое давление  $u$ , осевая деформация  $\varepsilon_1$ , тангенциальная деформация  $\varepsilon_\theta$ , изменение объема образца  $dV$ , изменение объема полости  $dV_{in}$  независимо управляются компьютером с использованием аналого-цифрового преобразователя.

Табл. 3. Уравнения для вычисления напряжений и деформаций

Направление	Напряжения	Деформация
Вертикальное	$\sigma_z = \frac{W}{\pi(r_o^2 - r_i^2)} + \frac{p_o(r_o^2 - d_r^2) - p_i r_i^2}{r_o^2 - r_i^2}$	$\varepsilon_z = \frac{z}{h}$
Радиальное	$\sigma_r = \frac{p_o r_o + p_i r_i}{r_o + r_i}$	$\varepsilon_r = -\frac{u_o - u_i}{r_o - r_i}$
Тангенциальное	$\sigma_\theta = \frac{p_o r_o - p_i r_i}{r_o - r_i}$	$\varepsilon_\theta = -\frac{u_o - u_i}{r_o + r_i}$
Контактное	$\sigma_{z\theta} = \frac{1}{2} \left[ \frac{3T}{2\pi(r_o^3 - r_i^3)} + \frac{4(r_o^3 - r_i^3)T}{3\pi(r_o^2 - r_i^2)(r_o^4 - r_i^4)} \right]$	$\varepsilon_{z\theta} = \frac{\theta(r_o^3 - r_i^3)}{3h(r_o^2 - r_i^2)}$

Примечание.  $r_o$  - внешний радиус;  $r_i$  - внутренний радиус;  $d_r$  - радиус штока;  $z$  - осевая деформация;  $u_o$  - внешний радиус деформации (вычисляемый через  $dV$ ,  $dV_{in}$  и  $z$ );  $u_i$  - внутренний радиус деформации (вычисляемый через  $dV_{in}$  и  $z$ );  $\theta$  - тангенциальная деформация.

В табл. 3 приведены уравнения, используемые при вычислении напряжений и деформаций.

Действие крутящего момента  $T$ , осевой нагрузки  $W$ , внутреннего давления  $p_i$  и внешнего давления  $p_o$  на цилиндрический полый образец грунта схематично показано на рис. а, а действие соответствующих напряжений: вертикальное напряжение  $\sigma_z$ , радиальное напряжение  $\sigma_r$ , тангенциальное напряжение  $\sigma_\theta$  и тангенциальное касательное напряжение  $\sigma_{z\theta}$  показано на рис. 13. Касательные напряжения на внутренней и внешней поверхности образца равны нулю и напряжения на их поверхности являются главными. Для схемы нагружения, показанной на рис. 13  $\sigma_r = \sigma_2$  является промежуточным главным напряжением. Наибольшее главное напряжение  $\sigma_1$ , промежуточное главное напряжение  $\sigma_2$  и наименьшее главное напряжение  $\sigma_3$  определяются из выражений:

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= \frac{\sigma_z + \sigma_\theta}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_z - \sigma_\theta}{2}\right)^2 + \sigma_{z\theta}^2}; \\ \sigma_2 &= \sigma_r; \\ \sigma_3 &= \frac{\sigma_z + \sigma_\theta}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_z - \sigma_\theta}{2}\right)^2 + \sigma_{z\theta}^2}.\end{aligned}\tag{6}$$

Подобным образом, наибольшая, промежуточная и наименьшая главные деформации находятся как функции осевой деформации  $\varepsilon_z$ , радиальной деформации  $\varepsilon_r$ , тангенциальной деформации  $\varepsilon_\theta$  и деформации сдвига  $\varepsilon_{z\theta}$  из выражений

$$\begin{aligned}\varepsilon_1 &= \frac{\varepsilon_z + \varepsilon_\theta}{2} + \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_z - \varepsilon_\theta}{2}\right)^2 + \varepsilon_{z\theta}^2}; \\ \varepsilon_2 &= \varepsilon_r; \\ \varepsilon_3 &= \frac{\varepsilon_z + \varepsilon_\theta}{2} - \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_z - \varepsilon_\theta}{2}\right)^2 + \varepsilon_{z\theta}^2}.\end{aligned}\quad (7)$$

Напряженное состояние в образце грунта управляется средним эффективным напряжением  $p'$ , девиатор напряжений  $q$ , мобилизованный угол внутреннего трения  $\varphi'$ , параметр промежуточного главного напряжения  $b$ , и угол отклонения главного напряжения  $\sigma_1$  к вертикальной оси  $\alpha_\sigma$  определяются из выражений

$$p' = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3}{3} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} - u; \quad (8)$$

$$q = \sqrt{\frac{1}{2} \left\{ (\sigma'_1 - \sigma'_2)^2 + (\sigma'_2 - \sigma'_3)^2 + (\sigma'_3 - \sigma'_1)^2 \right\}}; \quad (9)$$

$$\varphi' = \sin^{-1} \left( \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{\sigma'_1 + \sigma'_3} \right); \quad (10)$$

$$b = \frac{\sigma'_2 - \sigma'_3}{\sigma'_1 - \sigma'_3}; \quad (11)$$

$$\alpha_\sigma = \frac{1}{2} \operatorname{tg}^{-1} \left( \frac{2\sigma_{z\theta}}{\sigma_z - \sigma_\theta} \right). \quad (12)$$

Объемная деформация  $\varepsilon_v$ , и деформация сдвига  $\gamma$ , определяются из выражений

$$\varepsilon_v = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3; \quad (13)$$

$$\gamma = \sqrt{\frac{2}{9} \left\{ (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2 \right\}}. \quad (14)$$

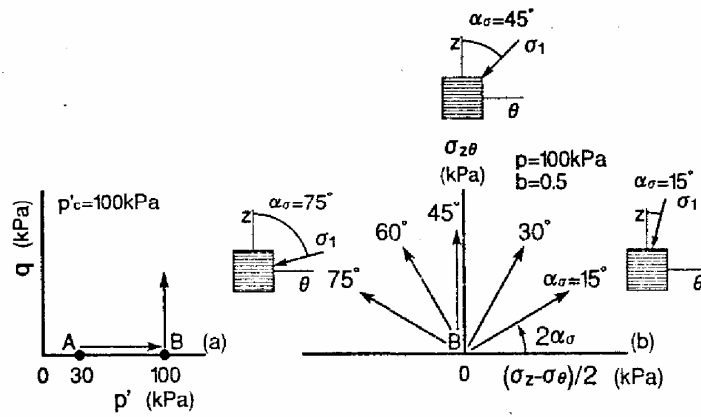


Рис. 14. Траектории нагружения /14/

а -  $p - q$  пространстве; б - в девиаторной плоскости

Возможные траектории нагружения образцов песчаного грунта в приборе подобной конструкции показаны на рис. 14 а, б /14/. Эти испытания были выполнены с целью определения эффекта влияния направления наибольшего главного напряжения на недренированные характеристики прочности рыхлого песка ( $e_{мин} = 0,635; e_{мак} = 0,973$ ). Недренированные испытания были выполнены с приращением угловой деформации сдвига  $d\theta = 0,1^0 / мин$ , при постоянном среднем напряжении 100 кПа, параметре  $b = 0,5$  и различных значения угла  $\alpha_\sigma$  (рис. 15 а, б).

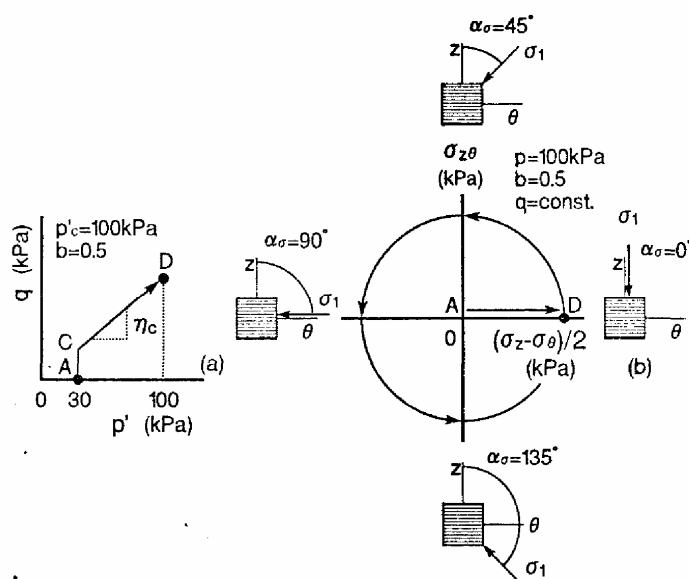


Рис. 15. Траектории нагружения с вращением главных напряжений /14/

а -  $p - q$  пространстве; б - в девиаторной плоскости

Траектории нагружения показанные на рис. 15 а, б используются при проведении испытаний для определения эффекта вращения наибольшего главного напряжения на напряженно-деформированное поведение грунта. На рис. 15 значение  $p' = 30$  кПа, соответствует вакуумному давлению, которое создавалось для сохранения формы образца при подготовке прибора к испытаниям [14]. Образец грунта первоначально был подвержен сдвигу по траектории АС (рис. 15 а), затем анизотропно консолидирован по траектории СД при постоянном отношении напряжений  $q/p$ . После этого направление главного напряжения  $\sigma_1$  изменялось от  $0$  до  $135^\circ$  при постоянных девиаторном напряжении, полном среднем главном напряжении в  $100$  кПа и  $b = 0,5$ .

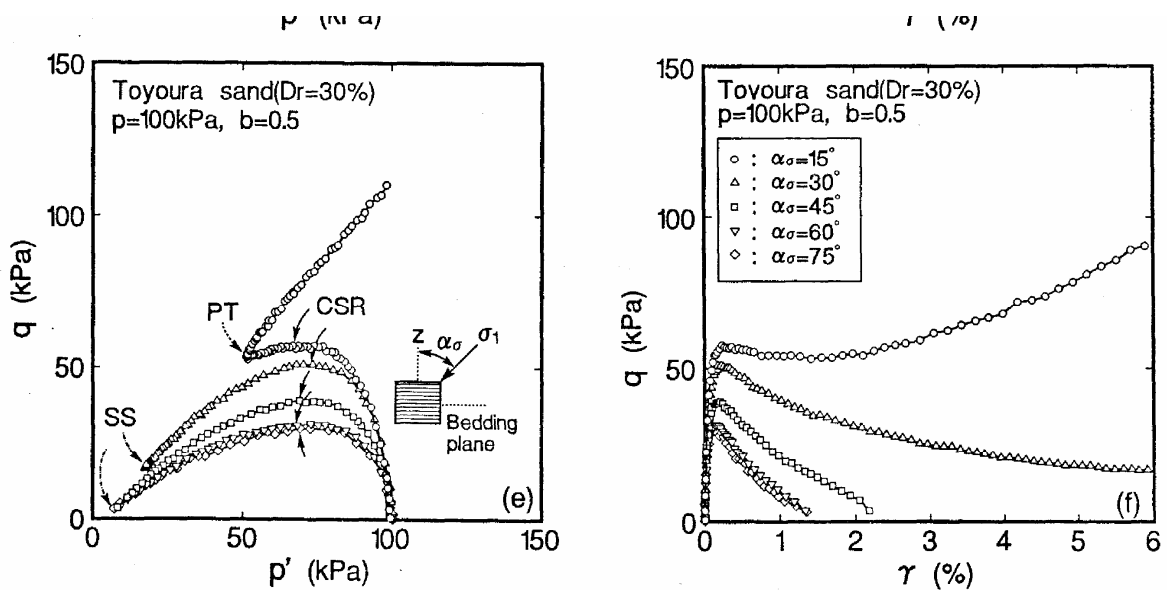


Рис. 16. Влияние вращения наибольшего главного напряжения на прочность песка

Выполненные исследования показывают на то, что напряженно – деформированное состояние песка зависит от его начальной плотности ( $D_r\%$ ) и величины отклонения наибольшего главного напряжения, чем больше этот угол тем более выражен эффект разупрочнения песка при сдвиге.

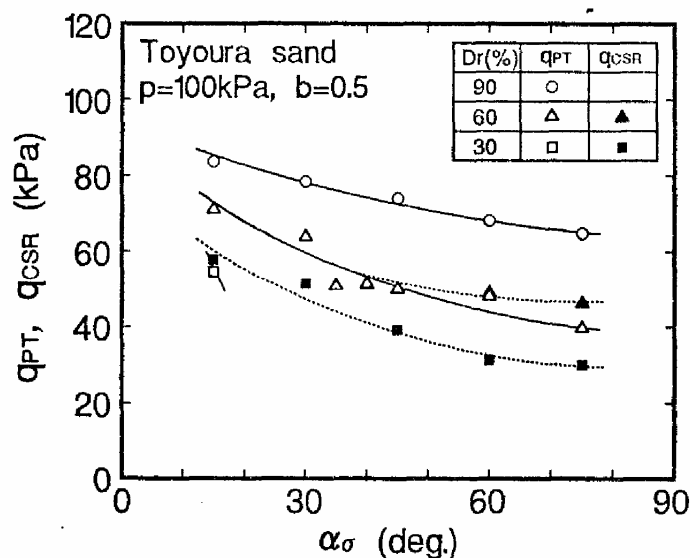


Рис. 17. Зависимость девиаторного напряжения от направления главного напряжения:  $q_{PT}$  - девиаторное напряжение, соответствующее началу упрочнения;  $q_{CSR}$  - девиаторное напряжение соответствующее началу разупрочнения

## 8. Испытания в условиях плоской деформации

В условиях плоской деформации находятся основания многих конструкций, такие как подпорные стены, тоннели, ленточные фундаменты, земляные насыпи и дамбы. Отсутствие возможности деформации в направлении перпендикулярном сечению данных конструкций приводит к отличному характеру напряженно-деформированного состояния от условий осесимметричной и трехосной деформации.

Испытания в условиях плоской деформации выполняются с призматическими образцами различных размеров. Эти испытания можно выполнить в приборе истинного трехосного сжатия при закреплении неподвижными двух нагрузочных штампов. Нагружение образцов выполняется при сохранении следующих условий:  $\varepsilon_1 \neq \varepsilon_3, \varepsilon_2 = 0; \sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$ .

В большинстве случаев для этой цели используются специально сконструированные приборы. Одной из подобных конструкций является



устройство предложенное Vardoulakis and A. Drescher /15/. Общий вид устройства плоской деформации и схема нагружения показаны на рис. 18 а, б.

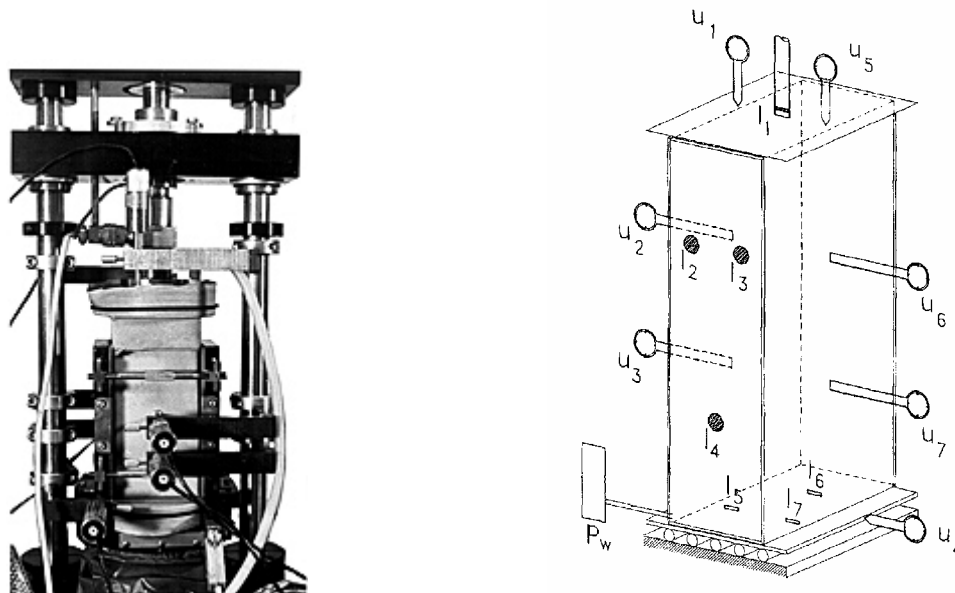


Рис. 18. Прибор плоской деформации конструкции I. Vardoulakis and A. Drescher /15, 16/

Этот прибор был сконструирован с целью исследования возникновения локализации деформаций проявляющейся при больших деформациях  $\epsilon > 10\%$ . Образец грунта находится между двумя не смещаемыми вертикальными стенками (рис. 18 а) имеет высоту 14 см и основание 4x8 см, находится в тонкой резиновой оболочке. В боковых не смещаемых стенках прибора находятся датчики давления для измерения бокового напряжения  $\sigma_2$  (рис. 18 б). Особенностью данной конструкции является введение возможности скольжения нижней опоры образца в горизонтальном направлении.

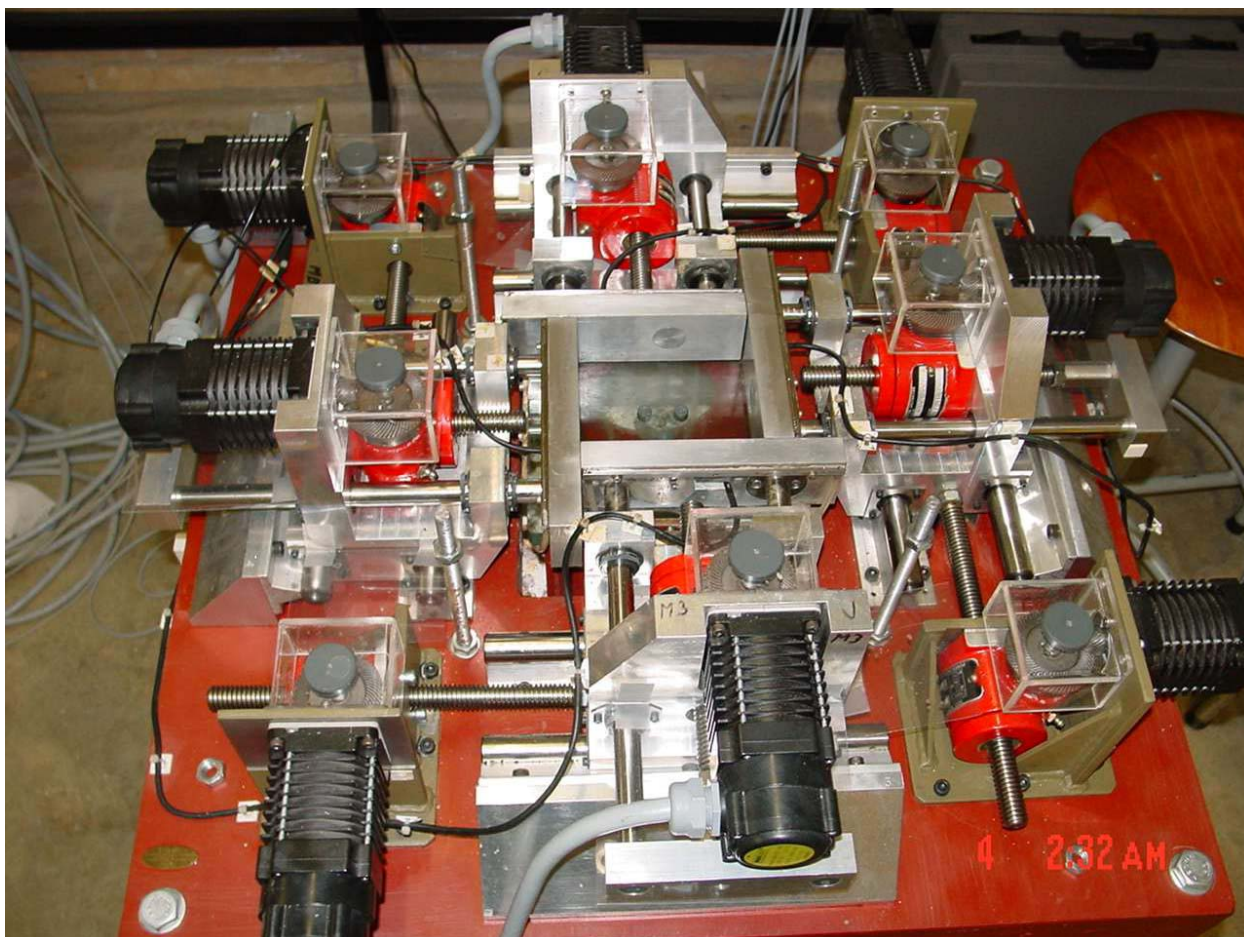


Рис. 19 . Прибор плоской деформации  
(Delft University of Technology. Geotechnical Laboratory. The Netherlands)

На рис. 19 показан подобный прибор плоской деформации, используемый в геотехнической лаборатории технологического университета.