



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ

**СТРОИТЕЛЬНЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ**

Издательство МИСИ – МГСУ

ОСНОВЫ  
ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ  
В МЕХАНИКЕ ГРУНТОВ И ГЕОТЕХНИКЕ

Учебно-методическое пособие



ISBN 978-5-7264-2349-4

© ФГБОУ ВО «НИУ МГСУ», 2020

Москва  
2020

УДК 624.13:519.6  
ББК 38.58: 22.161  
О-75

*Авторы:*

А.З. Тер-Мартirosян, В.В. Сидоров, Е.С. Соболев, И.Н. Лузин

*Рецензенты:*

доктор технических наук, профессор *М.Г. Зерцалов*,  
профессор кафедры механики грунтов и геотехники НИУ МГСУ;  
доктор технических наук *В.Е. Меркин*,  
генеральный директор ООО «НИЦ Тоннельной Ассоциации»

О-75     **Основы численного моделирования в механике грунтов и геотехнике** [Электронный ресурс] : учебно-методическое пособие / [А.З. Тер-Мартirosян и др.] ; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, кафедра механики грунтов и геотехники. — Электрон. дан. и прогр. (5,5 Мб). — Москва : Издательство МИСИ – МГСУ, 2020. — Режим доступа: <http://lib.mgsu.ru> — Загл. с титул. экрана.

ISBN 978-5-7264-2349-4 (сетевое)

ISBN 978-5-7264-2350-0 (локальное)

В учебно-методическом пособии рассмотрены основы метода конечных элементов применительно к совместному расчету конструкций зданий и сооружений и грунтового основания. Приводятся наиболее распространенные модели грунта и методы определения их параметров в лабораторных условиях. Подробно описаны моделирование, расчет и анализ результатов расчетов в программном комплексе PLAXIS 2D.

Для обучающихся по направлению подготовки 08.04.01 Строительство, а также для специалистов, практикующих численные методы расчета при решении геотехнических задач.

*Учебное электронное издание*

© ФГБОУ ВО «НИУ МГСУ», 2020

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Термины и сокращения.....	5
Термины.....	5
Сокращения.....	5
Предисловие.....	6
Глава 1. МЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, МОДЕЛИРУЕМЫЕ В ГЕОТЕХНИКЕ.....	7
1.1. Деформируемость грунтов.....	8
1.2. Прочность грунтов.....	9
Глава 2. ОСНОВЫ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ.....	14
2.1. Основные этапы расчета методом конечных элементов в программе PLAXIS 2D.....	14
2.2. Расчет начальных напряжений.....	15
Глава 3. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ PLAXIS 2D.....	19
3.1. Начало работы с ПК PLAXIS 2D.....	19
3.2. Создание инженерно-геологических условий модели.....	22
3.3. Современные модели грунта, используемые в расчетах.....	26
3.4. Создание конструктивных элементов модели.....	31
3.5. Создание сетки конечных элементов.....	37
3.6. Расчет созданной модели.....	37
Глава 4. ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ РЕШЕНИЯ.....	42
Глава 5. ПРАКТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОТЕХНИЧЕСКИХ ЗАДАЧ.....	44
5.1. Введение.....	44
5.2. Геотехническая задача 1. Работа одиночной центрально нагруженной сваи в грунтовом основании под нагрузкой.....	44
5.3. Геотехническая задача 2. Расчет глубокого котлована, разрабатываемого открытым способом.....	53
5.4. Геотехническая задача 3. Определение влияния проходки тоннеля. на конструкции существующего здания и его основание.....	69
5.5. Геотехническая задача 4. Определение напряженно-деформированного состояния водонасыщенного основания при возведении на нем грунтовой насыпи.....	79
5.6. Геотехническая задача 5. Определение напряженно-деформированного состояния основания здания. при сейсмических воздействиях.....	84
Библиографический список.....	91

## ПРЕДИСЛОВИЕ

В методических указаниях кратко изложены основные принципы метода конечных элементов, также приводится описание интерфейса программного комплекса PLAXIS 2D. Даются рекомендации по использованию данного программного комплекса при геотехнических расчетах в рамках отечественной нормативной базы. В заключительной части учебного пособия рассматриваются типовые геотехнические задачи, решаемые в инженерной практике.

Методические указания предназначены для обучающихся дневной, вечерней и заочной форм обучения при работе над курсовым проектом. Представленные в них алгоритмы расчета геотехнических задач могут быть полезны в работе над дипломным проектом.

Методические указания составлены профессором кафедры механики грунтов и геотехники д.т.н. А.З. Тер-Мартirosяном и доцентами кафедры механики грунтов и геотехники, к.т.н. В.В. Сидоровым, к.т.н. Е.С. Соболевым и к.т.н. И.Н. Лузиным. Авторы данной работы благодарны рецензенту д.т.н. профессору М.Г. Зерцалову за ценные замечания, которые были учтены при подготовке книги.

## Глава 1

# МЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, МОДЕЛИРУЕМЫЕ В ГЕОТЕХНИКЕ

При возведении и реконструкции зданий и сооружений с подземной частью, согласно СП 22.13330.2016, необходимо выполнять геотехнический прогноз для следующих сооружений:

- особо опасных и уникальных;
- повышенного уровня ответственности;
- геотехнической категории 3;
- с подземной частью глубиной заложения более 5 м;
- в зоне влияния которых расположены сооружения окружающей застройки;
- размещаемых на территориях с возможным развитием опасных инженерно-геологических процессов.

При выполнении работ по геотехническому прогнозу одним из основных этапов является численное моделирование системы «сооружение – фундамент – грунтовое основание». Данный тип расчетов может выполняться различными программными комплексами, реализующими метод конечных разностей, метод конечных элементов или решение контактной задачи. Одним из программных комплексов, использующим метод конечных элементов, является PLAXIS 2D. Данный программный комплекс дает возможность расчетов различных геотехнических задач с учетом пространственной жесткости сооружений, нелинейного поведения грунтов основания и неблагоприятных инженерно-геологических процессов. Согласно СП 22.13330.2016, расчету подлежат следующие геотехнические задачи:

- определение средней осадки и относительной разности осадок нового строительства;
- определение дополнительной осадки и относительной разности осадок окружающей застройки в зоне влияния нового строительства;
- расчет стабилизации осадки во времени;
- расчет дополнительной осадки зданий и сооружений при динамических и сейсмических воздействиях;
- устойчивость откосов и склонов и др.

Все эти задачи могут быть решены тем или иным образом в ПК PLAXIS 2D. Для корректного создания модели, расчета и анализа результатов требуется комплексное понимание как основ механики грунтов, так и основ численного моделирования, в том числе метода конечных элементов. При численном моделировании геотехнических задач особое внимание следует уделять следующим механическим процессам, протекающим в грунте: деформируемости, прочности и консолидации. Рассмотрим теоретические основы данных процессов.

При численном моделировании геотехнических задач особую важность приобретает корректный выбор модели грунта основания и ее входных параметров. Наиболее распространенные модели грунта, используемые в программной среде PLAXIS, будут рассмотрены в следующих главах. Параметры модели грунта позволяют создать математическую модель, отображающую поведение грунта при различных воздействиях, поэтому точность их определения напрямую влияет на точность получаемых результатов решения задач. Физико-механические параметры грунтов, используемые при геотехнических расчетах, могут быть получены различными методами как в полевых, так и в лабораторных условиях. Рассмотрим наиболее распространенные из них.

Механические свойства грунтов принято разделять на две группы: деформационные и прочностные. При этом, прочность грунтов обычно учитывается при расчетах по первой группе предельных состояний (несущая способность грунта, устойчивость откосов и т.д.), а деформируемость — при расчетах по второй группе предельных состояний (осадки, разности относительных осадок, крены и т.д.).

## 1.1. ДЕФОРМИРУЕМОСТЬ ГРУНТОВ

Наиболее распространенными методами определения деформационных свойств грунтов являются методы компрессионного сжатия в одометре, трехосного сжатия в стабилометре и штамповые испытания.

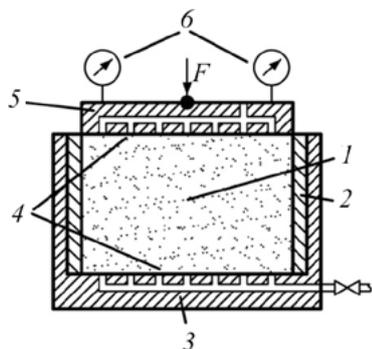


Рис. 1.1. Схема одометра (компрессионного прибора)

Компрессионное сжатие — это уплотнение грунта без возможности расширения его в стороны. Образец грунта 1 (рис. 1.1) помещается в жесткую металлическую обойму 2 кольцевой формы. Нагружается с помощью штампа 5 с силой  $F$ , под действием которой в образце возникают сжимающие напряжения  $\sigma_z$ , вызывающие уплотнение грунта и осадку штампа. Боковое кольцо препятствует расширению образца, т.е. боковые деформации образца  $\varepsilon_x = \varepsilon_y = 0$ . Однако в образце возникают боковые напряжения  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$ , измерить которые в стандартном приборе можно только с использованием тензометрического кольца.

Количественной мерой оценки деформируемости грунта в условиях компрессионного сжатия служит величина относительной деформации сжатия  $\varepsilon = S/h$ .

Производя ступенями нагрузку и разгрузку образца, получают зависимость относительной деформации образца в зависимости от действующего напряжения (рис. 1.2, 1.3).

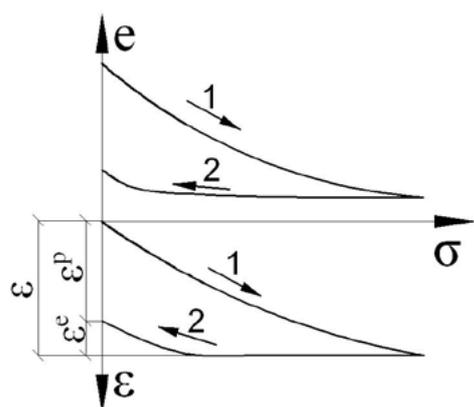


Рис. 1.2. Компрессионные кривые и зависимости изменения относительной деформации  $\varepsilon$  от напряжения  $\sigma$ : 1 — нагружение; 2 — разгрузка;  $\varepsilon^e$  и  $\varepsilon^p$  — упругая и пластическая составляющие деформации

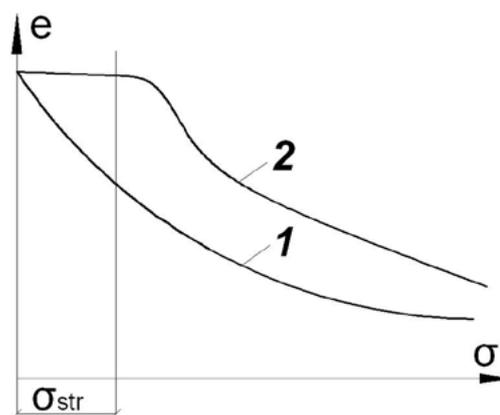


Рис. 1.3. Компрессионные кривые грунта ненарушенной (1) и нарушенной (2) структуры;  $e$  — коэффициент пористости;  $\sigma$  — вертикальное напряжение

Модуль деформации грунта также можно определить при обработке результатов испытаний местной статической нагрузкой. Испытания штампами проводятся в шурфах ( $A = 5000 \text{ см}^2$ ) или скважинах. Схема опыта показана на рис. 1.4, а.

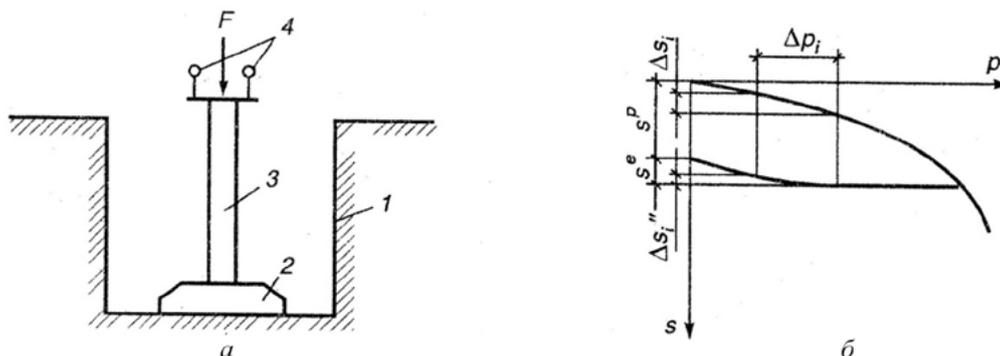


Рис. 1.4. Схема (а) и результаты (б) полевых испытаний грунта на сжатие

На дно шурфа (скважины) 1 устанавливается штамп 2, соединенный стойкой 3 с нагрузочной платформой 4. К платформе ступенями прикладывается нагрузка  $F$  (пригрузочными блоками). Зная давление  $P$ , создаваемое под штампом и измеряя стабилизированную осадку  $S$ , строят опытную зависимость  $P-S$  (рис. 1.4, б). По ней определяют модуль деформации согласно формуле:

$$E = \frac{\omega b (1 - \nu^2) P_i}{S_i},$$

где  $\omega$  — коэффициент, зависящий от формы жесткого штампа, и принимается: для круглого штампа  $\Rightarrow \omega = 0,78$ , для квадратного  $\Rightarrow \omega = 0,88$ ;  $b$  — сторона или диаметр штампа;  $\nu$  — коэффициент Пуассона ( $\approx 0,25$ ),  $0 \leq \nu \leq 0,5$ ;  $P_i$  и  $S_i$  — давление и осадка штампа в пределах линейной зависимости кривой  $P-S$ .

## 1.2. ПРОЧНОСТЬ ГРУНТОВ

Под прочностью подразумевают свойства материала сопротивляться разрушению или развитию больших пластических деформаций, приводящих к недопустимым искажениям формы тела. Касательно грунтов — их прочность и прочностные характеристики рассматривают в следующих задачах:

- устойчивость откосов и склонов;
- определение предельной нагрузки на основания;
- расчет устойчивости подпорных стен, мостов;
- определение расчетного сопротивления грунта  $R_0$ .

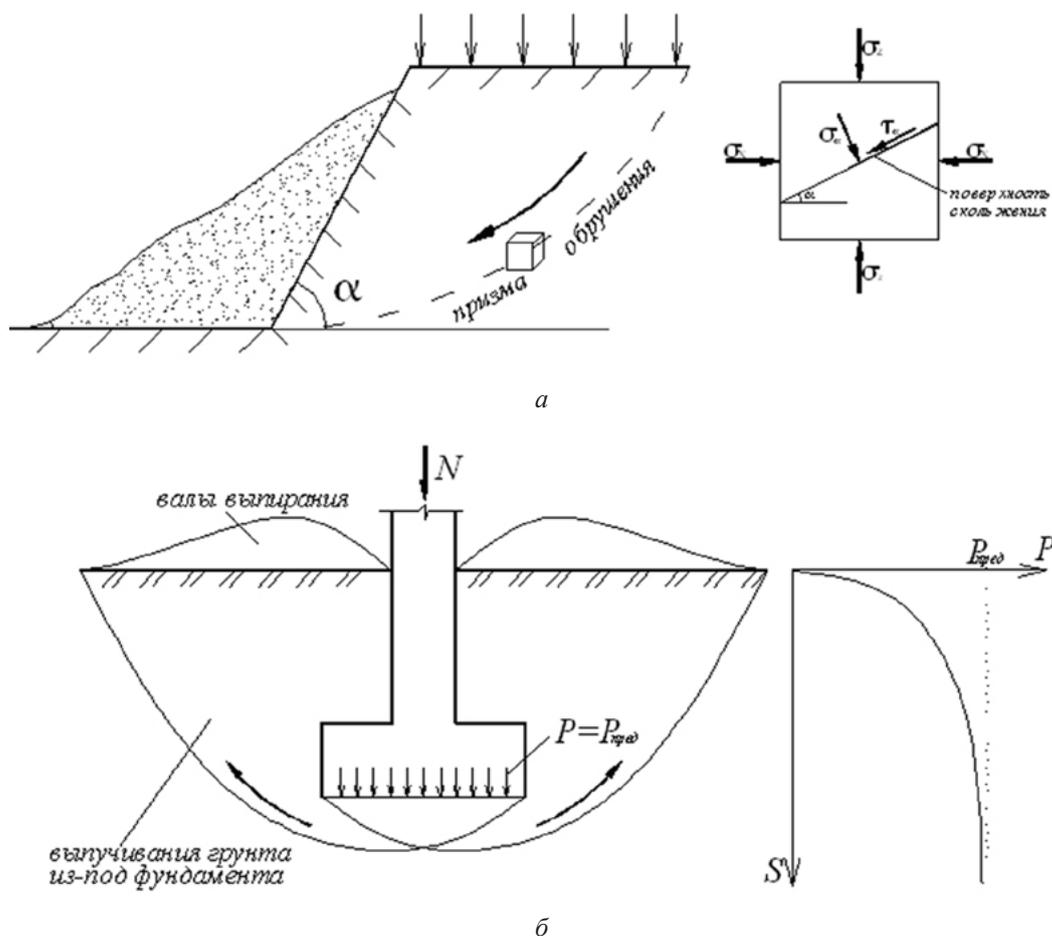


Рис. 1.5. Схемы потери прочности грунта: а — обрушение откоса; б — выдавливание грунта из-под фундамента;  $P = P_{пред}$  — предельная вертикальная нагрузка на фундамент;  $P$  — нагрузка на фундамент;  $S$  — осадка фундамента

Потеря прочности грунта, т.е. его разрушение, всегда происходит за счет сдвига одной части грунта по поверхности другой (рис. 1.5, а).

Если мы сумеем найти соотношение между  $\tau_\alpha$  и  $\sigma_\alpha$  для предельного состояния элементарного объема грунта, то мы всегда можем определить, обладает ли этот грунт запасом прочности.

Для определения прочности массива грунта обычно используется закон сопротивления грунта сдвига, называемый также законом Кулона. Данный закон записывается в виде:

- для песчаных грунтов:

$$\tau_{\text{пред}} = \sigma \operatorname{tg} \varphi;$$

- для пылевато-глинистых грунтов:

$$\tau_{\text{пред}} = \sigma \operatorname{tg} \varphi + c,$$

где  $\tau_{\text{пред}}$  — предельное касательное напряжение, соответствующее вертикальному напряжению  $\sigma$ ;  $\varphi$  — угол внутреннего трения грунта;  $c$  — удельное сцепление.

Наиболее распространенными методами определения прочностных свойств грунтов являются метод одноплоскостного среза и метод разрушения образца в приборе трехосного сжатия (стабилометре). Рассмотрим данные методы подробнее.

При испытаниях на одноплоскостной сдвиг используют специальный прибор (рис. 1.6, а):

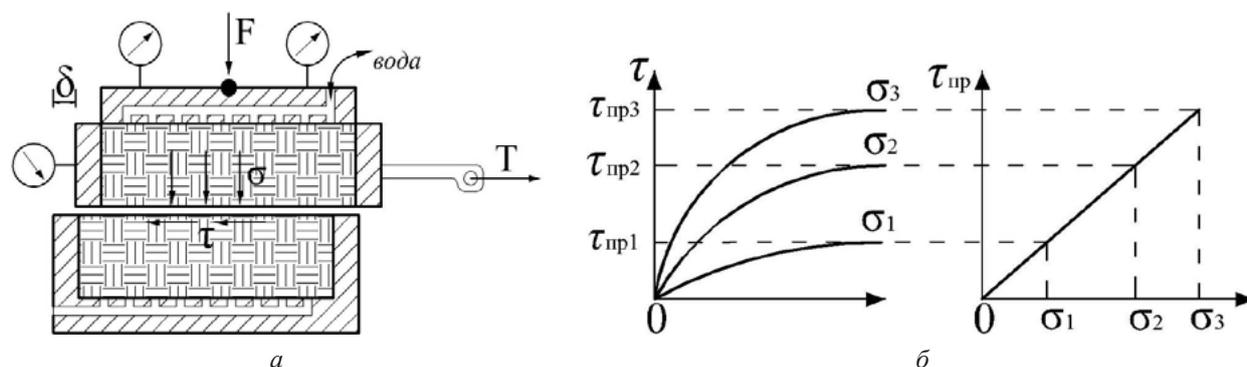


Рис. 1.6. Схема прибора для испытаний на одноплоскостной сдвиг (а) и график сопротивления сдвигу образцов песчаного грунта (б)

При постоянном значении вертикального давления  $\sigma = \text{const}$ ,  $\sigma = F/A$  к верхнему подвижному кольцу ступенями прикладывается горизонтальное усилие  $T$ . Под действием возникающих касательных напряжений  $\tau = T/A$  возникают горизонтальные перемещения  $\delta$  верхней части образца, измеряемые индикатором. На каждой ступени дожидаются стабилизации перемещения, затем увеличивают горизонтальную нагрузку до тех пор, пока при некотором значении  $\tau = \tau_{\text{пред}}$  дальнейшее перемещение образца происходит без увеличения сдвигающего напряжения. Это свидетельствует о разрушении образца при заданном значении  $\sigma$  за счет сдвига.

Испытывая несколько образцов, строят кривые горизонтальных перемещений образцов при разных  $\sigma$  и график сопротивления образцов сдвигу (в случае песчаного грунта — рис. 1.6, б).

Многочисленными испытаниями установлено, что график зависимости  $\tau_{\text{пред}} = f(\sigma)$  в интервале изменения  $\sigma$  до 300–500 кПа (интервал, представляющий наибольший интерес для промышленного и гражданского строительства) может быть представлен отрезком прямой.

Поскольку сопротивление сдвигу сыпучих грунтов определяется прежде всего сопротивлением трению перемещающихся частиц, то угол  $\varphi$  принято называть *углом внутреннего трения*, а  $f = \operatorname{tg} \varphi$  — *коэффициентом внутреннего трения*.

В пылевато-глинистых грунтах сопротивление сдвигу обуславливается еще и связностью грунта, поэтому отрезок  $c$ , отсекаемый на оси  $\tau_{пред}$ , называется *удельным сцеплением*, которое характеризует его связность.

Величины  $\phi$  и  $c$  являются основными прочностными характеристиками грунта, определяемыми в каждом конкретном случае в лабораториях опытным путем.

**Сопротивление грунта сдвигу при сложном напряженном состоянии. Теория прочности Кулона-Мора.** Схема одноплоскостного сдвига соответствует лишь частным случаям разрушения грунта в основании сооружений. В общем случае необходимо рассмотреть прочность грунта в условиях сложного напряженного состояния.

Пусть к граням элементарного объема грунта приложены главные напряжения  $\sigma_1(\max) \geq \sigma_2 \geq \sigma_3(\min)$  (рис. 1.7, а). Если увеличивать  $\sigma_1$  при  $\sigma_3 = \text{const}$ , то в соответствии с теорией Кулона-Мора, произойдет сдвиг по некоторой площадке, наклоненной к горизонтальной плоскости под углом  $\alpha$  (рис. 1.7, б). При этом среднее напряжение  $\sigma_2$  никак не повлияет, поэтому из дальнейшего рассмотрения оно может быть исключено.

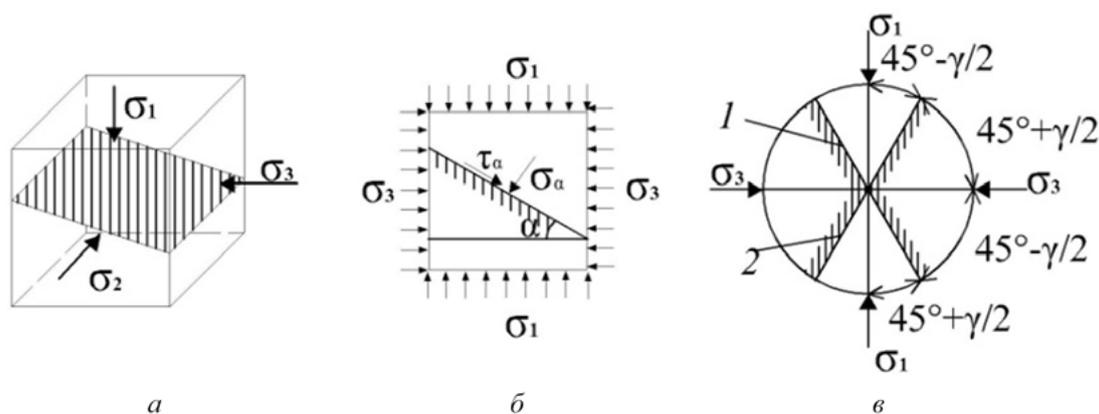


Рис. 1.7. Положение площадки скольжения (а), напряжения на наклонной площадке (б) и ориентация площадок скольжения 1 и 2 (в) относительно направления действия главных напряжений

На площадке сдвига, располагаемой под углом  $\alpha$ , формируется условие предельного состояния, описываемое уравнением:

$$\tau_{\alpha} = \sigma_{\alpha} \operatorname{tg} \phi + c.$$

После некоторых преобразований получим, что в предельном состоянии (рис. 1.7, в):

$$\alpha = \frac{\pi}{4} \pm \frac{\phi}{2}.$$

Отсюда следует, что в предельном состоянии в каждой точке грунта имеются две сопряженные площадки скольжения, наклоненных под углом  $\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}$  к линии действия максимального и под углом  $\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}$  к линии действия минимального главного напряжения.

**Испытания по схеме трехосного сжатия.** Цилиндрический образец грунта 4 помещают в рабочую камеру прибора 7, заполненную водой или глицерином (рис. 1.8). Для того чтобы предохранить образец от поступления жидкости, его окружают тонкой резиновой оболочкой 6. Нормальное напряжение  $\sigma$  создается в образце через штамп 2 с помощью нагрузочного устройства. Боковое напряжение  $\sigma_2 = \sigma_3$  осуществляется созданием в жидкости рабочей камеры гидростатического давления. Измерение давления в камере производится манометром 3, вертикальных перемещений образца — индикаторами 5.

Для отжатия воды из образца в процессе испытания или, наоборот, его насыщения используется система из перфорированного штампа и поддона с трубками, прикрытых кранами 1 (см. рис. 1.8). Для вычисления горизонтальных перемещений применяется тонкая градуированная трубка 8, называемая также «волюмометр», снабженная краном 1 и позволяющая определить объем жидкости, вытекающей из рабочей камеры прибора, что соответствует объемной деформации образца.

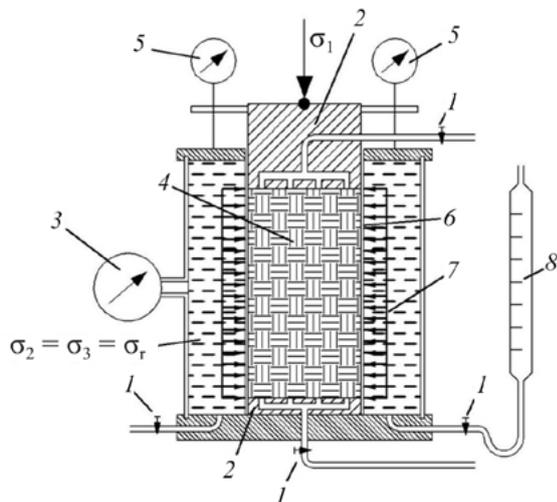


Рис. 1.8. Схема прибора трехосного сжатия (стабилометра)

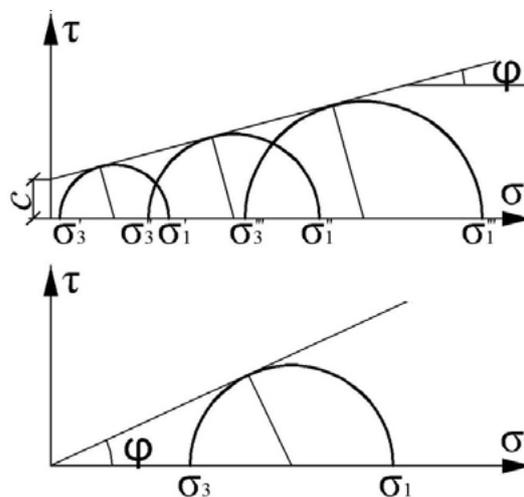


Рис. 1.9. Определение прочностных характеристик грунтов на основе результатов испытаний образцов грунта в приборе трехосного сжатия для связных (сверху) и несвязных (снизу) грунтов

По результатам серии испытаний строят круги предельных напряжений (рис. 1.9). Касательная к этим кругам позволяет определить параметры сопротивления грунта сдвигу  $\varphi$  и  $c$ . Для песчаного грунта достаточно проведения одного опыта, так как при  $c = 0$  касательная к кругу Мора в этом случае выходит из начала координат.

Важно отметить, что прочностные характеристики грунтов, особенно пылевато-глинистых, существенно зависят от скорости передачи нагрузки в процессе строительства и эксплуатации зданий и сооружений. При быстром нагружении массивов слабых водонасыщенных грунтов практически не реализуется угол внутреннего трения грунта. В таком случае возможно разрушение грунта под сооружением. Такой процесс происходит с большой скоростью и называется «недренированный срез». Чтобы учесть возможность проявления таких процессов в основании, необходимо выполнение специальных испытаний согласно ГОСТ 12248—2010. При определении прочностных характеристик грунтов используют три различные схемы нагружения образца:

- **консолидированно-дренированное (КД) испытание:** после помещения образца в камеру прибора трехосного сжатия производят всестороннее обжатие образца и выдерживают его под нагрузкой некоторое время с целью снижения избыточного порового давления в образце (консолидация). После выдерживания образца под давлением всестороннего обжатия к нему прикладывают вертикальное давление небольшими ступенями с выдерживанием времени на каждой ступени до разрушения образца. В результате получают эффективные показатели прочности грунта  $\varphi$  и  $c$ . Такие показатели можно использовать в численных расчетах в том случае, если в процессе строительства предполагается небольшая скорость передачи нагрузки от сооружения на грунты основания и в основании не залегают слабые водонасыщенные грунты;

- **консолидированно-недренированное (КН) испытание:** производят консолидацию образца при всестороннем обжатии. После консолидации образца закрывают дренаж и передают ступенчато вертикальную нагрузку на образец до его разрушения. В результате таких испы-