

## **ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРОВ И ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ НА НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ОБРАЗЦОВ СВЯЗНОГО ГРУНТА В УСЛОВИЯХ ТРЁХОСНОГО СЖАТИЯ**

Меркульев Е. В., Третьяков И. А., бакалавры  
Научный руководитель Болдырев Г.Г.

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

### **Аннотация.**

В данной статье рассмотрено поведение образцов связного грунта нарушенной структуры в условиях трёхосного сжатия. Испытания образцов проводились по неконсолидированно-недренированной схеме. В опытах исследовалось влияние размера образцов и граничных условий на прочность и деформируемость связных грунтов.

**Ключевые слова:** глина, трёхосное сжатие, влияние размера образцов, смазка, напряжённно-деформированное состояние

### **ВВЕДЕНИЕ**

Испытания грунтов на трёхосное сжатие являются одними из самых распространённых среди лабораторных исследований прочности и деформируемости песчаных и глинистых грунтов. Эти испытания проводятся при определенном виде напряженного состояния, которое возникает в образце грунта при его нагружении. Исследования ряда авторов [1,2,3] показывают, что в процессе нагружения образца грунта в нем возникает неоднородное напряженное состояние, вследствие влияния различных факторов.

Одной из основных причин этого являются граничные условия на торцах образца грунта в приборе трёхосного сжатия и отношение высоты к диаметру [4,5]. Поэтому авторами данного исследования была поставлена цель изучить влияние граничных условий на прочностные и деформационные свойства грунтов в приборе трехосного сжатия.

Многими исследователями [1,3,4,6] был выявлен тот факт, что уменьшить возникающую неоднородность деформаций можно путем введения вязкого слоя (смазки) между торцевыми гранями образца и концевиками прибора.

Несмотря на распространённость подобных исследований, большинство испытаний проводилось на образцах сыпучего грунта из-за их простоты. Поэтому авторами данной работы было решено провести испытания связного грунта с целью выяснить, насколько сильно отличаются результаты и стоит ли вообще проводить дополнительные конструктивные мероприятия по улучшению условий испытаний или этим можно пренебречь в геологической практике при определении прочностных и деформационных характеристик грунтов.

Наряду с вопросом о снятии сил трения введением смазки существует еще одна проблема - размеры образца. Эта проблема неоднократно изучалась многими учёными [1,2,4,7], но оценочные испытания проводились, в основном, также с образцами сыпучего грунта.

Учитывая это, в данной работе были выполнены дополнительные испытания с образцами связного грунта с целью исследования влияния на результаты испытаний отношения высоты образца к его диаметру.

## 1. Влияние сил трения на характер деформации

### 1.1 Подготовка образцов

Для исследования влияния сил трения были выбраны одни из самых доступных по цене смазывающие вещества: литол-24 и вазелин медицинский.

Для сравнения были проведены испытания без введения смазки и испытания с высокой шероховатостью концевиков прибора («с абсолютным трением»).

Размер образцов, в данной серии опытов, был принят постоянным: диаметр  $D = 38$  мм и высота  $H = 76$  мм, при отношении  $H/D = 2$ , как рекомендовано ГОСТ 12248-96 [8].

Образцы были изготовлены из глины тугопластичной нарушенной структуры. В таблице 1 приведены основные физические характеристики данного грунта.

Таблица 1 Физические свойства глины

Влажность $\omega$ , д.е.	Влажность на границе текучести $\omega_L$ , д.е.	Влажность на границе раскатывания $\omega_R$ ,	Число пластичности $I_p$ , д.е.	Показатель текучести $I_L$	Плотность $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Плотность сухого грунта $\rho_s$ , г/см <sup>3</sup>	Плотность частиц грунта $\rho_s$ , г/см <sup>3</sup>	Пористость $n$ , д.е.	Коэффициент пористости $e$	Степень влажности $S_r$
0,25	0,43	0,21	0,22	0,27	1,91	1,50	2,7	0,443	0,795	0,917

Глина была получена из монолитов, отобранных из скважины на территории г. Пенза, в юго-восточной части города, близ реки Суры. Монолиты были измельчены на бытовой тёрке до размеров хлопьев, затем эти хлопья были высушены до нулевой влажности в сушильном шкафу при температуре  $105^\circ$  в соответствии с ГОСТ 5180-84 [9], затем перемолоты в шаровой мельнице.

В соответствии с ГОСТ 22733-2002 [10] была определена влажность, соответствующая максимальной плотности образца. Влажность 25%, плотность 1,91 г/см<sup>3</sup>.

Формование образцов нарушенной структуры проводили следующим образом. В металлическую цилиндрическую форму (рис. 1 а) высотой 127 мм и внутренним диаметром 100 мм помещалась слоями (высотой примерно в 30 мм) смесь из 300 граммов глины и 75 граммов (25% от массы глины) дистиллированной воды; затем форма устанавливалась в прибор стандартного уплотнения (рис. 1 б), и груз, массой 5 кг, ударял 40 раз с высоты 300 мм по грунту [10]. Для лучшего взаимопроникновения слоёв грунта в форме верхняя поверхность уже уплотнённого слоя рыхлилась на глубину 5-10 мм.

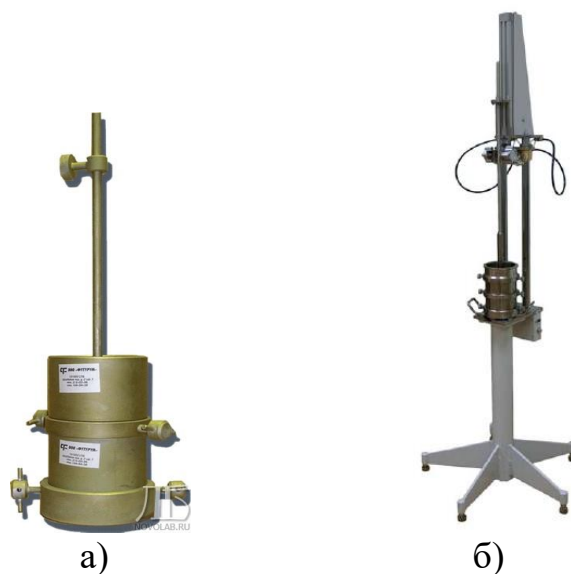


Рис. 1. Прибор для определения оптимальной плотности и влажности грунтов: а – форма для образца; б – общий вид прибора

Уплотнение выполнялось в четыре слоя. Форма смазывалась литолом-24. После этого форма разбиралась, и из полученного цилиндра, режущим кольцом вырезались 2 образца высотой 76 мм и диаметром 38 мм.

Для испытаний с оценкой влияние отношения Н/D, на напряженно-деформируемое состояние (НДС), образцы обрезались до получения необходимой высоты.

После подготовки образцы помещались в эксикатор на 1-2 суток.

## 1.2. Методика испытаний

В опытах с введением смазки концевика, (штамп и основание) рабочей камеры прибора трехосного сжатия, обворачивались резиновой оболочкой (из того же материала, что и оболочка для образца), на неё кисточкой наносился слой смазки толщиной 1 мм.

В качестве шероховатой поверхности использовалась крупная наждачная бумага 50-Н (Р36) [11]; она была прикреплена к концевикам прибора. Такое закрепление условно было названо «абсолютным трением».

Схема проведения испытаний была выбрана неконсолидированно-недренированная. Всестороннее давление задавалось,  $\sigma_3 = 200, 400$  и  $600$  кПа. При каждом значении всестороннего давления были проведены испытания при 4 различных граничных условиях: смазка – литол; смазка – вазелин; стандартные (диск из фторопласта); «абсолютное трение» (наждачная бумага).

Для проведения испытаний был выбран стабилметр производства компании ООО «НПП «Геотек» ([www.geotek.ru](http://www.geotek.ru)). Испытания проводились в автоматизированном режиме, с использованием измерительно-вычислительного комплекса АСИС. Все измерения обрабатывались программой «АСИС Репорт 3.2».

Во всех опытах, время предварительного уплотнения всесторонним давлением составляло 20 минут, вертикальная нагрузка увеличивалась каждые 15 секунд на 10 кПа, моментом разрушения образца считался состояние, при котором относительная продольная деформация составляла 15%. При достижении этого значения испытание прекращалось.



Рис. 2. Форма деформации при смазанных концевиках

### 1.3 Результаты испытаний

По результатам испытаний были построены графики зависимостей вертикальных напряжений  $\sigma_1$  от относительной продольной деформации  $\varepsilon_1$ , при различном боковом давлении, которые показаны на рис. 3, 4, 5. На каждом рисунке в таблице приведены значения модуля упругости, определенные как  $E = \Delta\sigma_1 / \Delta\varepsilon_1$  на начальном участке зависимости  $\varepsilon_1 = f(\sigma_1)$ . Модуль упругости возрастает с ростом бокового обжатия образцов с 25,0 до 33,0 МПа в интервале  $\sigma_3$  от 200 до 600 кПа. Из рисунков также видна зависимость на деформационное поведение образцов глины сил трения между торцами образцов и концевиками прибора. Практически одинаковое

поведение показывают образцы с концевиками из фторопласта и наждачной бумаги. Введение смазки приводит к изменению деформационного поведения образцов. Для смазки литол-24 (см. рис. 3 и рис. 4) получена большая прочность образцов, по сравнению с фторопластом и наждачной бумагой. Однако в других опытах  $\sigma_3 = 400$  кПа, получена обратная зависимость. Если сравнить значения модуля упругости (см. таблички на рисунках), то видно, что его величина уменьшается с введением смазки.

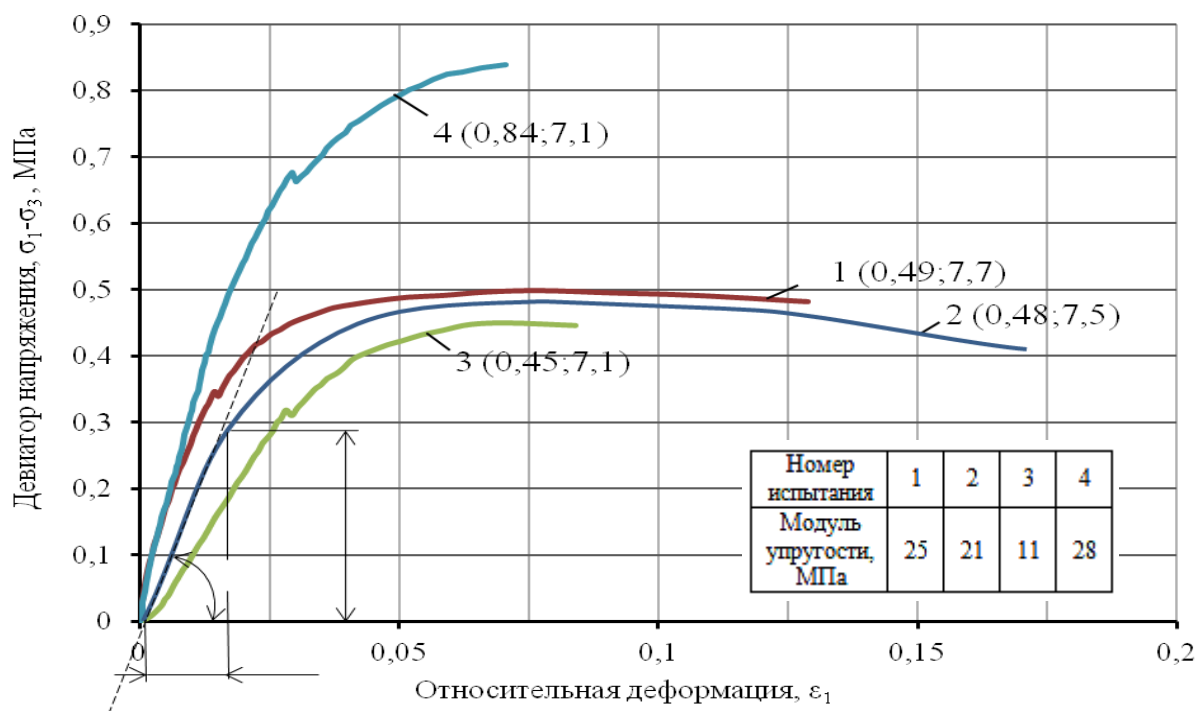


Рис. 3. Испытание образцов при всестороннем давлении 200 кПа:

1– фторопласт; 2– наждачная бумага; 3– смазка–вазелин; 4– смазка–литол-24

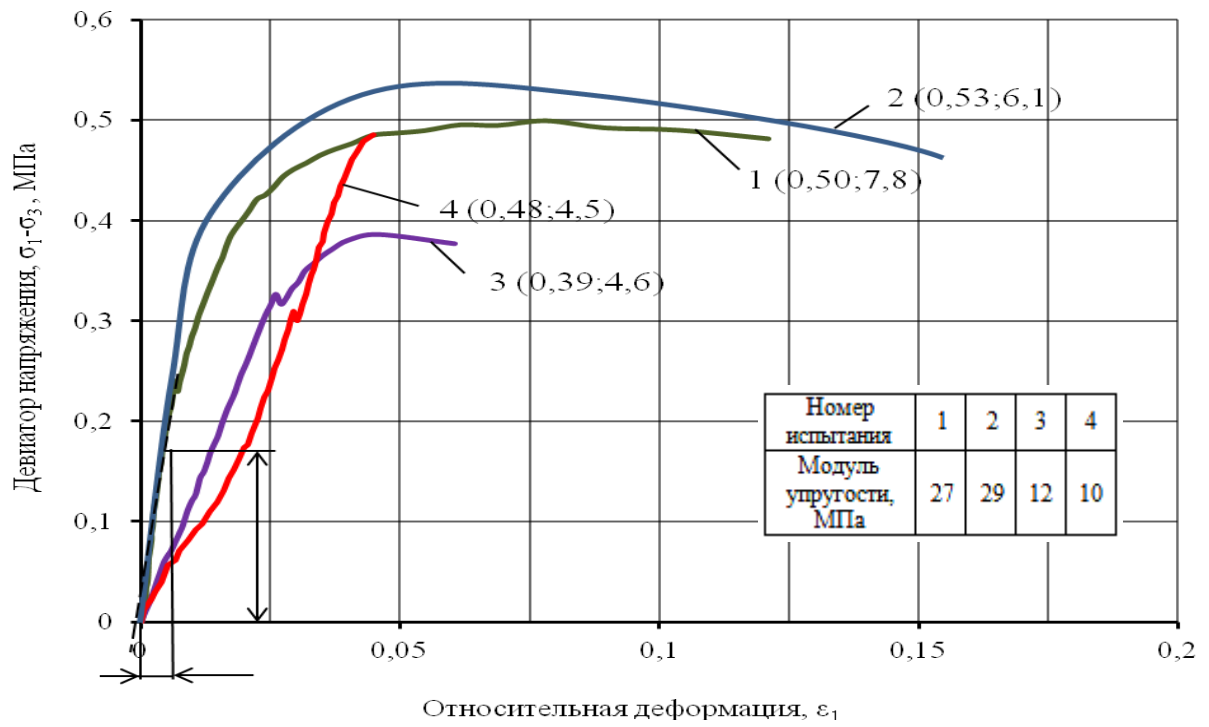


Рис. 4. Испытание образцов при всестороннем давлении 400 кПа:  
 1– фторопласт; 2– наждачная бумага; 3– смазка–вазелин; 4– смазка–литол-24

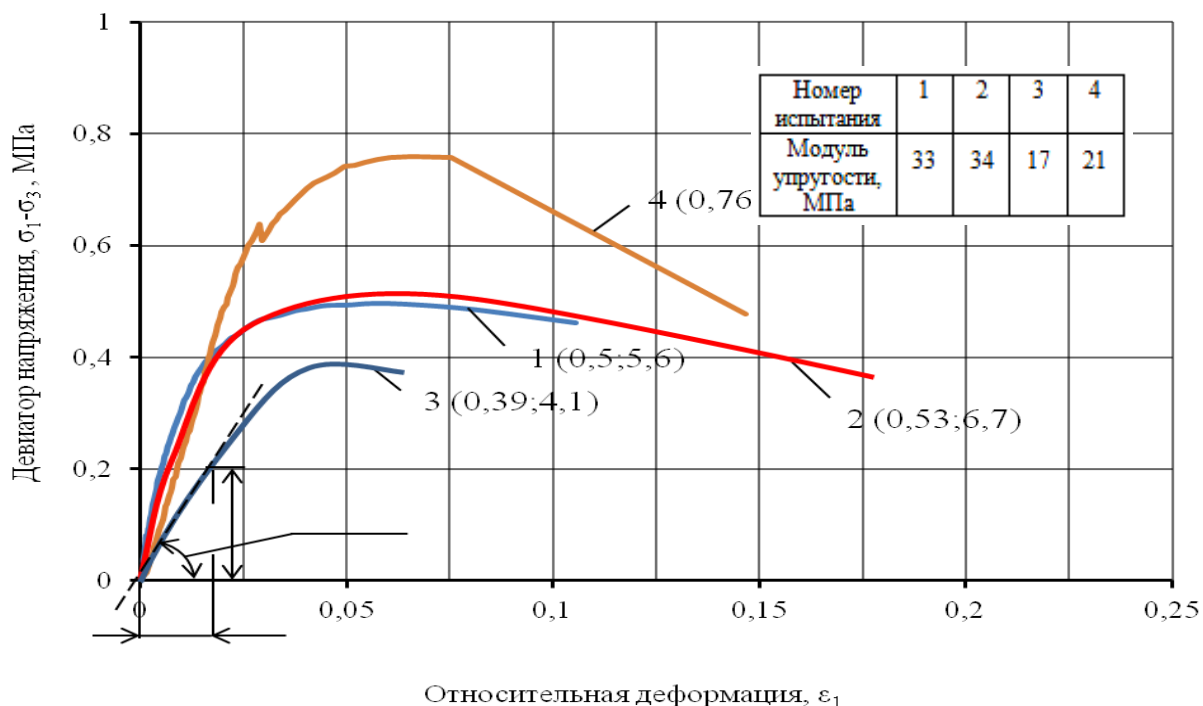


Рис. 5. Испытание образцов при всестороннем давлении 600 кПа:  
 1– фторопласт; 2– наждачная бумага; 3– смазка–вазелин; 4– смазка–литол-24



а)



б)

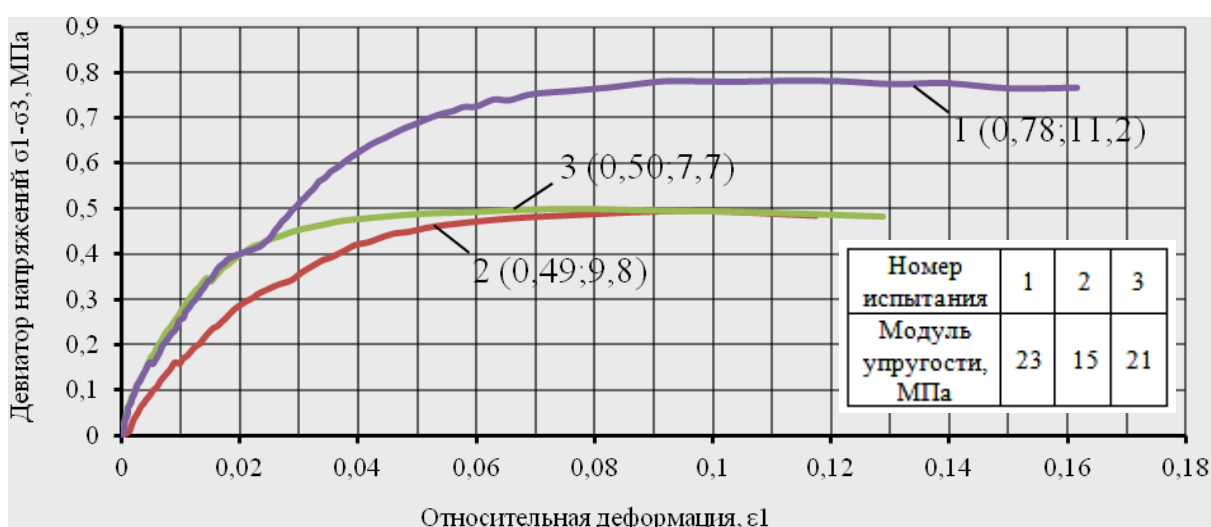
Рис. 6. Форма образца при разрушении

На рис. 6 показана форма образцов после их разрушения. В опытах наблюдалось увеличение диаметра образца не только в центральной части, но и у верхнего концевика (рис.6 а). Причем это явление характерно только для образцов со смазанными торцами. Из рис. 6 в видно как существенная неоднородность деформирования образца. Деформации наблюдаются преимущественно в верхней части образца. Причем четко видны разрывы и раскалывание под действием уплотненной клиновидной области, которая примыкает к основанию верхнего концевика прибора.

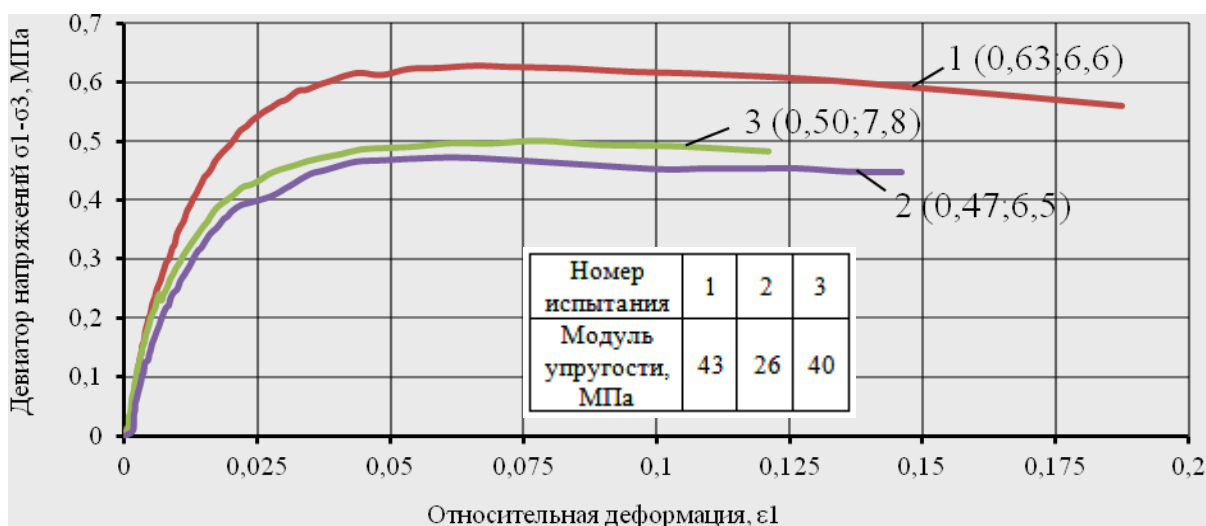
## 2. Влияние геометрических размеров образцов на характер деформации

**Подготовка образцов.** Подготовка образцов в этой серии опытов проводилась аналогично той методики, что использовалась в предыдущей серии испытаний.

**Методика испытаний.** Для оценки влияния отношения  $H/D$  на НДС были испытаны образцы с 3 разными отношениями высоты к диаметру:  $H/D = 1$ ;  $H/D = 1,5$ ;  $H/D = 2$ . Схема проведения испытаний была выбрана неконсолидированно-недренированная. Всестороннее давление задавалось в  $\sigma_3 = 200, 400$  и  $600$  кПа. Испытания выполнены на том же оборудовании, что и в первой серии опытов. Результаты испытаний приведены на рис. 7.

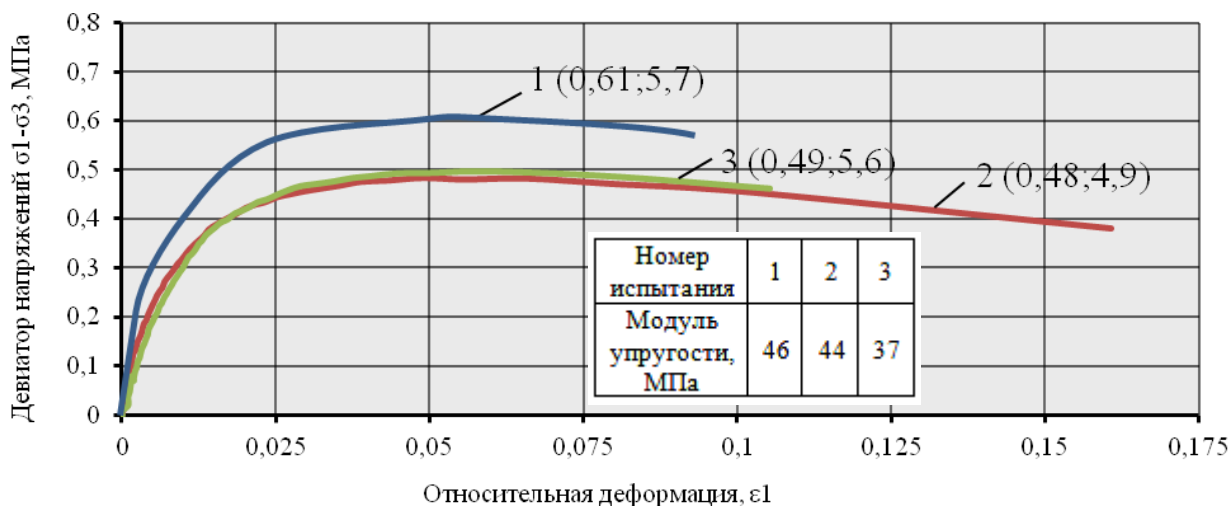


а)



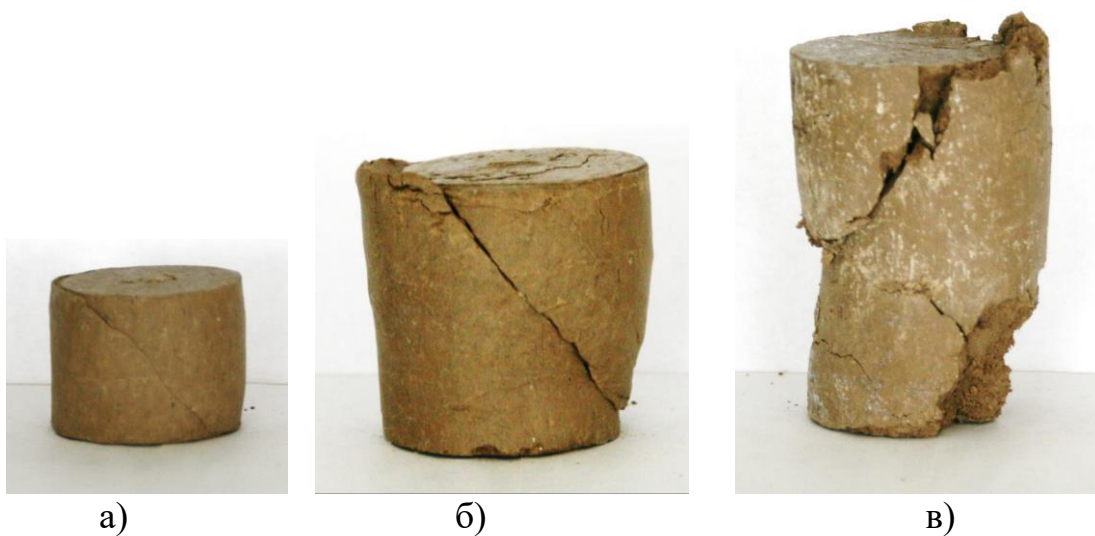
б)





в)

Рис. 7. Зависимость осевой деформации от девиатора напряжений при различном всестороннем давлении: а – 200 кПа; б – 400 кПа; в – 600 кПа; 1 –  $H/D = 1,0$ ; 2 -  $H/D = 1,5$ ; 3 -  $H/D = 2,0$



а)

б)

в)

Рис. 8 Форма деформации образцов глины: а)  $H/D = 1$  б)  $H/D = 1,5$  в)  $H/D = 2$

Из рис. 7 видно влияние отношения высоты к диаметру на характер деформации образцов глины. Образцы размером  $H/D=1,0$  обладают большей прочностью на сжатие, а образцы с отношением  $H/D=1,5$  и образцы с  $H/D=2$  имеют приблизительно одинаковые пределы прочности. При уменьшении отношения  $H/D$  явно увеличивается модуль упругости; разница модулей упругости грунта для образцов с  $H/D = 1$  и образцов с  $H/D = 2$  колеблется от 7,5 до 24%. Следует заметить, что как отечественный стандарт ГОСТ 12248-96, так и зарубежные ASTM, DIN, EN, BS рекомендуют испытывать образцы грунтов при отношении  $H/D = 2$ .

## Выводы

1. Введение в качестве смазывающего слоя медицинского вазелина значительно уменьшает прочность образца (от 7 до 17%). Вазелин размягчает торцевые стороны образца, из-за чего разрушение наступает раньше. Таким образом, вазелин применять в качестве смазки нельзя.

2. Литол-24 оказался неплохим средством для снижения трения. Результаты испытаний с литолом-24 отличаются от стандартных, однако довольно близки к последним, что позволяет говорить о возможности его применения в испытаниях.

3. Испытания «с абсолютным трением» показали, что наличие шероховатой поверхности между концевиками прибора и образцом приводит к неоднозначным результатам и делает их интерпретацию практически невозможной.

4. Исследования на влияние отношения  $H/D$  на прочность и деформируемость образцов глины показали, что образцы размером  $H/D=1,0$  обладают большей прочностью на сжатие, а образцы с отношением  $H/D=1,5$  и образцы с  $H/D=2$  имеют приблизительно одинаковые пределы прочности. При уменьшении отношения  $H/D$  явно увеличивается модуль упругости; разница модулей упругости грунта для образцов с  $H/D = 1$  и образцов с  $H/D = 2$  колеблется от 7,5 до 24%.

5. Для испытаний связного грунта необходимо готовить образцы настолько точно и однообразно, насколько это возможно, иначе неминуемо появляются серьёзные искажения в результатах, которые неизбежно затрудняет их оценку, поэтому использование образцов с отношением  $H/D=1$  является более выигрышным, чем использование образцов с  $H/D=2$ , как с точки зрения подготовки образцов, а так же с точки зрения статистики.

6. Видимый характер деформаций является достаточно индивидуальным, и каких-либо определённых зависимостей форм деформации от условий трения или отношения высота образца к диаметру в данном исследовании не выявлено.

## Литература

1. Bouvard D., Stutz P. Experimental study of reological properties of a sand using a special triaxial apparatus, *Geotechnical Testing Journal* vol. 9, No. 1, 10-18, March 1986.

2. Prashant A., Penumadu D. Influence of specimen shape and test boundary conditions on the stress-strain behavior of soil, 57th Canadian Geotechnical Conference, Oct. 2004.

3. Sachan A., Penumadu D. Strain Localization in solid cylindrical clay specimens using digital image analysis (DIA) technique, *Soils and Foundations* vol. 47, No. 1, 67-78, Feb. 2007.

4. Chu J., Lo S-C. R. Quality of the lubrication layer used in element tests on granular materials, *Soils and Foundations* vol. 34, No. 3, Sept. 2004.

5. Frost D., Yang C.-T. Effect of end platens on microstructure evolution in dilatant specimens, *Soils and Foundations* vol. 43, No. 4, 1-11, August 2003.

6. Tatsuoka F., Molenkamp F., Tsuyoshi T., Tsutomi H. Behavior of lubrication layers of platens in element tests, *Soils and Foundations* vol. 24, No. 1, 113-128, March 1984.

7. Shogaki T. Effect of specimen size on unconfined compressive strength properties of natural deposits, *Soils and Foundations* vol. 47, No. 1, 119-129, Feb. 2007.

8. ГОСТ 12248-96 Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости.

9. ГОСТ 5180-84 Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик.

10. ГОСТ 22733-2002 Грунты. Метод лабораторного определения максимальной плотности.

11. ОСТ 2 И70-3-92 Изделия абразивные культурно-бытового и хозяйственного назначения. Общие технические условия.