

2. Мангушев Р. А., Заварзин Л. Г. Карта изосет для квартальной застройки // Основания и фундаменты гражданских и промышленных зданий (в условиях слабых и мерзлых грунтов): Межвузовский тематический сборник / Л: ЛИСИ, 1990. – С. 97–104.
3. Antikoski U. V., Raudasmaa P. J. Use of geotechnical maps in planning under ground constructions. Large Rock Caverns // Proc. Int. Symp. Helsinki. – 1986. – Vol. 2. – P. 884–887.
4. Geo-informatics for geological & geotechnical researches of Kansai Ground. – Kansai: Geo-Research Institute, 2005. – 21 p.
5. Hrasna M., Vecko J. Engeneering geological models for land-use planning documents // Acta geol. et geogr. univ. comen. geol. – 1987. – № 42 – P. 137–148.
6. Zhussupbekov A. Zh., Alibekova N. T., Akhazhanov S. B., Shakirova N.U ., Alpysova A. B. Geotechnical Geo-Information System of Astana // Soil Mechanics and Foundation Engineering. – 2019. – Volume 55, Issue 6. – P. 420–424.

УДК 692.1

## **ОСОБЕННОСТИ ЛАБОРАТОРНЫХ ИСПЫТАНИЙ ГРУНТОВ НА ТРЕХОСНОМ ПРИБОРЕ**

*ЖУМАДИЛОВ И. Т.*

Евразийский национальный цнверитет им. Л. Н. Гумилева  
Нур-Султан, Казахстан

**Аннотация.** В статье кратко описаны методики испытаний грунтов трехосным сжатием. Трехосное сжатие грунтов находит все более широкое распространение при производстве инженерно-геологических исследований для обоснования проектов строительства различных инженерных сооружений. По результатам данной работы составлены рекомендации по практическому применению полученных характеристик грунтов для геоинформационной геотехнической базы данных г. Нур-Султан.

**Введение.** Дисперсные грунты нашли широкое применение при устройстве земляного полотна, в том числе их используют для замены особых и слабых торфяных и заторфованных грунтов в осно-

ваниях насыпей. Независимо от назначения грунтов необходимо выполнять их проверку по сопротивлению сдвигу, для которой выполняется расчет касательных напряжений или безопасных давлений. Для таких расчетов необходимы данные о величине угла внутреннего трения, сцепления, а иногда сопротивления недренированному сдвигу. Эти параметры принимают по данным нормативной литературы, а в ряде случаев находят экспериментально, выполняя требования. Отметим, что сцепление и угол внутреннего трения необходимы для расчета касательных напряжений не только по оригинальному критерию Кулона–Мора, но и ряда современных эмпирических и модифицированных условий пластичности. Эти параметры применяют для расчета безопасных давлений. Известно, что величина сцепления и угла внутреннего трения возрастает при увеличении коэффициента уплотнения, что требует приготовления лабораторных проб с плотностью сухого грунта, соответствующей как требуемым значениям, так и фактическим значениям.

Для грунтов с частичным водонасыщением таких, как глины, суглинки (в уплотнённом состоянии) расположенные выше уровня грунтовых вод недренированная прочность (сопротивление недренированному сдвигу) должна быть определена из НН-испытаний образцов, у которых коэффициент пористости и степень водонасыщения соответствует этим же параметрам в реальном массиве грунта (земляном полотне).

**1. Проведение испытаний.** В КН испытаниях образец сжимается в условиях полного дренирования при действии всестороннего давления (первый этап испытаний, характеризуемый напряжениями  $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ ), а при сдвиге дренирование не допускается (второй этап испытаний –  $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ ). Основным ограничением для КН испытаний является длительность проведения вследствие низкой проницаемости глинистых грунтов и малой скорости фильтрации поровой воды. КН-испытания могут быть выполнены быстрее, чем КД-испытания, а результаты дают примерно одинаковую предельную огибающую при ее построении в эффективных напряжениях. Следовательно, при КН-испытаниях с измерением порового давления прочность грунта может быть выражена функцией эффективных напряжений, а затем использована для решения задач, где есть дренирование. На рис. 1 приведены фрагменты испытаний суглинка

легкого и песка среднего по типу КН испытаний, а на рис. 2 показано определение сцепления и угла внутреннего трения суглинка легкого, выполненное построением кругов предельных напряжений и касательной (предельная прямая Кулона–Мора) к ним. Сопротивление недренированному сдвигу суглинка легкого выполнено при помощи НН-испытаний.

На рис. 1 приведены фрагменты испытаний суглинка легкого и песка среднего по типу КН испытаний, а на рис. 2 показано определение сцепления и угла внутреннего трения суглинка легкого, выполненное построением кругов предельных напряжений и касательной (предельная прямая Кулона–Мора) к ним. Сопротивление недренированному сдвигу суглинка легкого выполнено при помощи НН-испытаний.



Рис. 1. Испытание грунта

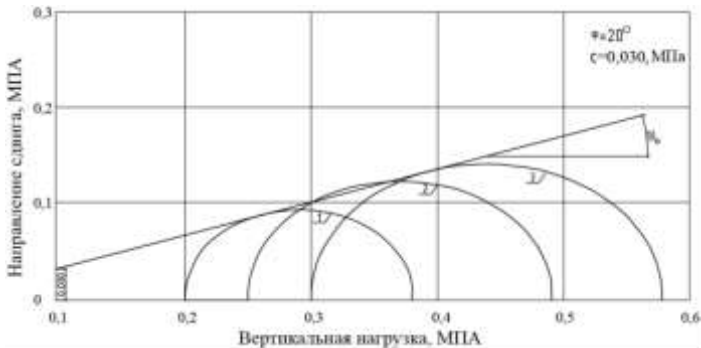


Рис. 2. Круги предельных напряжений и предельная прямая Кулона–Мора

Установленные значение параметров сопротивления сдвигу будут применены в дальнейшем для расчета касательных напряжений и безопасных давлений. При этом планируется вычислять необходимые для этих расчетов главные напряжения как по традиционным решениям, так и с использованием современных методик.

Испытание грунтов в приборах трехосного сжатия позволяют более правильно моделировать напряженное состояние грунта. Нами проводились опыты по методике ограниченного бокового расширения. Её применение обосновывается тем, что при загрузке грунта местной нагрузкой, он испытывает ограниченное расширение, подобное расширению элементарного объема в грунтовой среде.

Основные положения методики заключаются в следующем. В начале опыта создается гидростатическое равновесие главных напряжений. Затем ступенями образец грунта загружается вертикальной нагрузкой, при которой боковое давление сохраняется постоянным. Испытание проводится до разрушения образца. В результате каждого опыта определяются основные характеристики сжимаемости: модуль общей деформации и коэффициент поперечного расширения (коэффициент Пуассона).

Учитывая отсутствие достаточно полных рекомендаций по назначению величины  $\sigma_q$ , нами ставились специальные опыты на мелких песках в воздушно – сухом и уплотненном состояниях.

Величина модуля общей деформации грунтов определялась по формуле:

$$E = \frac{\sigma_z}{\lambda_z} (1 - 2\mu \frac{\sigma_q}{\sigma_z})$$

где  $E$  – модуль общей деформации, кг/см<sup>2</sup>;  
 $\sigma_z$  – вертикальное напряжение, кг/см<sup>2</sup>;  
 $\sigma_q$  – первоначальное боковое давление, кг/см<sup>2</sup>;  
 $\mu$  – коэффициент Пуассона.

Исследования проводились при различных первоначальных боковых давлениях  $\sigma_q$ , равных 0,2, 0,3 и 0,4 кг/см<sup>2</sup>. Указанные давления были выбраны с таким расчетом, чтобы не вызвать переуплотнение образцов и не исказить результаты опытов. С другой стороны, при малых величинах  $\sigma_q$  в большей степени сказывается влияние ошибок, неизбежных при проведении опытов в трехосном аппарате: силы трения грунта о резину, сжимаемость резиновой оболочки и т. д.

В общей сложности выполнено на указанных грунтах 18 опытов, часть результатов которых приведены на рис. 3 в виде графиков зависимости относительно деформаций  $\sigma_z$ , коэффициента поперечного расширения  $\mu$  и модуля деформации  $E$  от удельного давления  $\lambda_z$ .

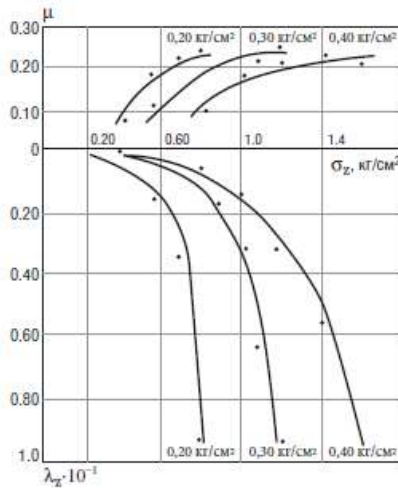


Рис. 3. Графики  $\lambda_z=f(\sigma_z)$  и  $\mu=f(\sigma_z)$  для мелкого влажного неуплотненного суглинка

Из графиков  $\lambda_z=f(\sigma_z)$  следует, что увеличение первоначального бокового давления вызывает уменьшение относительных деформаций образца при одинаковых вертикальных напряжениях. При этом растёт протяженность условного прямолинейного участка графика, сопровождаясь увеличением модуля деформации при равных вертикальных давлениях (рис. 3).

**2. Результаты испытаний.** Таким образом, характеристики деформируемости грунтов в значительной степени зависят от напряженного состояния или точнее – от соотношения главных напряжений. Этот вывод наглядно подтверждается и данными табл. 1, в которой представлены характеристики сжимаемости грунтов, определенные при различных соотношениях главных напряжений  $\sigma_z/\sigma_q$ .

Таблица 1

Характеристики сжимаемости грунтов

Наименование вида грунта	$\sigma_q$	$\sigma_z$	$\alpha = \frac{\sigma_z}{\sigma_q}$	$E$	$\mu$	Примечание
Песок мелкий влажный неуплотненный	0,20	0,20	1,0	370	–	
	0,20	0,40	2,0	175	0,08	
	0,20	0,60	3,0	51	0,18	
	0,20	0,70	3,5	18	0,22	
$\gamma_{ск}=1,60$ г/см <sup>3</sup>	0,20	0,80	4,0	–	0,23	Начало разрушения
Песок мелкий влажный неуплотненный	0,30	0,30	1,0	420	–	
	0,30	0,60	2,0	160	0,10	
	0,30	0,90	3,0	45	0,21	
	0,30	1,10	3,7	15	0,22	
$\gamma_{ск}=1,60$ г/см <sup>3</sup>	0,30	1,20	4,0	–	0,24	Начало разрушения
Песок мелкий влажный плотный	0,30	0,30	1,0	1130	–	
	0,30	0,60	2,0	464	0,11	
	0,30	0,90	3,0	254	0,15	
	0,30	1,20	4,0	90	0,25	
$\gamma_{ск}=1,69$ г/см <sup>3</sup>	0,30	1,40	4,7	–	0,27	Начало разрушения
Песок мелкий влажный плотный	0,40	0,40	1,0	1300	–	
	0,40	0,80	2,0	540	0,09	
	0,40	1,20	3,0	280	0,19	
	0,40	1,60	4,0	98	0,26	
$\gamma_{ск}=1,69$ г/см <sup>3</sup>	0,40	1,80	4,5	–	0,27	Начало разрушения

Как видно из табл. 1 увеличение соотношения главных напряжений приводит к уменьшению модуля деформации и росту коэффициента поперечного расширения. Однако, для каждого вида грунта при равных соотношениях  $\sigma_z/\sigma_q$  характеристики сжимаемости сохраняют сравнительно постоянное значение. Эта закономерность соблюдается независимо от величины первоначального бокового давления  $\sigma_q$ .

Полученный вывод является ответом на вопрос о величине бокового давления  $\sigma_q$  при проведении опытов в трехосном аппарате. Из него вытекает, что испытание необходимо проводить при двух-трех значениях  $\sigma_q$  с тем, чтобы установить соотношение главных напряжений, соответствующее условной границе уплотнение грунта. После этого можно определять характеристики сжимаемости.

В настоящее время имеет широкое распространение теории «гидростатического» распределения напряжений от собственного веса грунта. Поэтому величину первоначального бокового давления следует назначать не выше «бытового» из условия сохранения естественной плотности грунта в начале опыта.

На величину характеристик сжимаемости грунтов влияет также соотношение размеров испытываемых образцов. Учитывая это, нами опытным путем сравнивались варианты образцов при отношении высоты ( $h$ ) к диаметру ( $d$ ) от 0,3 : 1,0 до 1,1 : 1,0. За объект сравнений были приняты коэффициенты бокового давления и модуль общей деформации ( $E$ ). опыты по исследованию коэффициента давления проводились в условиях невозможности бокового расширения образца.

На рис. 4 приведены результаты опытов для макропористого лессовидного суглинка в виде зависимости  $\xi=f(h/d)$ . Из него следует, что с увеличением высоты образца при постоянном диаметре значения коэффициентов бокового давления возрастают. Такой характер изменения  $\xi$  объясняется, в основном, влиянием сил трения, имеющим место по контактной поверхности поршня с грунтом. При малых высотах образца это влияние становится существенным и обуславливает уменьшение величины коэффициента бокового давления. Здесь также сказывается и влияние резиновой оболочки, сжимаемость которой приводит к снижению бокового давления. При малых значениях отношения  $h/d$  величины модулей деформации

ции оказываются также заниженными. Это наглядно иллюстрируется данными табл. 2.

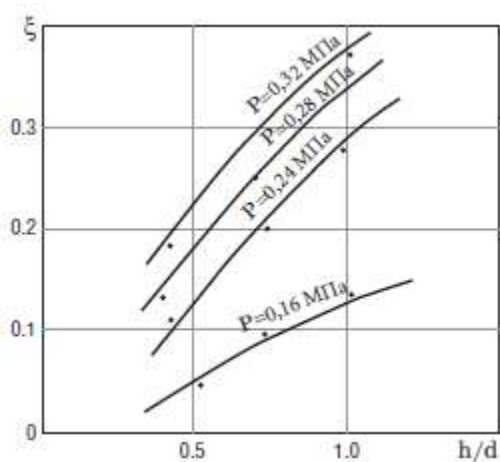


Рис. 4. Графики  $\xi = f(h/d)$  для микропористых суглинков

Таблица 2

Величина Модулей деформации опытных образцов грунта

№ п/п	Наименование вида грунта	d (мм)	h (мм)	h/d	Опыты в стабилометрах		E* (кг/см <sup>2</sup> )
					Кол-во опытов	E (кг/см <sup>2</sup> )	
1	Суглинок макропористый	56,5	59	1,05	3	111	144
		56,5	58	1,02	2	118	144
		56,5	53,5	0,95	3	108	144
		56,5	48	0,85	3	96	144
		56,5	20	0,35	3	87	144
2	Суглинок макропористый	56,5	54	0,95	3	148	146
		56,5	50	0,88	3	133	146
		56,5	30	0,53	3	100	146

Таким образом, достоверные характеристики сжимаемости грунтов получаются на образцах, имеющих соотношение  $h/d=1$ .

Изложенные выше уточнения методики ограниченного бокового расширения послужили основой для исследований сжимаемости грунтов, имеющих широкое распространение в г. Нур-Султан. Они



представлены в большинстве пылеватыми песками и макропористыми лессовидными супесями и суглинками.

Результаты испытаний грунтов в трехосном аппарате сравнивались с данными полевых опытов, проведенными на указанных грунтах штампами площадью 2500 см<sup>2</sup>, 5000 см<sup>2</sup> (в шурфах) и 600 см<sup>2</sup> (в скважинах). Полевые опыты выполнялись инженерами ТОО «KGS-Astana» при непосредственном участии авторов. При этом значения модулей деформации определялись на основе модели слоя ограниченной толщины, как более точно отражающей механические свойства исследуемых оснований.

Таблица 3

Результаты расчетов модулей деформации

№ п/п	Наименование вида грунта	e	S <sub>r</sub>	Значения модуля деформации E, кг/см <sup>2</sup>		
				штамп	стабилометр	
1	Пылеватый песок	0,688	0,26	156	134	1,16
	Пылеватый песок	0,645	0,23	210	169	1,22
	Пылеватый песок	0,577	0,20	289	224	1,29
	Пылеватый песок	0,711	0,37	160	155	1,03
2	Лесовидный макропористый суглинок	0,890	0,48	178	140	1,27
	Лесовидный макропористый суглинок	0,855	0,60	136	145	1,28
	Лесовидный макропористый суглинок	0,930	0,50	144	118	1,22
	Лесовидный макропористый суглинок	0,935	0,74	49	38	0,94
	Лесовидный макропористый суглинок	0,924	0,84	56	35	1,01
3	Лесовидная макропористая супесь	0,882	0,77	61	78	0,78
	Лесовидная макропористая супесь	0,843	0,85	62	55	1,13
	Лесовидная макропористая супесь	0,604	0,29	182	170	1,07

*Примечание:* e – коэффициент пористости грунта; S<sub>r</sub> – степень влажности грунта.

По табл. 3 модули деформации грунтов по результатам трехосных испытаний и полевых опытов отличаются между собой в среднем на 20–25 %. Это подтверждает возможность широкого исполь-

зования приборов трехосного сжатия в практике инженерно-геологических исследований грунтов.

**Заключение:**

1. Основные характеристики сжимаемости грунтов – модуль общей деформации и коэффициент поперечного расширения – зависят от соотношения главных напряжений. Увеличение последних приводят к росту коэффициента поперечного расширения и уменьшению модуля общей деформации.

2. Исследование сжимаемости грунтов в трехосном аппарате по уточненной нами методике ограниченного бокового расширения позволяет определить значение модулей общей деформации, удовлетворительно согласующимся с результатами полевых испытаний.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буш И. В. Результаты определения параметров сопротивления грунтов сдвигу в приборе трехосного сжатия // Молодой ученый. – 2016. – № 12. – С. 220–223.

2. Filatov A. V., Galinska L. A., Ischanova A. Sh. Determination of deformation characteristics on a triaxial compression device // International Scientific and Practical Conference "Improving the quality of education and research" in the framework of the VII Satpaev readings, (in Kazakhstan). – 2008. – pp. 537–543.

3. Zhussupbekov A. Z., Zhakulin A. S., Zhakulin A. A., Zhussupbekov A. A. (2003): Influence of soil properties on mechanical characteristics of saturated bases. Proceedings of the Twelfth Asian Regional Conference on soil mechanics and geotechnical engineering (12ARC). – Singapore. – 2003. – pp. 231–236.

4. Филатов А. В., Базаров Б. А., Галинская Л. А., Унайбаев Б. Ж., Арсенин В. А. Сравнительные данные деформационных характеристик при испытании грунтов в одометре и стабилometре // Международная научно-практическая конференция «Повышение качества образования и научных исследований» в рамках VII Сатпаевских чтений, 10–12 апреля, 2008. – С. 531–537.