

## Определение деформационных характеристик грунтов различными методами

Болдырев Г.Г., Арефьев Д.В., Гордеев А.В.  
ООО «НПП Геотек»

Определение деформационных характеристик грунтов, а именно модулей деформации ( $E, G, K$ ) и коэффициента Пуассона ( $\nu$ ), согласно ГОСТ 12248-96 (1997), рекомендуется выполнять в настоящее время с использованием методов компрессионного и трехосного сжатия.

В приборе трехосного сжатия (стабилометр) можно определить не только модули деформации, коэффициент Пуассона, давление предварительного уплотнения, но и коэффициент бокового давления. В связи с тем, что приборы трехосного сжатия значительно дороже, то для определения коэффициента бокового давления стали использовать одометры с гибкими или жесткими границами на боковой поверхности образца грунта.

Фактически испытания в стабилометре по схеме  $K_0$  без возможности бокового расширения образца грунта подобны испытаниям в одометре с измерением бокового давления (Медков, 1959). Однако в стабилометре трудно обеспечить идеальную невозможность бокового расширения грунта, вследствие податливости гибкой границы (резиновой оболочки) вследствие сжимаемости жидкости. В компрессионном приборе в одометре с жесткими границами расширение грунта невозможно конструктивно. Известно, что даже небольшие деформации грунта в радиальном направлении приводят к изменению коэффициента бокового давления существенным образом.



В 1985 году Dyvik et al. предложили конструкцию одометра с гибкой границей и измерением бокового давления. Схема одометра приведена на рис. 1. В центральной части жесткого кольца находится тефлоновая мембрана. За

этой мембраной расположена кольцевая камера по периметру образца, которая заполнена дегазированной водой. Горизонтальное давление в камере измеряется тензометрическим датчиком давления.

Конструкция подобного одометра, но с жесткой границей и измерением бокового давления, была разработана в МИСИ им. В.В.Куйбышева (сегодня МГСУ) в 1986 году в лаборатории В.Ф.Сидорчука показана на рис. 2. В отличие от известных конструкций одометра в одометре МИСИ применены жесткие датчики давления (месдозы, Баранов Д.С., 1971) с гидравлическим

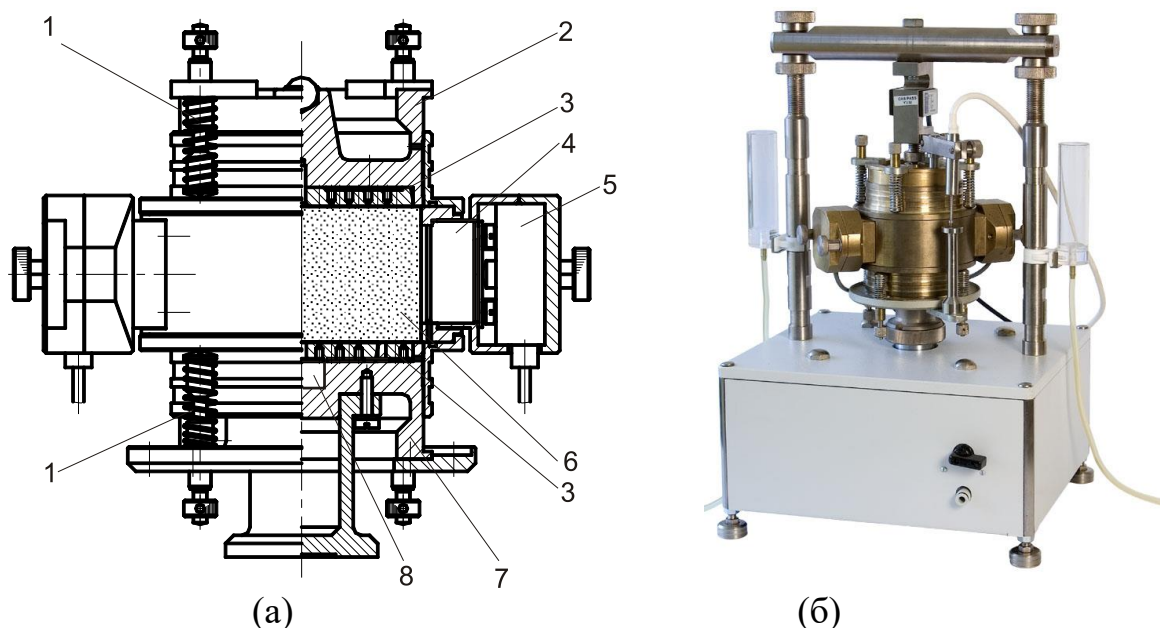


Рис. 2. Одометр конструкции МИСИ (а) и компрессионный прибор конструкции ООО «НПП Геотек» (б) ([www.geotek.ru](http://www.geotek.ru)): 1 – пружина; 2 – верхний штамп; 3 – фильтр; 4 - датчик силы; 5 – образец грунта; 6 – нижний штамп; 7 – датчик порового давления

усилителем. Это практически исключает податливость самих датчиков, что позволяет измерять боковое давление при отсутствии смещения вертикальной границы. Два датчика встроены в боковую поверхность жесткой обоймы, в которую помещается образец грунта. Образец грунта имеет высоту 50 мм. Осевая нагрузка прикладывается с двух торцов образца, что снижает влияние сил трения между образцом и боковой поверхностью жесткой цилиндрической обоймы. Одометр имеет датчик порового давления, который расположен в центральной части нижнего штампа. В результате испытаний, приведенные в работе Жамбакиной З.М. (1989), было установлено, что с увеличением податливости (возможность боковых перемещений стенки прибора) уменьшается интенсивность приращения бокового давления при сжатии образца грунта. Так, испытания мелкого песка средней плотности ( $\rho_d = 1,60$  г/см<sup>3</sup>) показали уменьшение отношения главных напряжений  $\sigma_3/\sigma_1$  с 0,456 при боковых перемещениях стенки 16 мкм до 0,340 при перемещении стенки на 33 мкм.

Результаты испытаний в компрессионном приборе с измерением бокового давления и жесткими стенками были опубликованы ранее и их можно найти в статье Болдырева и Сидорчука (2003). Следует только отметить то, что в выполненных ранее опытах вертикальное давление на образец грунта создавалось ступенями с выдержкой до стабилизации деформаций по ГОСТ 12248-96.

Метод компрессионного сжатия, приведенный в ГОСТ 12248-96, предусматривает только ступенчатое нагружение образцов грунта со стабилизацией деформаций во времени от 4 до 24 часов, в зависимости от вида грунта. В этом случае продолжительность испытаний одного образца глинистого грунта, например, мягкопластичной консистенции может составить до 3-4 суток.

Известно также, что испытания в одометре при нагружении ступенями не подходят для искусственно упрочненных грунтов, так как их жесткость не только возрастает с нагрузкой, но также возрастает в процессе старения композитного материала, которым является упрочненный грунт. Когда испытываются упрочненные грунты эффект зависимости стабилизации от времени может изменять определяемые характеристики сжимаемости, в особенности если испытания продолжительны.

Испытаниям с использованием ступенчатого нагружения присущи следующие недостатки.

1. Испытания продолжаются несколько дней или недель.
2. Значения коэффициентов консолидации трудно оценить объективно, так как при его определении используется метод подгонки данных испытаний к известному решению (методы «логрифтм времени» и «корень квадратный из времени»).

Испытания в стабилметре также занимают несколько суток или даже недель, так как каждое приращение нагрузки сохраняется постоянным до тех пор, пока поровое давление не стабилизируется или не будет достигнута заданная величина стабилизации деформации.

Альтернативными испытаниями являются испытания с постоянной скоростью деформации (CRS), позволяющие оценить сжимаемость в зависимости от эффективных напряжений за более короткое время. Метод данных испытаний в одометрах с постоянной скоростью консолидации был предложен Smith and Wahls (1969) и позднее в модифицированном одометре Rowe Sheahan and Watters (1996). В этих опытах избыточное поровое давление допускается, но при условии, что оно небольшое или приращения нагрузки небольшие и вызывают только упругие деформации. Следует заметить, что испытания в действительности являются испытаниями с постоянной скоростью перемещения, так как высота образца не стандартизирована. Высота образца изменяется в течение опытов, но деформация выражается через начальную высоту, которая остается постоянной. Следовательно, постоянная скорость деформации является приемлимой только для одного образца. Скорость деформации должна быть медленной, такой чтобы поровое давление не влияло на результаты испытаний.

CRS испытания являются стандартными испытаниями естественных грунтов в Швеции, Норвегии, Соединенных штатах (ASTM D 4186-97) и Франции. Hamilton and Crawford (1959) были первыми, кто описал CRS испытания, но Smith and Wahls (1969) первыми предложили методику интерпретации данных испытаний. Скорость деформации в испытаниях шаговым нагружением (ступенями) изменяется со временем, а скорость деформации в CRS испытаниях является постоянной и отличной от первой. Поэтому сопоставление результатов испытаний по двум методам следует проводить с осторожностью, только если скорость деформации одинакова.

CRS испытания были вначале разработаны для определения параметров сжимаемости, но не параметров консолидации, зависящие от времени. Это было обусловлено тем, что параметры сжимаемости являются основными при расчете деформации оснований. Однако, в некоторых случаях, более важно определить не конечную осадку, а изменение осадки во времени (скорость осадки). В этом случае, оригинальную методику использовать нельзя, так как она основана на отсутствии избыточного порового давления. Сравнительно недавно, разработан анализ, способный учитывать некоторую величину избыточного порового давления (Lee and Sills 1979), поэтому сегодня можно определять параметры консолидации из CRS опытов.

В испытаниях с постоянной скоростью нагружения, скорость деформации принимается и поддерживается постоянной в течение опыта. Эта скорость зависит главным образом от проницаемости и сжимаемости грунтов. В течение этих испытаний поровое давление изменяется в образце по параболической зависимости (рис. 3). Эта зависимость не постоянная, так как поровое давление возрастает в течение опыта до достижения максимума внешней нагрузки. Дренаживание одностороннее, по направлению к поверхности образца. Поровое давление измеряется в нижней части образца. Решение данной задачи с вертикальным дренаживанием было получено Wissa et al. (1971). Ис-

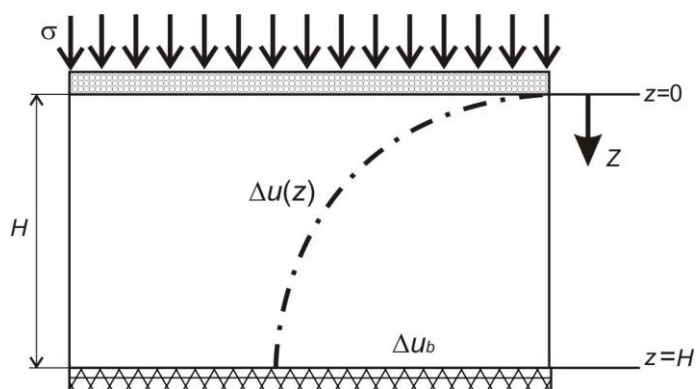


Рис. 3. Граничные условия в опытах с постоянной скоростью деформации

пользуя теорию бесконечно малых деформаций с нелинейным поведением грунта Wissa et al. получили решение для среднего эффективного вертикального напряжения  $\sigma'_v$  и коэффициента консолидации,  $c_v$  в виде:

$$\sigma'_v = (\sigma_v^3 - 2\sigma_v^2 u_b + \sigma_v u_b^2)^{1/3} \quad (1)$$

$$c_v = -\frac{H^2 \lg\left(\frac{\sigma_{v2}}{\sigma_{v1}}\right)}{2\Delta t \lg\left(1 - \frac{u_b}{\sigma_v}\right)}, \quad (2)$$

где:  $\sigma_v = (\sigma_{v1} + \sigma_{v2})/2$  - среднее полное вертикальное напряжение;  $u_b$  - среднее избыточное поровое давление на недренированной нижней границе;  $H$  - текущая высота образца;  $\sigma_{v1}, \sigma_{v2}$  - полное вертикальное напряжение во времени  $t_1, t_2$ , соответственно;  $\Delta t = t_2 - t_1$ .

Для условий горизонтального дренирования решение приведено в работе Yune et al. (2005) и получено в предположении деформации в вертикальном направлении, несжимаемости воды и твердых частиц грунта и полного водонасыщения грунта с использованием дифференциального уравнения консолидации с дренированием в горизонтальном направлении. Среднее эффективное вертикальное напряжение и коэффициент консолидации в горизонтальном направлении определяются из выражений:

$$\sigma'_v = \sigma_v - \frac{1}{2} u_c, \quad (3)$$

$$c_r = \frac{R^2 \sigma'_v \lg\left(\frac{\sigma'_{v2}}{\sigma'_{v1}}\right)}{1,736 u_c \Delta t}, \quad (4)$$

где:  $u_c$  - поровое давление в центре образца.

Если известна высота образца грунта  $H$ , скорость деформации  $\dot{\varepsilon}_1$ , избыточное поровое давление  $\Delta u_B$  в нижней части образца (при  $z = H$ ) и удельный вес воды  $\gamma_w$ , то коэффициент фильтрации определяется из выражения:

$$k = \frac{1}{2} \frac{\gamma_w}{\Delta u_B} \dot{\varepsilon}_1 H^2. \quad (5)$$

На рис. 4 приведены результаты испытаний выполненные Seah et al. (2003) для глины ненарушенной структуры. Опыты были выполнены с использованием стандартного метода испытаний (OED) и с контролем скорости деформации (CRS). В последнем случае опыты проводились с вертикальным (CRS-V) и горизонтальным (CRS-R) дренированием. Результаты двух различных методов компрессионных испытаний совпадают, причем совпадают и значения коэффициента консолидации, полученные путем вычислений с

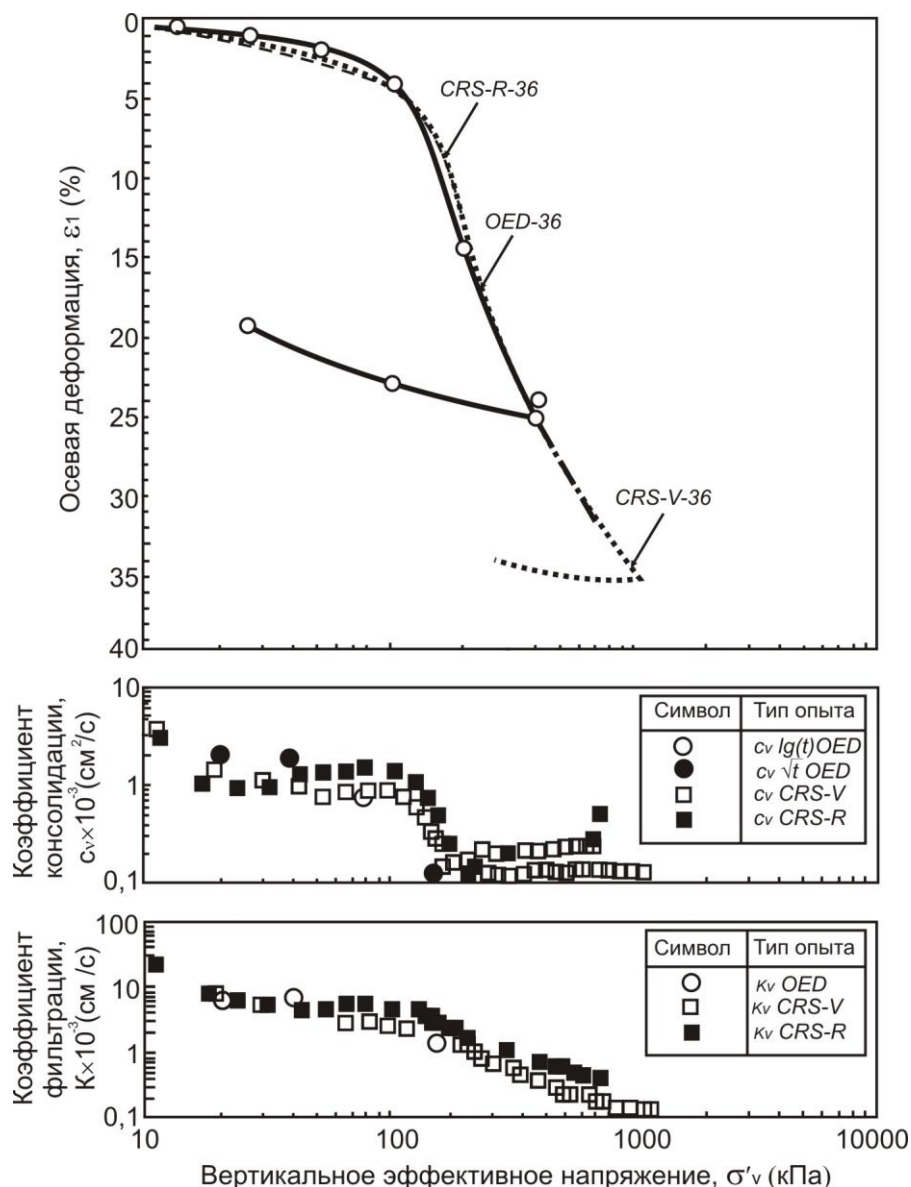


Рис. 4. Результаты испытаний в одометрах CRS-R, CRS-V и стандартном одометре OED (Seah et al. 2003)

использованием функций  $s = f(\sqrt{t})$ ,  $s = f(\lg t)$  и по формуле (2). При этом следует иметь в виду простоту определения коэффициент консолидации  $c_v$ , используя непосредственно данные измерений и выражение (2) по сравнению с принятым в ГОСТ 12248-96 (приложение Н) методом квадратного корня ( $s = f(\sqrt{t})$ ) или логарифмическим методом ( $s = f(\lg t)$ ). В последнем случае приходится выполнять дополнительные графические построения для определения начала и окончания процесса консолидации.

В 2009 году в ООО «НПП Геотек» была разработана конструкция компрессионного прибора с целью использования метода CRS для испытаний грунтов. Конструкция одометра и прибора показана на рис. 5. На рис. 6 приведена схема управления испытаниями в компрессионном приборе.

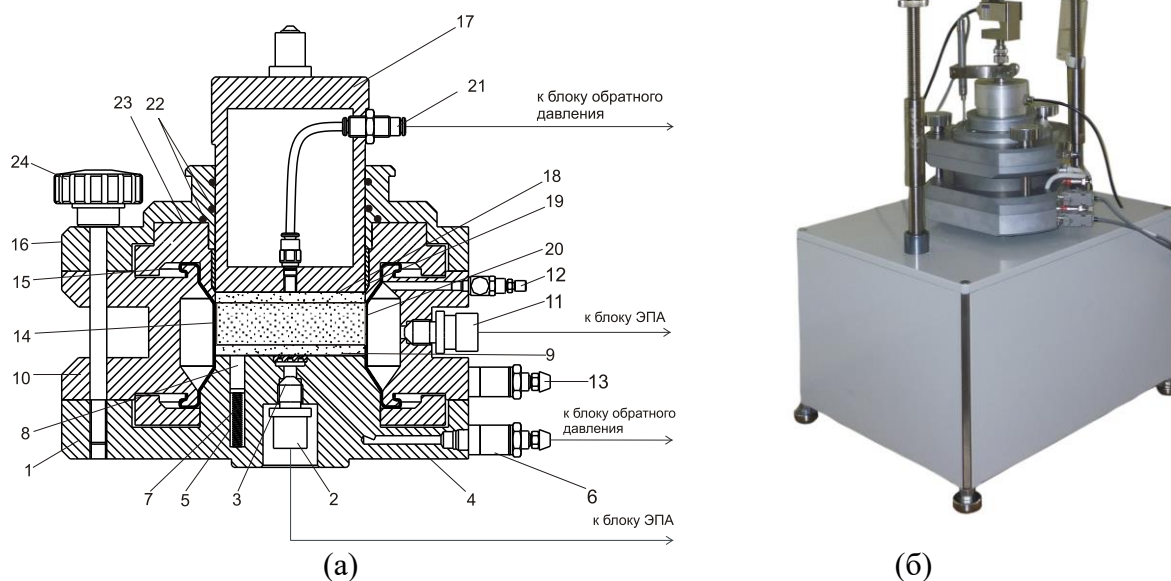


Рис. 5. Одометр (а) и компрессионный прибор измерением боковых напряжений конструкции ООО «НПП Геотек» (б) ([www.geotek.ru](http://www.geotek.ru))

Компрессионный прибор состоит из следующих основных частей: нагрузочного устройства, одометра, блока обратного давления и блока управления. Нагрузочное устройство (рис. 5 б) включает основание 1 с шаговым двигателем 2, датчик силы 3, датчик осевого перемещения 4.

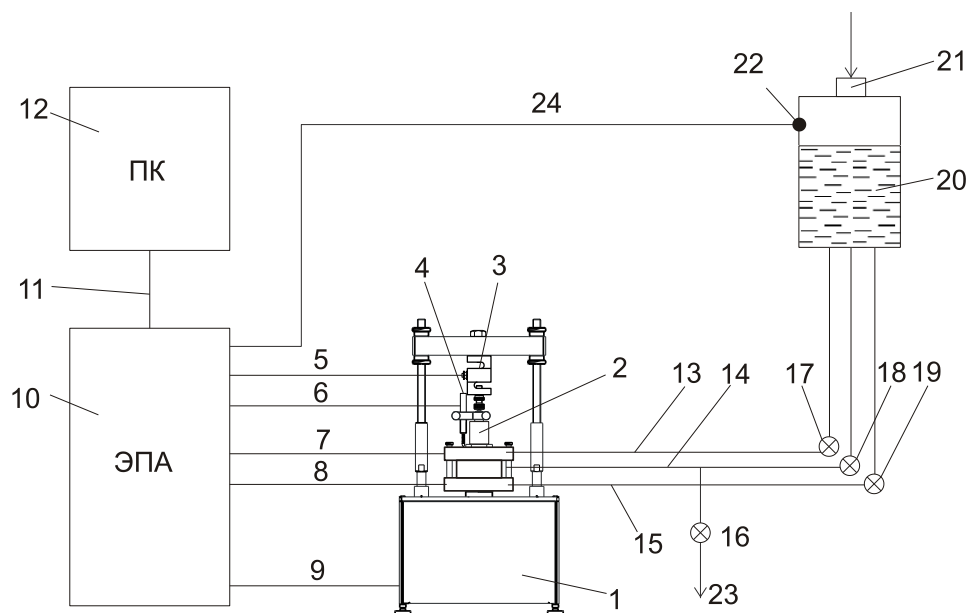


Рис. 6. Схема управления компрессионными испытаниями

Одометр (рис. 5 а) состоит из основания 1, датчика порового давления в центре основания 2, керамический фильтр 3, канал для создания обратного



давления 4 и три несквозных цилиндрических отверстия 5 и штуцер 6. В отверстия 5 вставлены на пружинах 7 три подвижных штока 8 на, которые опирается перфорированная платформа 9. Рабочая камера выполнена из стальной или прозрачной оболочки 10 в боковую поверхность, которой встроен датчик давления 11, спускной кран 12, и штуцер 13. Цилиндрическая резиновая оболочка 14 закреплена на выступах 15 оболочки 10. Крышка 16 одометра включает полый поршень 17, керамический фильтр 18, стальное кольцо 19 с образцом грунта 20, трубопровод 21, уплотнительные кольца 22 и опорное кольцо 23. Основание 1, оболочка 10 и крышка 16 соединены тремя винтами 24.

Блок обратного давления (рис. 6) состоит из резервуара 20, трубопроводов 13,14,15, штуцера 21, кранов 16,17,18,19, датчика давления 22 и кабеля подключения 24 к блоку электронной преобразующей аппаратуры (ЭПА).

Блок управления компрессионным прибором (рис. 6) включает компьютер 12, интерфейс 11, блок ЭПА 10 для усиления и преобразования сигналов в цифровой вид с датчиков давления, силы и перемещения.

В отличие от компрессионного прибора конструкции Сидорчука В.Ф (рис. 2 а) в предлагаемой конструкции используется гибкая граница в виде резиновой оболочки, а условия невозможности бокового расширения обеспечиваются несжимаемостью дегазированной жидкости в рабочей камере прибора. В этом есть преимущество и недостаток. Преимущество в том, что на границе между образцом грунта и резиновой оболочкой отсутствуют силы трения, недостаток в том, что жидкость имеет небольшую сжимаемость.

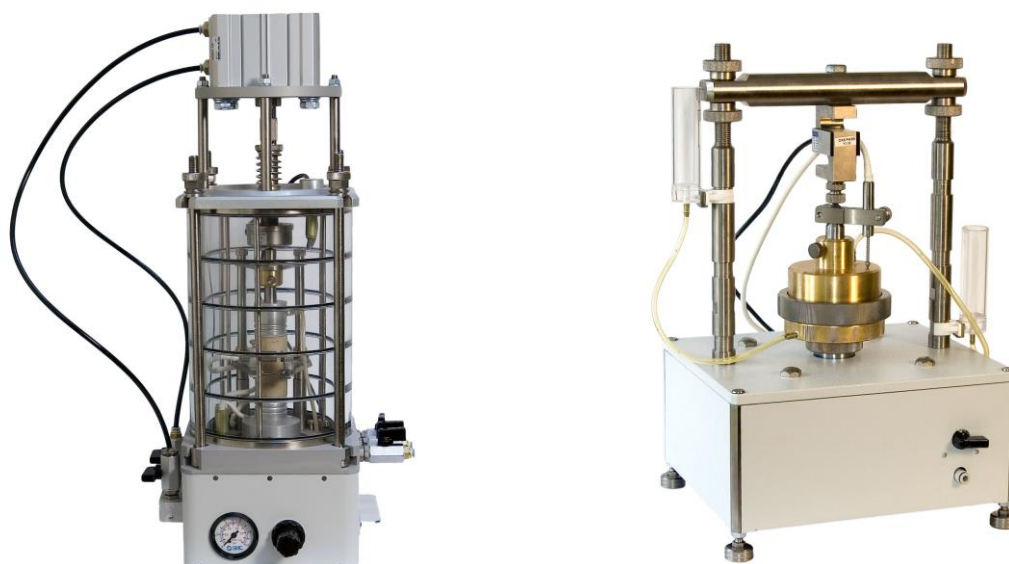


Рис. 7. Стабилометр (а) и стандартный компрессионный прибор (б) конструкции ООО «НПП Геотек» ([www.geotek.ru](http://www.geotek.ru))

С целью сравнения различных методов определения модуля деформации в лаборатории ООО «НПП Геотек» была проведена серия опытов с образцами глины нарушенной структуры. Исследовались следующие методы:



- метод компрессионного сжатия по ГОСТ 12248-96;
- метод трехосного сжатия по ГОСТ 12248-96;
- метод ASTM D 4186 в модифицированном компрессионном приборе;
- метод релаксации напряжений.

Физические характеристики образцов глины приведены в табл. 1. Водонасыщение образцов выполнялось в специальной камере методом вакуумирования до их размещения в приборах. Методику водонасыщения и оборудование можно найти на сайте [www.geoteck.ru/](http://www.geoteck.ru/). Опыты были выполнены в компрессионном приборе с измерением боковых напряжений с жесткими (рис. 2) и гибкими (рис. 5) границами, стабилометре (рис. 7 а) и стандартном компрессионном приборе (рис. 7 б).

Табл. 1. Физические характеристики глины

$\omega$ , д.е.	$\omega_L$ , д.е.	$\omega_P$ , д.е.	$I_P$ , д.е.	$I_L$	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$\rho_d$ , г/см <sup>3</sup>	$\rho_s$ , г/см <sup>3</sup>	$n$ , д.е.	$e$	$S_r$
0,3	0,41	0,21	0,20	0,45	1,93	1,49	2,70	0,45	0,819	0,989

Условия нагружения в стабилометре, стандартном компрессионном приборе и компрессионном приборе с измерением боковых напряжений и жесткой границей приняты по ГОСТ 12248-96, т.е. ступенями и до стабилизации деформаций. Испытания в модифицированном компрессионном приборе (рис. 5) выполнялись по стандарту ASTM D 4186 с измерением бокового давления и контролем коэффициента порового давления ( $u_b / \sigma_v$ ), здесь  $u_b$  - избыточное поровое давление на недренируемой нижней границе образца грунта, а  $\sigma_v$  - вертикальное давление.

Выполненные ранее исследования (Smith and Wahls, 1969; Gorman et al., 1978) показывают, что контроль изменения порового давления при непрерывном нагружении практически невозможно использовать для оценки процесса стабилизации деформаций. Поэтому было предложено использовать (Smith and Wahls, 1969) коэффициент, который является отношением порового давления к полному напряжению ( $u_b / \sigma_v$ ), как индикатор изменения порового давления. Из их исследований следует, что этот коэффициент не должен быть более 0,5. Gorman et al. (1978), предлагают значение коэффициента не более 0,3-0,5, основываясь на сравнительных опытах CRS, нагружением ступенями и опытов с контролем градиента поровой воды. В стандарте ASTM D 4186 рекомендуется принимать этот коэффициент, равным 0,3.

Во всех опытах, наблюдается наибольшее значения коэффициента порового давления вначале нагружения, а затем он уменьшаются до значений ниже 0,06 для образцов с нарушенной структурой и ниже 0,35 с ненарушенной структурой. Значения коэффициента порового давления возрастают с ростом скорости деформации. CRS испытания даже в случаях, когда значение коэффициента порового давления выше предела в 50%, показывают хорошее совпадение в компрессионных кривых и  $c_v$ ,  $c_r$  параметров с данными нагружения ступенями. В обсуждаемых ниже опытах коэффициент порового дав-

ления не контролировался, а скорость осевого нагружения была принята равной 0,006 мм/мин. Это значение было принято из результатов стандартных компрессионных испытаний как отношение конечной осадки штампа к времени испытаний.

Как видно из рис. 8 на графике зависимости изменения коэффициента порового давления с ростом вертикального давления имеется минимум, который соответствует величине давления предварительного уплотнения  $\sigma_p$ . На этом рисунке приведены результаты испытаний в двух различных компрессионных приборах. В первом случае использовался стандартный компрессионный прибор (рис. 7 б) с модифицированным одометром и жесткой границей, что позволяет проводить испытания по схеме CRS с измерением порового давления. Модификация заключалась в использовании датчика порового давления и обеспечения условий односторонней фильтрации, в соответствии с расчетной схемой рис. 3. Во втором случае был применен компрессионный прибор с гибкой боковой границей, конструкция одометра которого показана на рис. 5 а. В обоих случаях величина давления предварительного уплотнения полученная в различных одометрах отличается незначительно, но характер зависимости  $u_b / \sigma = f(\sigma)$  получен различным.

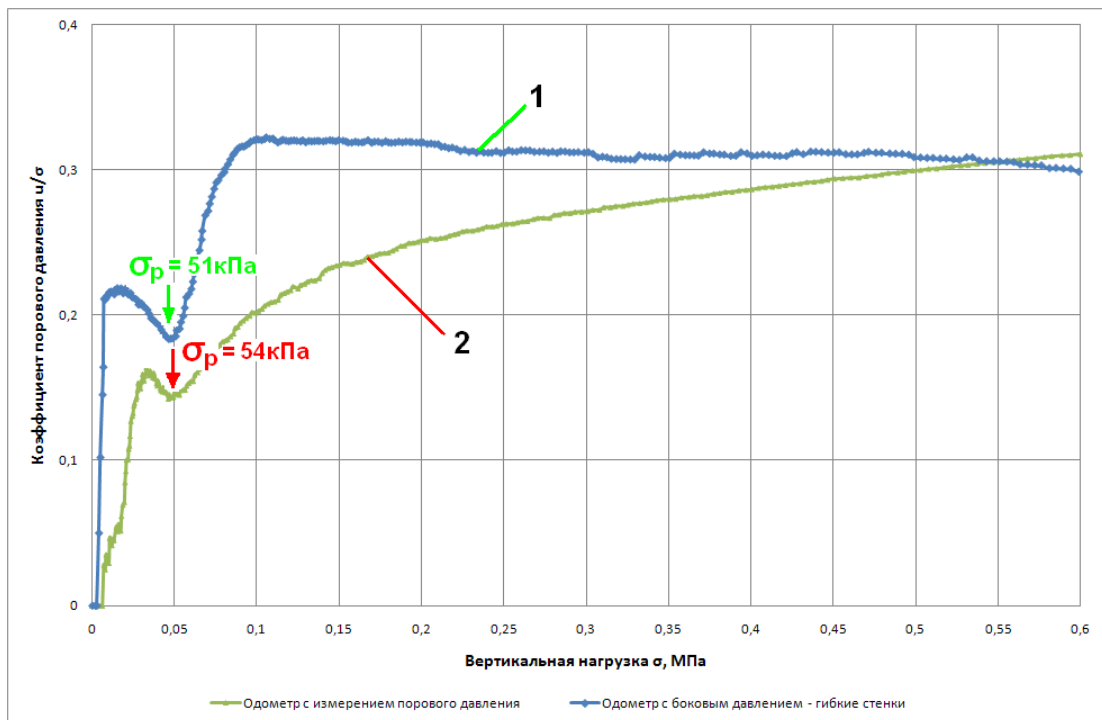


Рис. 8. Изменение коэффициента порового давления с ростом вертикального давления

При проведении компрессионных испытаний методом релаксации напряжений была применена методика, приведенная в патенте Труфанова А.Н. (2006), разработанная в НИИОСП им. М.Н.Герсеванова. В этом методе грунт испытывают в режиме релаксации напряжений, а по конечным значениям напряжений и соответствующих деформаций образца при завершении каждой из ступеней строят компрессионную кривую. При этом после достиже-

ния заданной величины деформирования образца грунта на каждой ступени дополнительную осадку образца грунта ограничивают путем частичного сбрасывания нагрузки, приближая к условной стабилизации напряжений или деформаций образца.

Результаты испытаний в условиях компрессионного сжатия различными методами приведены на рис. 9. В табл. 2 приведено сравнение значений модулей деформации, полученные в условиях компрессионного и трехосного сжатия. Как видно из табл. 2 продолжительность испытаний существенным образом зависит от выбранного метода испытаний. Компрессионные испытания методом CRS почти до 10 раз быстрее компрессионных испытаний по ГОСТ 12248-96. Значения компрессионного модуля деформации для принятых условий испытаний и глинистого грунта различаются незначительно. Модуль деформации, полученный из трехосных испытаний от 4,8 до 5,3 раз оказался более значений полученных в условиях компрессионного сжатия. Наибольшая продолжительность испытаний имеет место в случае испытаний в одометре с измерением боковых напряжений с жесткой границей. Это объ-

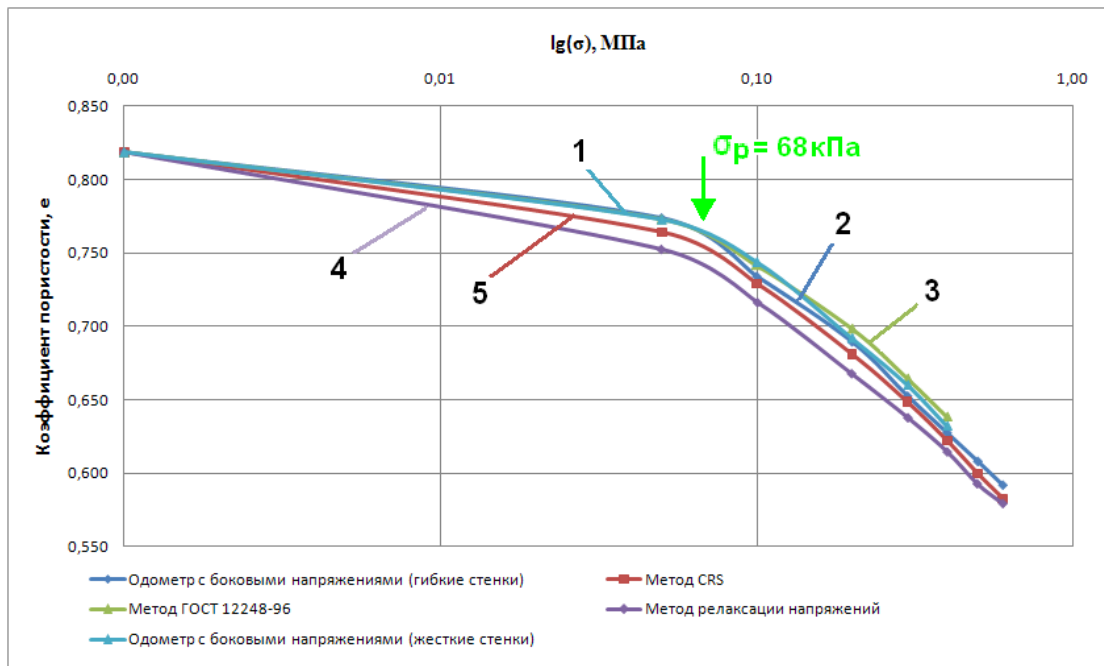


Рис. 9. Сравнение различных методов компрессионных испытаний:

1 – одометр с измерением боковых напряжений и жесткой границей, ступенчатое нагружение ГОСТ 12248-96; 2 - одометр с измерением боковых напряжений, гибкой границей и непрерывным нагружением; 3 – стандартный одометр, ступенчатое нагружение ГОСТ 12248-96; 4 – одометр с релаксацией напряжений

ясняется тем, что высота образца грунта в этом одометре равна 50 мм, а в других она стандартная и равна 25 мм.

На рис. 9 также показано давление предварительного уплотнения, которое равно 68 кПа. Это давление определено с использованием стандартной процедуры, которая используется на практике, и была предложена ранее Каза-

Табл. 2. Значения модулей деформации, полученные различными методами

Метод испытания	Модуль деформации E, МПа						Продолжи- тельность испытаний, час:мин
	Вертикальное давление, $\sigma_v$ , МПа						
	0,05- 0,1	0,1-0,2	0,2-0,3	0,3-0,4	0,4- 0,5	0,5- 0,6	
ГОСТ 12248-96	1,9	2,67	3,35	4,45	-	-	82:25
CRS стандартный одеметр	1,61	2,36	3,45	4,33	5,05	6,72	8:25
Релаксация напряже- ний, стандартный одеметр	1,58	2,3	3,81	4,85	5,08	8,53	9:45
CRS, одомер с изме- рением боковых напряжений (гибкая граница)	1,48	2,64	3,15	4,55	5,94	7,03	7:40
ГОСТ 12248-96, одеметр с измерени- ем боковых напряже- ний (жесткая граница)	-	2,33	3,72	4,29	-	-	174:30
Трехосное сжатие		12,95 $\sigma_3 =$ 100кПа а	17,06 $\sigma_3 =$ 200 кПа	23,37 $\sigma_3 =$ 300 кПа			62:00

гранде. Эта же характеристика может быть определена прямым способом используя результаты испытаний в компрессионном приборе с измерением бокового давления (рис. 10). Используя зависимость  $\sigma_h = f(\sigma_v)$ , которая является билинейной можно найти величину давления предварительного уплотнения  $\sigma_p$ , которое находится непосредственно из опыта, а не путем дополнительных графических построений как в методе Казагранде. Точка перелома на графике зависимости  $\sigma_h = f(\sigma_v)$  соответствует давлению предварительного уплотнения. Если сравнить значения  $\sigma_p$ , полученные рассмотренными методами (рис. 8, 9, 10) то можно увидеть, что получены разные значения от 51 до 75 кПа. Если теперь за эталон взять метод Казагранде, то различия не кажутся существенными и находятся в диапазоне от +9 до - 13%.

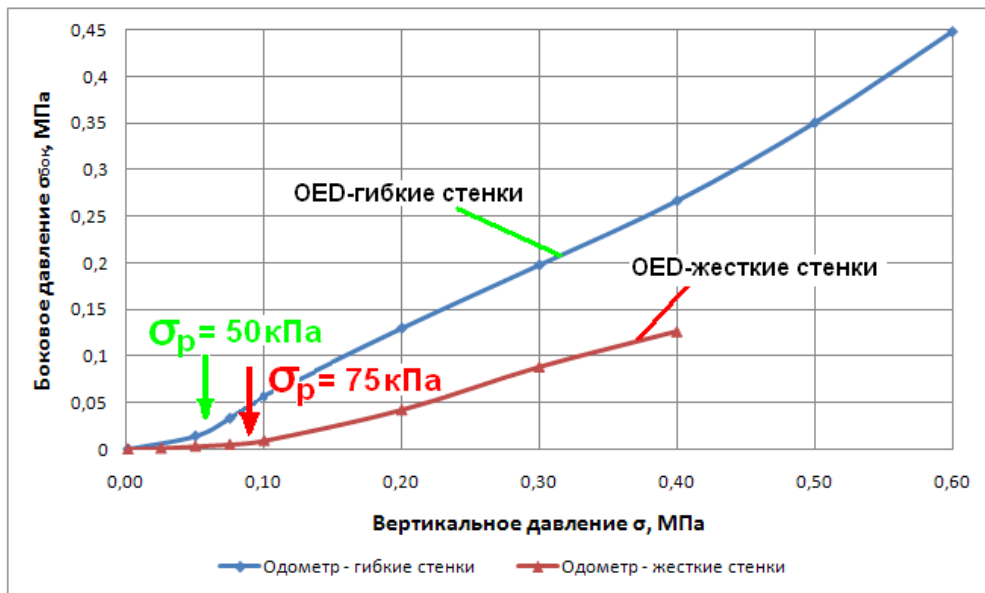


Рис. 10. К определению давления предварительного уплотнения

Как уже отмечалось ранее, применение одометра с измерением бокового давления позволяет определить также и коэффициент бокового давления, а затем и коэффициент Пуассона. Коэффициент бокового давления,  $\xi$  и коэффициент Пуассона,  $\nu$  определяется из выражений:

$$\xi = \frac{\sigma_h}{\sigma_v}, \quad \nu = \frac{\xi}{1 + \xi}. \quad (6)$$

где  $\sigma_h$  - боковое давление;  $\sigma_v$  - вертикальное давление

Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. Компрессионный модуль деформации для исследованной разновидности глинистого грунта практически не зависит от способа силового нагружения и оказывается одинаковым при непрерывном нагружении, ступенчатом нагружении и в испытаниях с релаксацией вертикальных напряжений.

2. Продолжительность компрессионных испытаний глинистого грунта при непрерывном нагружении с контролем величины порового давления и в опытах с релаксацией вертикальных напряжений в 9-10 раз менее по сравнению с испытаниями ступенчатым нагружением по ГОСТ 12248-96.

3. Значения модуля деформации из трехосных испытаний в 4,8 – 5,2 раз более компрессионного модуля деформации.

4. Результаты испытаний в компрессионном приборе с измерением бокового давления зависят от жесткости границы на боковой поверхности образца грунта.

5. Величина давления предварительного уплотнения может быть найдена прямым способом из результатов испытаний в компрессионном приборе с измерением бокового давления или из испытаний при непрерывном нагружении вертикальным давлением.

6. Учитывая перспективность компрессионных испытаний как с непрерывным нагружением, так и с релаксацией вертикальных напряжений ООО

«НПП Геотек» предлагает продолжить подобные исследования на других разновидностях глинистого грунта с ненарушенной структурой в других инженерно-геологических организациях России. Обобщение полученного опыта позволит разработать более совершенную методику определения деформационных характеристик грунтов.

### Литература

1. ГОСТ 12248-96. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости. М., 1997.
2. Медков Е.И. Практическое руководство к исследованию механических свойств грунтов с применением стабилометров типа М-2. М.-Л., *Госэнергоиздат*, 1959. с. 183.
3. Dyvik R., Laclasse S., Martin R. Coefficient of Lateral Stress from Oedometer Cell. *Proceedings of the Eleventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, San Francisco, 1985, Vol. 2, pp. 1003-1006.
4. Баранов Д.С. Тензометрические приборы для исследования строительных конструкций. ЦНИИСК им В.А.Кучеренко, М., 1971.
5. Жамбакина З.М. Экспериментальное изучение связи коэффициента бокового давления с прочностными свойствами грунта. *Диссертация на соискание ученой степени к.т.н. М., МИСИ*, 1989. – 201 с.
6. Болдырев Г.Г., Сидорчук В.Ф. Определение механических свойств грунтов в компрессионном приборе с измерением боковых напряжений. *Автоматизированные технологии изысканий и проектирование*, 2003, № 9-10, стр. 69-71.
7. Smith, R. E., and Wahls, H. E. Consolidation under Constant Rates of Strain, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol 95, No. SM2, March 1969.
8. Shean T.C., Watters P.J. Using an Automated Rowe Cell for Constant Rate of Strain Consolidation Testing. *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 19, No. 4, 1996, pp. 354-363.
9. ASTM D4186. Standard Test Method for One-Dimensional Consolidation Properties of Saturated Cohesive Soils Using Controlled-Strain Loading. 2006.
10. Hamilton J.J., Crawford C.B. Improved Determination of Preconsolidation Pressure of a Sensitive Clay, *STP 254, ASTM*, 1959, West Conshohocken, PA, pp. 254-270.
11. Lee K., Sills G. A Moving Boundary Approach to the Large Strain Consolidation of a Thin Soil Layer. *Proceedings, 3<sup>rd</sup> International Conference Numerical Methods Geomechanics*, 1979, pp. 16-17.
12. Wissa, A. E. Z., Christian, J. T., Davis, E. H., and Heiberg, S., “Consolidation at Constant Rate of Strain,” *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol 97, No. SM10, October 1971.

13. Yune C.-Y., Chung C.-K. Consolidation Test at Constant Rate of Strain for Radial Drainage. *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 28, No. 1, 2005, pp. 71-78.
14. Seah H.T., Koslanant S. Anisotropic Consolidation Behavior of Soft Bangkok Clay. *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 26, No. 3, 2003, pp. 266-276.
15. Gorman C.T., Hopkins T.C., Deen R.C., Drnevich V.P. Constant Rate of Strain and Controlled Gradient Consolidation Testing. *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 1, No. 1, 1978, pp. 3-15.
16. Труфанов А.Н. Способ лабораторного определения деформационных характеристик грунтов» или метод релаксации напряжений Труфанова. *Патент № 2272101*, 2006.