

УДК 624.131.22

К. В. Востриков, Ю. П. Смолин, А. В. Клименок

К методике разделения фильтрационной консолидации и ползучести скелета водонасыщенных грунтов

Поступила	27.03.2018
Рецензирование	15.05.2018
Принята к печати	18.05.2018

В статье рассмотрены вопросы, касающиеся консолидации водонасыщенного глинистого грунта. Известно, что в процессе уплотнения водонасыщенных грунтов имеет место фильтрационная консолидация (первичная) и ползучесть скелета грунта (вторичная консолидация). При определении осадки грунтов основания за счет фильтрационной консолидации и ползучести скелета грунта важно разделять эти процессы во времени и определять коэффициенты консолидации c_v и c_α соответственно.

В действующей нормативной литературе на испытания грунтов (ГОСТ 12248–2010 «Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости») представлены два независимых друг от друга способа определения параметров c_v и c_α . Эти способы предусматривают разделение первичной и вторичной консолидации лишь по результатам измерения деформаций испытываемых образцов грунта во времени, без замера порового давления. Разделение границ первичной и вторичной консолидации в них производится в процессе графического анализа результатов: разделение обусловлено проведением прямых линий (касательных) к графику относительной деформации, построенному в координатах «корень квадратный из времени» и «логарифм по времени».

В статье предложен метод разделения процессов консолидации с замером порового давления в образце грунта. После полного снижения порового давления деформация образца происходит за счет ползучести.

Результаты испытаний были обработаны тремя методами определения конца фильтрационной консолидации и начала уплотнения грунта только за счет ползучести, по каждому из которых найдены коэффициенты консолидации. По полученным данным определены значения осадки образца во времени. Сопоставление осадок во времени, рассчитанных по каждому методу, показало незначительное отличие их друг от друга.

По результатам выполненных исследований сделан вывод о том, что независимо от метода нахождения коэффициента консолидации c_v , можно с достаточной точностью определять фильтрационную осадку основания фундаментов для любого периода времени.

Ключевые слова: *фильтрационная консолидация, ползучесть скелета грунта, компрессионный прибор, датчик порового давления, осадка во времени, коэффициенты консолидации.*

Вопросы теории уплотнения грунтов в основании фундаментов имеют большое практическое значение. Зачастую знания величины полной (конечной) осадки оказывается недостаточно, так как при медленной осадке основания надфундаментные конструкции способны пластически деформироваться во времени. Если в расчете принимать только полную осадку, то необходимо учитывать также и хрупкое разрушение материала в узле, что приведет к необоснованному запасу прочности узла. В этой связи важно прогнозировать процесс изменения осадки грунта во времени.

В 1925 г. К. Терцаги впервые опубликовал решение задачи о компрессионной сжимаемости водонасыщенной грунтовой массы [1]. Автор указывал, что в момент приложения к грунтовой массе внешней уплотняющей нагрузки в образце возникает поровое давле-

ние, по величине равное внешней приложенной нагрузке. По истечении времени вода из грунтовой массы отфильтровывается и поровое давление в образце уменьшается вплоть до нуля, а внешняя нагрузка полностью воспринимается скелетом грунта (осадка грунтовой массы прекращается).

Однако последующие исследования показали, что деформации глинистых грунтов продолжаются и после окончания фильтрационной (первичной) консолидации. Последующее осадконакопление происходит за счет ползучести скелета грунта (вторичная консолидация). Фактически деформации ползучести развиваются с момента приложения нагрузки, однако они составляют значительно меньшую долю в сравнении с первичной консолидацией, поэтому ползучестью скелета при первичной консолидации часто пренебрегают.

Для определения конечной осадки фундамента за счет первичной консолидации необходимо было найти метод разделения периода первичной и вторичной консолидации. В 1936 г. проф. А. Казагранде установил, что при построении кривой уплотнения водонасыщенного глинистого грунта на логарифмической шкале времени на графике возможно выделить начало и конец фильтрационной консолидации [2]. На рис. 1, а приведена кривая консолидации, построенная на логарифмической шкале времени. Точка 100 % первичной консолидации определяется пересечением касательных к точке перегиба ветви первичной и вторичной консолидации.

В 1948 г. проф. Д. Тейлор предложил метод определения начала и конца фильтрационной консолидации [3], сущность которого заключается в построении касательной к линии графика и второй вспомогательной прямой путем увеличения абсцисс предыдущей на определенный коэффициент (см. рис. 1, б).

В ГОСТ 12248–2010 «Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости» [4] за основу определения параметров консолидации взяты методы проф. А. Казагранде и проф. Д. Тейлора: время окончания 100 % первичной консолидации определяется в результате обработки опытных данных изменения относительной дефор-

мации ϵ во времени, без замеров порового давления в образце.

Для определения коэффициента фильтрационной консолидации c_v при обработке кривой логарифмическим методом (далее « $\lg t$ »), определяют время, требуемое для достижения 50%-й деформации, равной среднему между условно мгновенной деформацией и 100%-м фильтрационным сжатием. В этом случае

$$c_v = \frac{T_{50} h^2}{t_{50}} = \frac{0,197 h^2}{t_{50}}, \quad (1)$$

где T_{50} – коэффициент (фактор времени), соответствующий степени консолидации 0,5, равный 0,197; h – высота образца (средняя между начальной высотой и высотой после завершения опыта на консолидацию), см; t_{50} – время, соответствующее 50%-му первичному сжатию, мин.

Для определения коэффициента фильтрационной консолидации c_v при обработке кривой консолидации методом «корень квадратный из времени» (далее « $\sqrt{t}$ ») определяют время, соответствующее 90%-му фильтрационному сжатию. В этом случае

$$c_v = \frac{T_{90} h^2}{t_{90}} f_t = \frac{0,848 h^2}{t_{90}} f_t, \quad (2)$$

где T_{90} – коэффициент (фактор времени), соответствующий степени консолидации 0,90, равный 0,848; t_{90} – время, мин; f_t – температурный поправочный коэффициент (в данной статье принят равным 1,0).

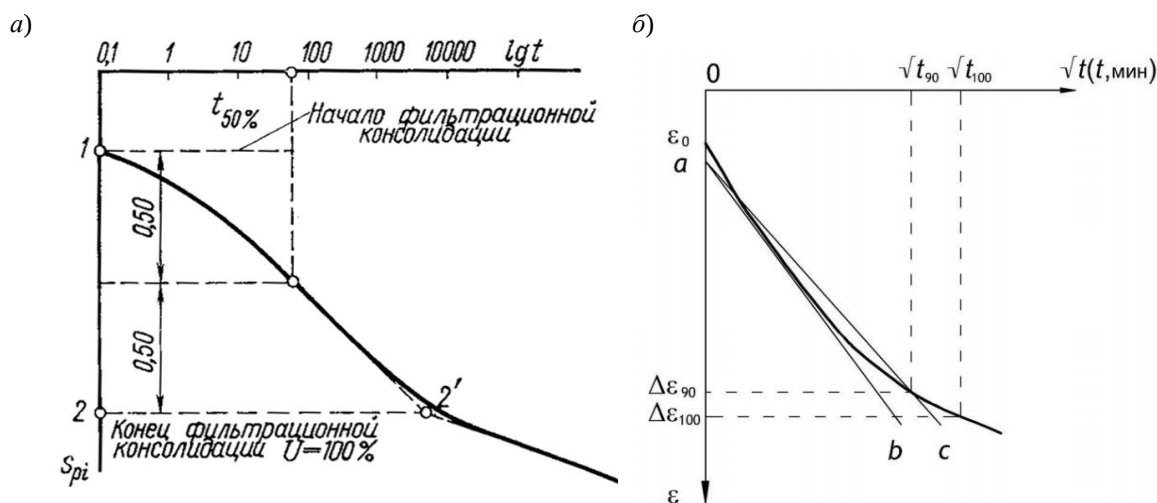


Рис. 1. График обработки кривой консолидации:
 а – логарифмическим методом (проф. А. Казагранде); б – методом «корень квадратный из времени» проф. Д. Тейлора

В настоящей статье выполнена попытка проверки достоверности применяемых в ГОСТ 12248 методик и установления границы разделения первичной и вторичной консолидации с учетом замера порового давления в образце. Для этого на кафедре «Геотехника, тоннели и метрополитены» СГУПСа была произведена модернизация компрессионного прибора, в результате которой появилась возможность производить замер порового давления в образце грунта. В качестве измерителя порового давления использовался датчик MPX5010D фирмы Motorola, в котором предварительно была демонтирована крышка и размеры которого позволили определять поровое давление, практически не изменяя объема одометра. Корпус датчика был помещен в цилиндрическую форму, которая при помощи металлической трубки присоединялась к нижней части компрессионного прибора. Давление воды воспринималось непосредственно кристаллом (чипом), имеющим защитное покрытие из кремниевого геля.

Сигнал с датчика поступал через аналого-цифровой преобразователь (АЦП) на компьютер, где регистрировался в программе Oscillus. На рис. 2 показана принципиальная схема компрессионного прибора совместно с установкой для измерения порового давления в образце.

Процесс проведения компрессионных испытаний с замером порового давления в образце представлен на рис. 3.

Опыты проводились на пасте из пылеватого суглинка с физическими характеристиками, значения которых представлены в таблице.

После зарядки компрессионного прибора грунтом образец дополнительно водонасыщался в течение суток. Затем водонасыщение прекращалось и производилось приложение нагрузки на образец с сопутствующими замерами порового давления и деформаций образца в определенные промежутки времени.

По результатам экспериментов были построены графики изменения порового давления во времени (рис. 4) и относительной де-

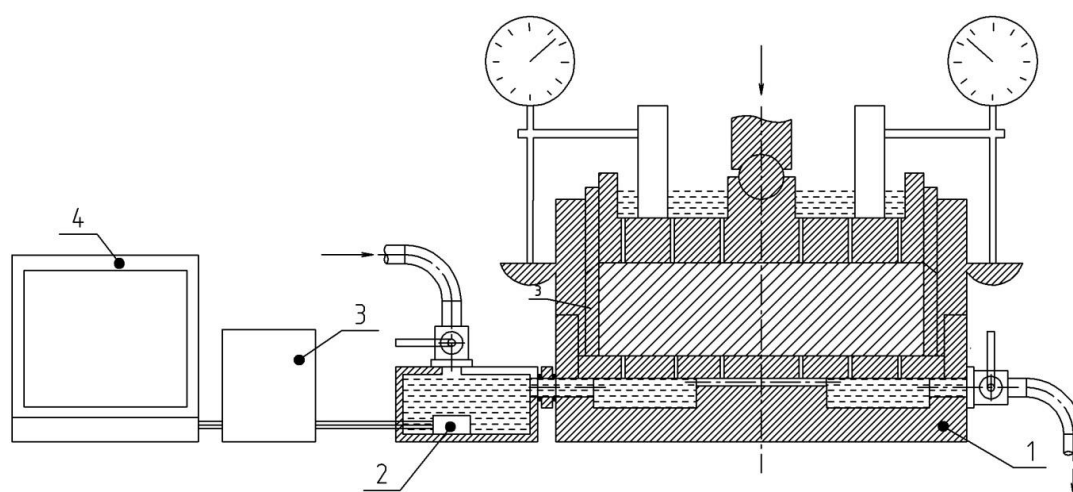


Рис. 2. Принципиальная схема установки для измерения порового давления в образце грунта:
1 – компрессионный прибор Кпр-1М с образцом грунта; 2 – датчик порового давления;
3 – аналого-цифровой преобразователь; 4 – компьютер

Показатели физических свойств испытуемого образца грунта

Плотность частиц грунта ρ_s , г/см ³	Плотность грунта ρ , г/см ³	Плотность сухого грунта ρ_d , г/см ³	Коэффициент пористости e	Влажность W	Степень влажности S_r	Влажность на границе текучести W_L , д. е.	Влажность на границе раскатывания W_P , д. е.	Число пластичности I_P , %	Показатель текучести I_L	Гранулометрический состав, %, для фракции диаметром, мм				
										> 0,10	0,10 – 0,05	0,05 – 0,01	0,01 – 0,005	< 0,005
2,75	1,89	1,40	0,964	0,35	1,00	0,37	0,23	14	0,86	0	7	51	16	26



Рис. 3. Процесс проведения компрессионных испытаний с замером порового давления в образце грунта

формации образца во времени по ГОСТ 12248 (методом « $\lg t$ » (рис. 5) и методом « $\sqrt{t}$ » (рис. 6)). С их помощью были найдены временные границы начала и конца фильтрационной консолидации опытного грунта.

Среднее время окончания фильтрационной консолидации по результатам замера порового давления и по построению графиков $\varepsilon = f(\lg t)$ и $\varepsilon = f(\sqrt{t})$ составило:

- 67 ч по результатам замеров порового давления;
- 5 ч при обработке кривой методом « $\lg t$ »;

– 8,5 ч при обработке кривой методом « $\sqrt{t}$ ».

Таким образом, время окончания фильтрационной консолидации, определенное по методике ГОСТ 12248 и по результатам замера порового давления, различалось в 9–14 раз.

С использованием приведенных графиков (см. рис. 5 и 6), по формулам (1) и (2) были найдены значения коэффициентов консолидации грунта:

- $c_v = 0,027$ см²/мин (построение кривой методом « $\lg t$ »);
- $c_v = 0,024$ см²/мин (построение кривой методом « $\sqrt{t}$ »).

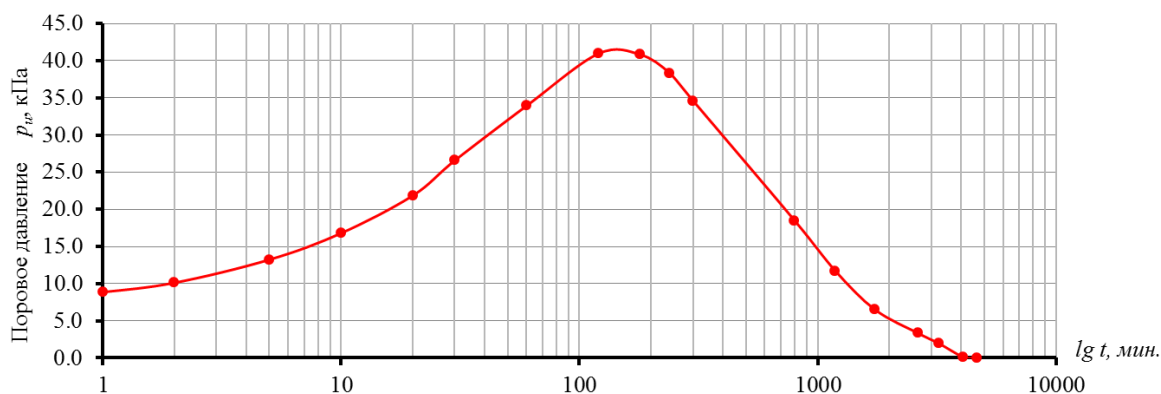


Рис. 4. График изменения порового давления во времени по результатам замеров в приборе

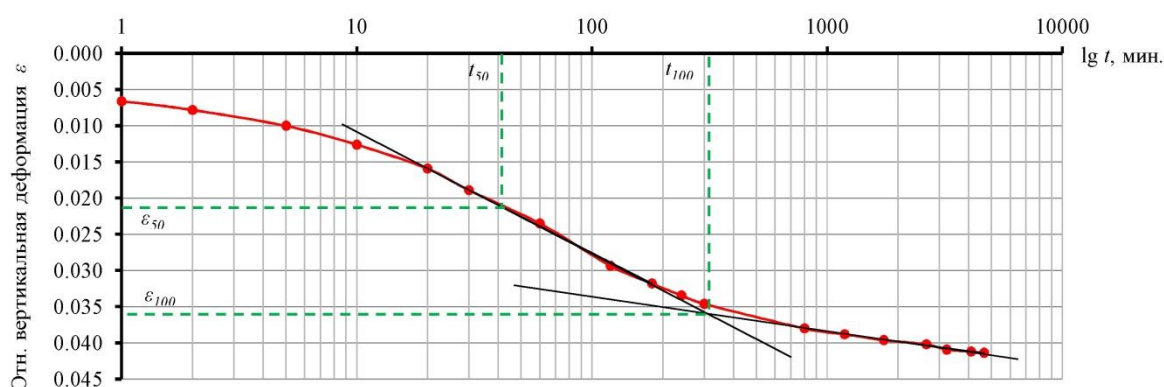
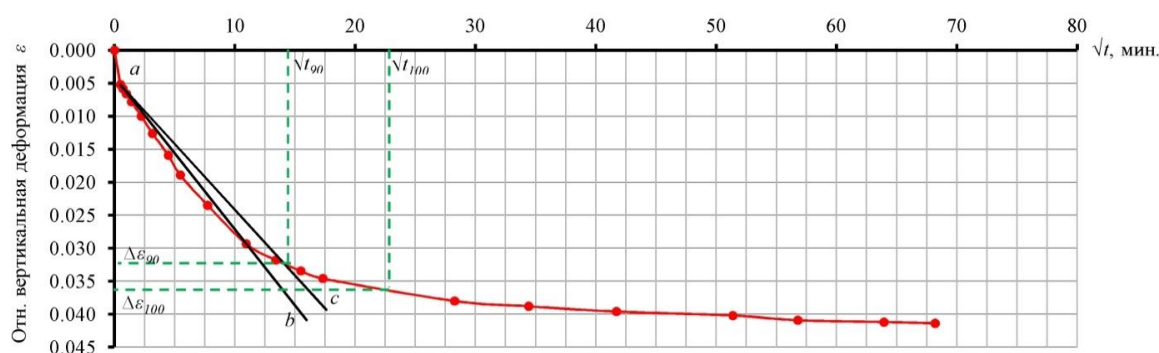


Рис. 5. График изменения относительной деформации образца во времени по методу «lg t»

Рис. 6. График изменения относительной деформации образца во времени по методу « $\sqrt{t}$ »

По результатам замера порового давления значение c_v найдено из следующих соображений. Известно, что в начальные промежутки времени изменение порового давления зависит в основном от коэффициента фильтрации грунта. В конце первичной консолидации на величину коэффициента фильтрации оказывает влияние структурная прочность. В этой связи авторами было решено величину порового давления принимать при максимальном коэффициенте фильтрации, а соответственно и максимальном поровом давлении, равном $p_u = 40,9$ кПа. Этому моменту соответствует

время $t = 150$ мин (см. рис. 4). Согласно теории фильтрационной консолидации [5–7] давление в скелете грунта p_z при одномерной консолидации будет равно:

$$p_z = p - p_u, \quad (3)$$

где p – полное давление, прикладываемое на образец (в опыте составляло 125 кПа); p_u – поровое давление, кПа.

Таким образом, при $p_u = 40,9$ кПа давление в скелете грунта составляет $p_z = 84,1$ кПа.

Для одномерного уплотнения давление в скелете грунта p_z может быть представлено в виде

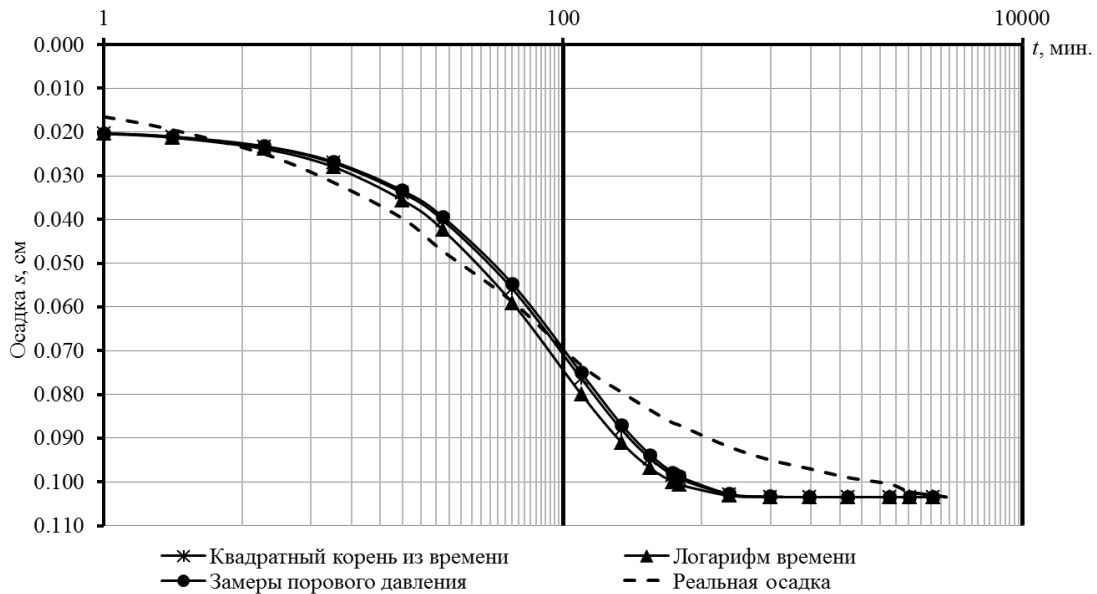


Рис. 7. Результаты расчета осадки опытного образца во времени

$$p_z \approx p \left[1 - \frac{4}{\pi} e^{-\frac{\pi^2 c_v t}{4h^2}} \right]. \quad (4)$$

После того как в формулу были подставлены известные величины, методом подбора было найдено искомое значение c_v . Таким образом, коэффициент консолидации c_v по результатам замера порового давления составил $c_v = 0,023 \text{ см}^2/\text{мин}$.

Из представленных выше данных видно, что коэффициент консолидации, определенный по результатам замеров порового давления, существенно отличается от рассчитанных по ГОСТ 12248 значений. Указанная разница составляет 17 % при построении кривой консолидации методом «lg t» и 4 % при построении кривой методом « $\sqrt{t}$ ». Однако следует отметить, что применение соотношений между p_u и p_z , отличных от того, при котором поровое давление достигает максимума, приводит к большему различию со значениями коэффициентов консо-

лидации c_v , полученных с помощью методов, рекомендованных ГОСТ 12248.

Зная коэффициент консолидации, фильтрационную осадку грунта для любого промежутка времени можно определить по следующей формуле [8–10]:

$$s(t) = hm_v p \left[1 - \frac{8}{\pi^2} \left(e^{-\frac{\pi^2 c_v t}{4h^2}} + \frac{1}{9} e^{-\frac{\pi^2 c_v t}{4h^2}} \right) \right], \quad (5)$$

где m_v – коэффициент относительной сжимаемости (для опытного образца $m_v = 0,0006 \text{ кПа}^{-1}$).

Величины осадки опытного грунта, определенные по формуле (5) при соответствующих коэффициентах консолидации, мало отличаются друг от друга: значения осадки составили 0,101–0,103 см (рис. 7).

Анализируя полученные результаты, можно предположить, что фильтрационную осадку фундаментов на любой период времени с достаточной точностью можно определять независимо от метода нахождения коэффициента консолидации c_v .

Библиографический список

1. Терцаги К. Строительная механика грунта. М. : Госстройиздат, 1933. 392 с.
2. Шукле Л. Реологические проблемы механики грунтов. М. : Стройиздат, 1973. 485 с.
3. Тейлор Д. Основы механики грунтов. М. : Госстройиздат, 1960. 340 с.
4. ГОСТ 12248–2010. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости. М. : Стандартинформ, 2011. 156 с.
5. Флорин В. А. Основы механики грунтов. Л. : Госстройиздат, 1959. Т. 1. 357 с.

6. Тер-Мартirosян З. Г. Механика грунтов : учеб. пособие. М. : Изд-во Ассоциации строит. вузов. 2005. 488 с.
7. Прогноз скорости осадков оснований сооружений / Н. А. Цытович и др. М. : Стройиздат, 1967. 239 с.
8. Косте Ж., Санглер Г. Механика грунтов : практ. курс / Ж. Косте, Г. Санглер ; пер. с франц. В. А. Барвашова, под ред. Б. И. Кулачкина. М. : Стройиздат, 1981. 455 с.
9. Месчан С. Р. Экспериментальная реология глинистых грунтов. 3-е изд., перераб. и доп. Ереван : Гитутюн, 2005. 490 с.
10. Зарецкий Ю. К. Теория консолидации грунтов. Л. : Наука, 1976. 268 с.

K. V. Vostrikov, J. P. Smolin, A. V. Klimenok

The Separation Technique of Filtration Consolidation and Creep of Saturated Soils Skeleton

Abstract. The article deals with the issues related to the consolidation of water-saturated clay soils. It is known that during compaction of water-saturated soils filtration consolidation (primary) and creep of soil skeleton (secondary consolidation) occurs. It is important to separate these processes in time and to determine the coefficients of consolidation c_v and c_α in determining the sediment due to the consolidation of the filtration and creep of the soil skeleton.

In the current normative literature on soil tests (GOST 12248-2010 "Soils. Methods for laboratory determination of strength characteristics and deformability") represent two independent from each other method of determining the parameters c_v and c_α . These methods provide for the separation of the primary and secondary compaction only by measuring the deformations of the studied soil samples in time, without measuring the pore pressure. The division of the boundaries of the primary and secondary consolidation in them is made in the process of graphical analysis of the results: the separation occurs due to the direct lines (tangents) to the relative deformation graph, built in the coordinates "root square in time" and "logarithm in time".

In the article the separation method of consolidation processes with measurement of pore pressure in soil sample is offered. After a complete reduction of pore pressure, the deformation of the specimen is due to creep.

The test results were processed by three methods for determining the end of the filtration seal and the beginning of the soil compaction by creep only, for each of which consolidation coefficients were found. According to the obtained results, the sample precipitation values in time. Comparison of precipitation in time, calculated for each method, showed a slight difference between them.

According to the results of the research, it is concluded that regardless of the method of finding the consolidation coefficient c_v , it is possible to determine with sufficient accuracy the filtering sediment of the foundation for any period of time.

Key words: *filtration consolidation; creep of soil skeleton; odometer; pore pressure sensor; sediment in time; consolidation ratios.*

Востриков Константин Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Геотехника, тоннели и метрополитены» СГУПС. E-mail: kostas_V@mail.ru

Смолин Юрий Петрович – доктор технических наук, профессор кафедры «Геотехника, тоннели и метрополитены» СГУПС. E-mail: yurij.smolin@bk.ru

Клименок Алексей Владимирович – магистрант направления подготовки «Управление и экспертиза объектов недвижимости» СГУПС. E-mail: klimenok2015@gmail.com