

УСКОРЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ ГРУНТОВ НА СЖИМАЕМОСТЬ ПУТЕМ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЯ ОСАДКИ ГРУНТОВ

В.В. ДЕНИСЕНКО¹, П.А. ЛЯШЕНКО²

¹Кубанский государственный технологический университет,
кандидат технических наук, доцент кафедры Кадастра и геоинженерии,
Россия, 350072, г. Краснодар, ул. Московская, 2в; e-mail: devivi@yandex.ru

²Кубанский государственный аграрный университет,
кандидат технических наук, профессор кафедры Оснований и фундаментов,
Россия, 350044, г. Краснодар, ул. Калинина, 13; e-mail: lyseich1@yandex.ru

Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований по оценке эффективности повышения точности измерителя осадки грунтов. Установлено, что повышение точности измерителя осадки грунтов повышает точность определения показателей сжимаемости грунтов и позволяет уменьшить время контролирования нормативной скорости стабилизации осадки грунтов пропорционально повышению точности измерителя осадки грунтов и за счет этого ускорить испытания грунтов на сжимаемость при 6-ти ступенях нагрузки в 1,5 раза. При этом если испытания грунтов на каждой ступени нагрузки заканчивать в момент, когда скорость их осадки снизится до нормативной, который можно установить по аппроксимирующей функции кривых консолидации на основе фактических данных для каждого испытываемого грунта, то достигается ускорение испытаний грунтов на сжимаемость в 2,7 раза. Приведен алгоритм практического осуществления способа, упрощающий установление этого момента в процессе испытания грунтов и позволяющий автоматизировать эту операцию.

Ключевые слова: сжимающая нагрузка, стабилизация осадки, консолидация грунтов, измеритель осадки грунтов.

Испытания грунтов на сжимаемость, согласно нормативным документам [1-3] производятся путем приложения сжимающей нагрузки (давления) ступенями с выдержкой каждой до стабилизации осадки (деформации) грунта.

Длительность испытаний грунтов на сжимаемость значительно увеличивается при испытании мягкопластичных глин, для которых на достижение стабилизации осадки на каждой ступени нагрузки требуется до нескольких суток, а на все ступени нагрузки – до нескольких недель.

Известные способы ускорения определения стабилизированной осадки грунтов [4-6] не нашли широкого применения, т.к. предусматривают задание параметров сокращения длительности испытаний до приложения сжимающей нагрузки без учета физических свойств грунтов и основаны на некоторых допущениях, снижающих достоверность конечных результатов.

Одним из способов ускорения определения стабилизированной осадки грунтов под действием приложенной сжимающей нагрузки, обеспечивающим достоверность результатов, может быть повышение точности измерителя осадки грунтов.

Оценим эффективность этого способа на примере компрессионных испытаний грунта, например, глины. За нормативный критерий стабилизации осадки глины примем осадку, не превышающую 0,01 мм за 16 часов, которую необходимо контролировать измерителем осадки грунтов соответственно с ценой деления не более 0,01 мм.

Если применить более точный измеритель осадки грунтов, например, с ценой деления не более 0,005 мм, т.е. в 2 раза точнее, то критерий стабилизации осадки грунтов может быть уменьшен соответствующим образом не менее, чем в 2 раза.

Рассмотрим участок кривой консолидации грунта при постоянной нагрузке, на котором достигается стабилизация осадки грунта, т.е. выдерживается принятый нормативный критерий стабилизации осадки глины. На этом участке кривая консолидации грунта начинается с момента времени t_B и осадки S_B (рис. 1).

При 16-часовом критерии стабилизации осадки грунта для измерителя осадки грунтов с ценой деления 0,01 мм рассматриваемый участок кривой консолидации грунта ограничен интегралом времени (t_B+16) часов и интервалом осадки $(S_B+0,01)$ мм, а для измерителя осадки грунтов с ценой деления 0,005 мм – соответственно (t_B+8) часов и $(S_B+0,005)$ мм.

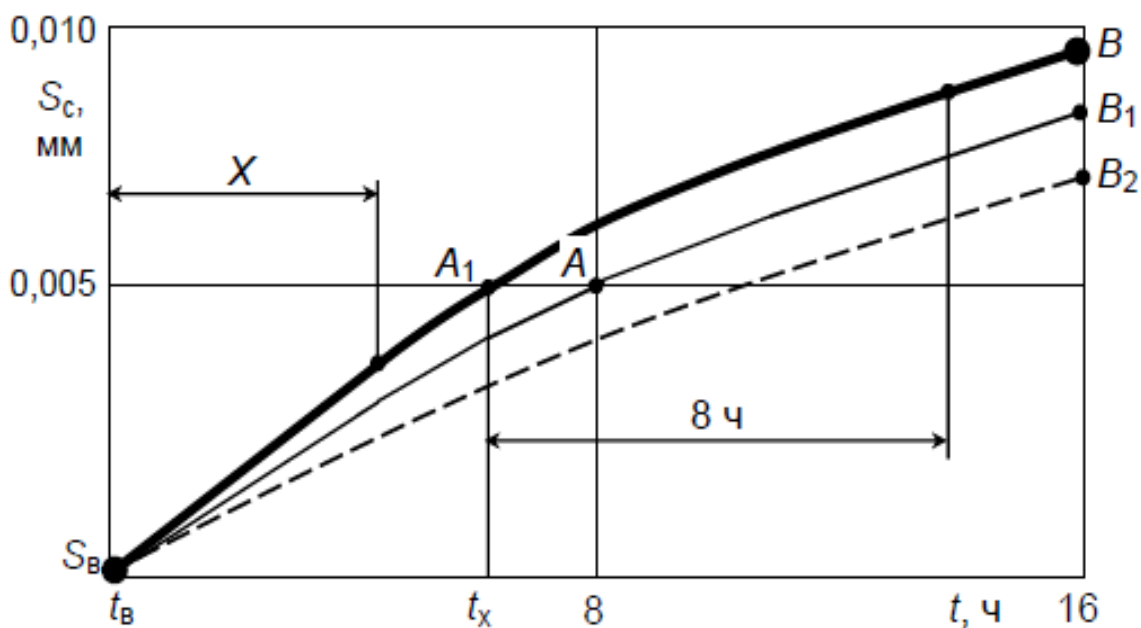


Рис. 1. Участок кривой консолидации грунта, на котором завершается стабилизация его осадки при постоянной нагрузке

Кривые консолидации грунта на каждой ступени нагрузки аппроксимируются функцией вида

$$S_c = \frac{t_c}{c + f \cdot t_c}, \quad (1)$$

где S_c – величина стабилизированного приращения осадки грунта на рассматриваемой ступени нагрузки, мм;

t_c – время стабилизации осадки грунта на рассматриваемой ступени нагрузки, ч;

c и f – постоянные для испытываемого грунта на рассматриваемой ступени нагрузки величины соответственно, ч/мм и 1/мм.

Ее первая производная всегда больше нуля

$$\frac{dS_c}{dt_c} = \frac{c}{(c + f \cdot t_c)^2} > 0, \quad (2)$$

т.к. кривая $c > 0$, т.е. осадка монотонно возрастает во времени, причем кривая обращена выпуклостью вверх, потому что вторая производная всегда меньше нуля

$$\frac{d^2 S_c}{dt_c^2} = -\frac{2c \cdot f}{(c + f \cdot t_c)^3} < 0, \quad (3)$$

т.к. $c > 0$ и $f > 0$.

На рассматриваемом участке кривая консолидация грунта пройдет относительно точки B ниже или через точку B , а относительно точки A – ниже, выше или через точку A (см. рис. 1).

Из этого следует, что при измерителе осадки грунтов с ценой деления 0,01 мм выдерживание грунта на рассматриваемой ступени нагрузки можно закончить через $(t_B + 16)$ часов, а замеренная величина осадки грунта будет на 0,01 мм меньше фактической, т.к. осадка грунта меньше 0,01 мм таким измерителем не фиксируется.

При измерителе осадки грунтов с ценой деления 0,005 мм, когда кривая консолидация грунта проходит через точку A или ниже точки A , выдерживание грунта на рассматриваемой ступени нагрузки можно закончить через $(t_B + 8)$ часов, т.е. на 8 часов (в 2 раза) раньше, чем при измерителе осадки грунтов с ценой деления 0,01 мм.

Рассмотрим случай, когда кривая консолидации грунта проходит выше точки A , но ниже точки B . Точку пересечения ее с отметкой $(S_B + 0,005)$ обозначим буквой A_1 , а время за которое достигается это пересечение после точки t_B , обозначим t_x . Так как после точки A_1 через 8 часов испытание грунта на рассматриваемой ступени нагрузки закончится, общее время выдерживания грунта на рассматриваемой ступени нагрузки составит $(t_B + t_x + 8)$ часов, а длительность выдерживания грунта на рассматриваемой ступени нагрузки сократится на $(t_B + 16) - (t_B + t_x + 8) = (8 - t_x)$ часов.

Оценим величину t_x . Используя уравнение аппроксимирующей функции (1), запишем очевидные соотношения (см. рис. 1):

$$\begin{cases} \frac{t_B + t_x}{c + f \cdot (t_B + t_x)} - \frac{t_B}{c + f \cdot t_B} = 0,005; \\ \frac{t_B + 16}{c + f(t_B + 16)} - \frac{t_B + t_x}{c + f(t_B + t_x)} \leq 0,005. \end{cases} \quad (4)$$

Из уравнений (4) получаем выражение, связывающее t_x с t_B :

$$t_x \geq \frac{200 c - c \cdot f - f^2 \cdot t_B}{25c + f}. \quad (5)$$

Однако выражение (5) не учитывает скорость осадки грунта, регламентированную принятым нормативным критерием стабилизации осадки глины за условную стабилизацию через \dot{S}_{st}

$$\dot{S}_{st} = \frac{0,01}{16} = \frac{1}{1600}, \text{ мм/ч.} \quad (6)$$

Время, через которое достигается это значение скорости осадки грунта, обозначим через $(t_x + x)$ (см. рис. 1).

Из выражений (2) и (6) получаем:

$$\frac{c}{[c + f(t_e + x)]^2} = \dot{S}_{st} \quad (7)$$

$$\text{откуда } t_e = \frac{1}{f} \left(\sqrt{\frac{c}{\dot{S}_{st}}} - c \right) - x. \quad (8)$$

Из рис. 1 ясно, что справедливо соотношение

$$\frac{t_e + 16}{c + f(t_e + 16)} - \frac{t_e}{c + f \cdot t_e} \leq 0,01. \quad (9)$$

Преобразуя соотношение (9), получаем

$$1600 c \leq [c + f(t_e + 16)] \cdot [c + f \cdot t_e] \quad (10)$$

Подставляем уравнение (7) в уравнение (10) и получаем

$$1600c \leq \left[\sqrt{\frac{c}{\dot{S}_{st}}} - f \cdot x + 16f \right] \cdot \left[\sqrt{\frac{c}{\dot{S}_{st}}} - f \cdot x \right]$$

или с учетом значения (6)

$$1600c \leq (40\sqrt{c} - f \cdot x + 16f) \cdot (40\sqrt{c} - f \cdot x). \quad (11)$$

Решение уравнения (11) относительно x дает примерно следующее:

$$x = 8 \left[1 - \frac{f}{5\sqrt{c}} \right] < 8, \text{ ч.} \quad (12)$$

Подставляя уравнение (12) в уравнение (8) и учитывая (6), получаем

$$t_e = \frac{1}{f} (40\sqrt{c} - c) - 8 \left(1 - \frac{f}{5\sqrt{c}} \right), \text{ ч.} \quad (13)$$

Подставляя уравнение (13) в уравнение (5), получаем:

$$t_x \geq 8 - \frac{40f \cdot \sqrt{c} + 200c \cdot f - 40f^2 \cdot \sqrt{c} + 8f^3}{5\sqrt{c} \cdot (25c + f)}, \text{ ч.} \quad (14)$$

Для оценки значений параметров t_b , t_x и X были проведены компрессионные испытания 8-ми образцов различных грунтов Краснодарского края природного сложения (табл. 1).

Таблица 1. Характеристики физических свойств испытанных образцов грунтов

№ образцов грунтов	Плотность, г/см ³		Природная влажность, W , %	Коэффициенты		Число пластичности, I_p	Показатель текучести, I_L
	грунта, ρ	частиц, ρ_s		пористости, e	водонасыщения, S_r		
1	2,01	2,70	20	0,753	0,72	12	< 0
2	2,02	2,72	29	0,738	1,00	21	< 0
3	1,91	2,69	43	1,014	1,00	26	0,23
4	1,91	2,63	36	0,872	1,00	27	0,04
5	2,06	2,71	25	0,649	1,00	15	< 0
6	2,02	2,70	25	0,667	1,00	16	< 0
7	1,93	2,76	35	0,930	1,00	35	0,03
8	2,10	2,70	20	0,543	0,99	13	< 0

Испытания образцов грунтов проводились ступенями нагрузки по 0,1 МПа до конечной нагрузки 500 и 700 кПа с выдержкой каждой ступени нагрузки до стабилизации осадки грунтов.

В таблице 2 приведены числовые значения t_b , t_x и X , вычисленные по формулам (12-14) для испытанных образцов на различных ступенях нагрузки.

Таблица 2. Значения параметров c , f , t_b , X и t_x кривых консолидации различных образцов грунтов при различных нагрузках

№ образцов грунтов	Ступени нагрузки, кПа	c , ч/мм	f , 1/мм	$10^3 \cdot \sigma_{п}$, мм	t_b , ч	X , ч	t_x , ч	$t_{ск}$, %	
								в точке A	в точке A_1
1	200	13,48	8,043	0,410	24,6	4,5	5,2	19,7	28,3
	300	8,376	5,274	0,670	28,4	5,1	5,6	18,0	24,5
	400	4,151	3,340	0,775	31,2	5,4	5,8	16,9	22,4
	500	2,538	1,996	0,346	38,6	6,0	6,2	14,6	18,3
	100	13,13	4,120	0,865	40,0	6,2	6,4	14,3	17,5
2	200	7,132	3,001	0,795	41,2	6,2	6,4	14,0	17,1
	300	4,374	2,547	0,720	39,1	6,0	6,3	14,5	18,1
	400	7,627	2,264	0,475	53,4	6,7	6,8	11,5	13,4
	500	1,842	1,519	0,330	42,5	6,2	6,3	13,7	16,7
	100	11,24	4,512	0,830	35,2	5,8	6,2	15,6	19,9
3	300	6,178	2,945	0,470	39,7	6,1	6,3	14,4	17,8
	500	3,104	1,839	0,510	44,6	6,3	6,4	13,2	16,0
	700	1,371	1,064	0,565	50,7	6,6	6,5	12,0	14,1
	200	8,797	8,062	0,955	21,6	3,6	4,6	21,3	32,9
	500	6,100	6,097	0,720	23,2	4,0	4,8	20,4	30,6
4	700	2,439	5,653	1,090	18,6	2,2	3,1	23,1	39,9
	300	136,6	18,78	0,415	25,6	5,4	6,0	19,2	25,5

№ образцов грунтов	Ступени нагрузки, кПа	с, ч/мм	f, 1/мм	10 ³ ·σ _п , мм	t _в , ч	X, ч	t _х , ч	t _{ск} , %	
								В точке А	В точке А ₁
	500	34,25	26,44	1,775	15,6	7,7	1,3	25,3	26,3
6	200	38,97	10,07	0,845	28,9	5,4	5,9	17,8	23,6
	300	23,72	20,51	0,545	16,3	1,3	2,1	24,8	45,5
	400	46,59	12,63	0,855	25,9	5,0	5,7	19,1	26,2
	500	14,41	9,501	1,655	22,5	4,0	4,9	20,8	31,2
7	400	83,96	13,56	0,650	28,8	5,6	6,1	17,8	23,2
	500	36,99	7,048	0,530	27,3	6,1	6,4	15,0	18,6
	600	17,34	6,915	0,495	29,6	5,3	5,8	17,5	23,5
	700	15,80	6,286	0,650	30,8	5,5	5,9	17,1	22,4
8	300	197,6	14,50	1,120	33,2	6,4	6,6	16,3	19,5
	400	97,75	18,71	1,490	23,9	5,0	5,6	20,0	27,6
	500	66,70	14,57	0,925	25,8	5,1	5,7	19,1	26,1

Для вычисления параметров t_v , t_x и X для всех образцов грунтов на каждой ступени нагрузки определялись методом наименьших квадратов параметры c и f по формуле (1) и среднеквадратическое отклонение σ_p (см. табл. 2) экспериментальных значений стабилизированной осадки грунтов от расчетных. Кроме того в таблице 2 приведены значения ускорения определения стабилизированной осадки грунтов на каждой ступени нагрузки $t_{ск}$, вычисленные:

- при прохождении кривой консолидации грунта через или ниже точки A (см. рис. 1) по формуле

$$t_{ск} = \frac{8}{t_g + 16} \cdot 100, \% \quad (15)$$

- при прохождении кривой консолидации грунта через точку A_1 (см. рис. 1) по формуле

$$t_{ск} = \frac{16 - X}{t_g + 16} \cdot 100, \%. \quad (16)$$

Сравнение значений параметров X и t_x показывает, что они очень близки по величине. Из этого следует, что при скорости осадки грунта, равной 0,005 мм за t_x часов, т.е. при прохождении кривой консолидации грунта через точку A_1 , принятый нормативный критерий стабилизации осадки грунта будет выдержан и испытания грунта при действующей степени нагрузки можно закончить. При этом длительность определения стабилизированной осадки грунта ускоряется на $(16 - t_x)$ часов.

При реализации этого рассмотренного способа ускорения определения стабилизированной осадки грунта на каждой степени нагрузки необходимо производить сравнение времени t_x в момент приращении осадки грунта, равной 0,005 мм, с правой частью выражения (14). При этом, если неравенство выполняется, выдерживание грунта на действующей степени нагрузки можно закончить, т.к. заведомо известно, что стабилизация осадки грунта наступит через 8 часов после момента времени t_x . В противном случае, выдерживание степени нагрузки следует продолжать до очередного приращения осадки грунта на 0,005 мм и т.д. (рис. 2).

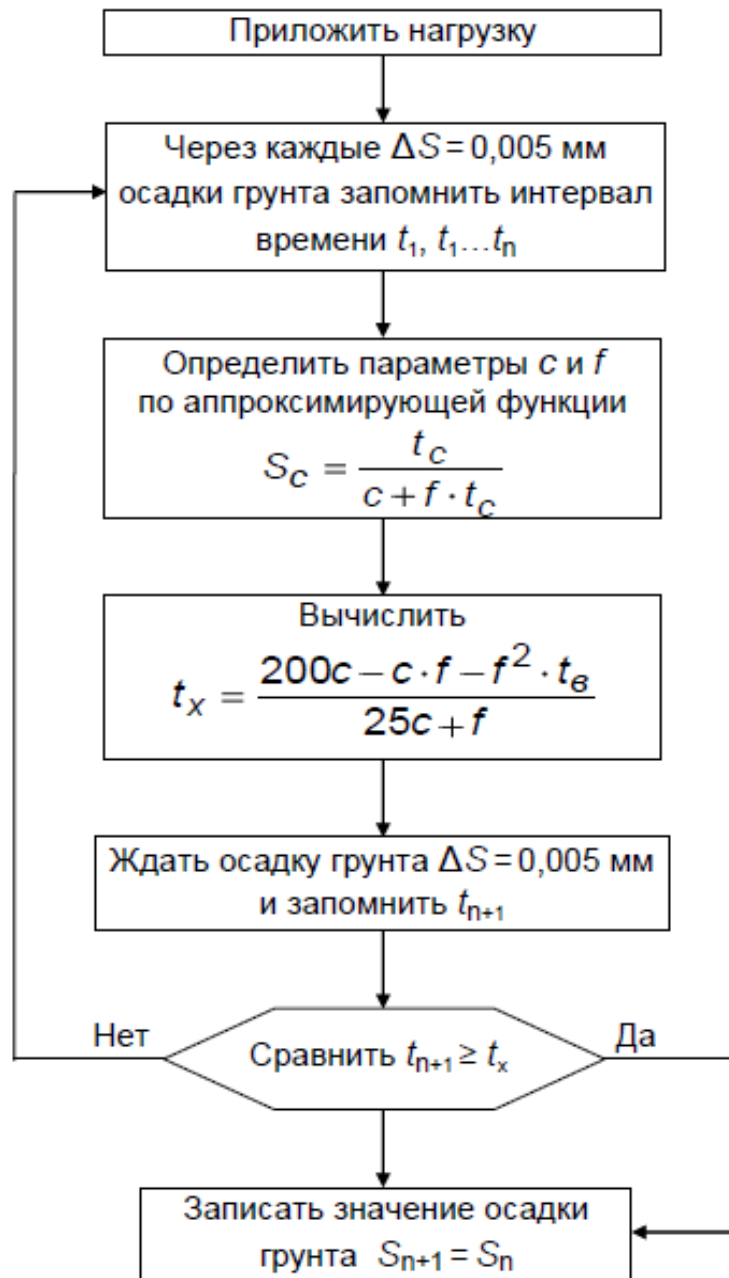


Рис. 2. Блок-схема алгоритма определения момента, с которого скорость стабилизации осадки грунта совпадает с нормативной

Анализ результатов ускорения определения стабилизированной осадки различных грунтов на различных ступенях нагрузки показывает, что, если действие ступеней нагрузки заканчивать в момент, когда кривая консолидации проходит ниже или через точку *A* (см. рис. 1), ускорение определения стабилизированной осадки грунтов может достигать 26 % (см. табл. 2), а когда через точку *A*₁ – 45 %. При этом в обоих случаях точность определения стабилизированной осадки грунтов повышается на величину цены деления

<http://ntk.kubstu.ru/file/220>

измерителя осадки грунтов, в рассмотренном примере, соответственно, на 0,005 мм.

Таким образом, повышение точности измерителя осадки грунтов повышает точность определения показателей сжимаемости грунтов и позволяет уменьшить величину времени контролирования нормативной скорости осадки грунтов при ее стабилизации пропорционально повышению точности измерителя осадки грунтов и за счет этого ускорить испытания грунтов на сжимаемость, например, при 6-ти ступенях нагрузки в 1,5 раза. При этом если испытания грунтов на каждой ступени нагрузки заканчивать в момент, когда скорость их осадки снизится до нормативной, который можно установить по аппроксимирующей функции кривых консолидации грунтов на основе фактических данных для каждого испытываемого грунта, то достигается ускорение испытаний грунтов на сжимаемость в 2,7 раза.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 12248-2010 Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости.
2. ГОСТ 20276-2012 Грунты. Методы полевого определения характеристик прочности и деформируемости.
3. Методическое пособие по инженерно-геологическому изучению горных пород. В 2-х томах. Том 2. Лабораторные методы. М.: Недра, 1984. 438 с.
4. **Веселовский В.М.** Осадки сооружений во времени. М.-Л.: Стройиздат, 1940. 80 с.
5. **Гольдштейн М.Н.** Механические свойства грунтов (Напряженно-деформативные и прочностные характеристики). М.: Стройиздат, 1979. 304 с.
6. **Аветикян Ю.А., Снежкин Б.А.** Сокращение длительности лабораторных определений сжимаемости грунтов путем экстраполяции кривых консолидации // Технология и техника полевых испытаний грунтов (труды ПНИИСа). М., 1986. С. 25-33.

REFERENCES

1. GOST 12248-2010 Soils. Laboratory methods for determining the characteristics of strength and deformability.
2. GOST 20276-2012 Soils. Methods for determining the characteristics of the field strength and deformability.
3. Guidelines on the engineering-geological study of the rocks. In 2 volumes. Volume 2. Laboratory methods. M.: Nedra, 1984. 438 p.
4. **Veselovskii V.M.** Precipitation structures over time. M.-L.: Stroyizdat, 1940. 80 p.
5. **Goldstein M.N.** Mechanical properties of soils (voltage-deformability and strength characteristics). M.: Stroyizdat, 1979. 304 p.
6. **Avetikyan J.A., Snezhkin B.A.** Reducing the duration of laboratory determinations of the compressibility of soils by extrapolating the curves of consolidation // Technology and technics of field tests of soils (works PNIIS). M., 1986, pp. 25-33.

*ACCELERATED TESTING OF SOIL ON THE COMPRESSIBILITY BY
INCREASING METER ACCURACY SOIL SETTLEMENT*

V.V. DENISENKO¹, P.A. LYASHENKO²

*¹Kuban State University of Technology,
Cand.Tech.Sci., the senior lecturer of chair of the Cadastre and geoengineering,
Moskovskay str., 2v, Krasnodar, Russia, 350072, e-mail: devivi@yandex.ru*

*²Kuban State Agrarian University,
Cand.Tech.Sci., Professor of the Department of the foundations of the,
Kalinina str., 13, Krasnodar, Russia, 350044, e-mail: lyseich1@yandex.ru*

The results of theoretical and experimental studies to evaluate the effectiveness of increasing the accuracy of the meter of soil sediments. It is found that increasing the accuracy of the meter ground subsidence increases the accuracy of determining the parameters of the compressibility of soil and reduces the time the regulatory control of the stabilization rate of soil sediments proportionally increase the accuracy meter of soil sediments and thereby accelerate the testing ground for compressibility at 6 levels of load factor of 1,5. Moreover, if soil tests at each stage of the load to finish in a time when the rate of rainfall will decrease to normative, which can be installed on the approximating function curves of consolidation

based on actual data for each test soil is achieved by accelerating soil tests on the compressibility factor of 2,7. An algorithm for the practical implementation of a method that simplifies the establishment of this point in the process of soil testing and to automate this operation.

Key words: compressive load, sludge stabilization, consolidation of soils, rainfall meter of soil.