

**УСКОРЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ ГРУНТОВ НА СЖИМАЕМОСТЬ ПУТЕМ
ОПРЕДЕЛЕНИЯ МОМЕНТА, С КОТОРОГО ИХ ОСАДКА ПРОИСХОДИТ ПО
ЛОГАРИФМИЧЕСКОЙ ЗАВИСИМОСТИ**

В.В. ДЕНИСЕНКО¹, П.А. ЛЯШЕНКО²

¹*Кубанский государственный технологический университет,
350072, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Московская, 26;
электронная почта: devivi@yandex.ru*

²*Кубанский государственный аграрный университет,
350044, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Калинина, 13;
электронная почта: lyseich1@yandex.ru*

Описан способ ускорения испытаний грунтов на сжимаемость, заключающийся в установлении на каждой ступени нагрузки момента, когда три последних значения времени действия ступени нагрузки, замеренные через равные интервалы приращения осадки испытываемого грунта, образуют геометрическую прогрессию. С этого момента испытание грунта под действующей ступенью нагрузки можно закончить, а его стабилизированную осадку определить по логарифмическому уравнению вторичной консолидации грунтов. Приведено теоретическое и экспериментальное обоснование этого способа и алгоритм практического осуществления способа, упрощающий установление этого момента в процессе испытания грунтов и позволяющий автоматизировать эту операцию. Способ обеспечивает достоверность результатов, т.к. основан на использовании фактических данных испытываемых грунтов в ходе испытаний, и ускоряет испытания грунтов на сжимаемость при 6-ти ступенях нагрузки до 18 раз.

Ключевые слова: сжимающая нагрузка, стабилизация осадки, уравнение консолидации, прогнозируемая осадка.

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 установление момента действия нагрузки, начиная с которого осадка испытываемого грунта происходит по известному закону (уравнению), позволяющему досрочно закончить испытание грунта под действующей нагрузкой и рассчитать величину стабилизированной осадки грунта.

Зададимся уравнением зависимости осадки грунта от времени при постоянной нагрузке. Известно, что при больших промежутках времени после приложения нагрузки осадка грунта линейно зависит от $\ln t$ [7].

Запишем эту зависимость в виде уравнения

$$S_c = S_n + A \cdot \ln \frac{t_c}{t_n}, \quad (1)$$

где S_c и S_n – значение осадки грунта при действующей нагрузке соответственно стабилизированное и n -ое (текущее), мм;

t_c и t_n – время действия нагрузки после ее приложения до достижения значений осадки грунта соответственно S_c и S_n , ч;

A – параметр кривой консолидации грунта, вычисленный по данным наблюдения за осадкой испытываемого грунта в моменты времени t_n, t_{n+1}, t_{n+2} , мм.

Уравнение (1) запишем для нескольких последовательных точек наблюдений

$$S_{n+1} = S_n + A \cdot \ln \frac{t_{n+1}}{t_n}, \quad (2)$$

$$S_{n+2} = S_{n+1} + A \cdot \ln \frac{t_{n+2}}{t_{n+1}}. \quad (3)$$

Предположим, что приращения осадки грунта между соседними точками наблюдений равны между собой, например, $\Delta S = 0,005$ мм, т.е.

$$S_{n+1} - S_n = S_{n+2} - S_{n+1} = \Delta S = 0,005,$$

сравнивая между собой уравнения (2) и (3), получаем

$$A \cdot \ln \frac{t_{n+1}}{t_n} = A \cdot \ln \frac{t_{n+2}}{t_{n+1}}$$

$$\text{откуда } \frac{t_{n+1}}{t_n} = \frac{t_{n+2}}{t_{n+1}} \text{ при } \Delta S = \text{const.} \quad (4)$$

Из уравнения (4) следует, что после того, как три последовательных значения времени действия постоянной нагрузки t_n , t_{n+1} , t_{n+2} , замеренные через равные интервалы приращения осадки грунта ΔS , образуют геометрическую прогрессию, опыт можно закончить и по уравнению (1) вычислить стабилизированную осадку грунта S_c .

Выведем формулу определения параметра A для уравнения (1). Продифференцируем уравнение (1), получаем:

$$\Delta S = \frac{A \cdot \Delta t}{t}, \quad (5)$$

где ΔS и Δt – приращение осадки грунта и соответствующее ему приращение времени действия нагрузки соответственно, мм и ч;

t – текущее время действия нагрузки после ее приложения, ч.

Формулу (5) перепишем для значений времени действия нагрузки t_{n+1} и t_n .

$$A = \frac{\Delta S \cdot t_{n+1}}{t_{n+2} - t_{n+1}}, \quad A = \frac{\Delta S \cdot t_n}{t_{n+1} - t_n}. \quad (6)$$

Тогда параметр A определится как среднее арифметическое уравнений (6)

$$A = \frac{2 \cdot \Delta S}{\frac{t_{n+2}}{t_{n+1}} + \frac{t_{n+1}}{t_n} - 2}. \quad (7)$$

Выведем формулу для определения времени t_c , необходимого для достижения стабилизации осадки грунта S_c .

Подставим в уравнение (1) различные значения времени действия постоянной нагрузки, получаем

$$S_{c-kc} = S_n + A \cdot \ln \frac{t_c - t_{kc}}{t_n}, \quad (8)$$

где t_{kc} – нормативный критерий времени условной стабилизации осадки испытываемого грунта, ч.

Вычитаем уравнение (8) из уравнения (1), получаем

$$S_c - S_{c-kc} = A \cdot \ln \frac{t_c}{t_c - t_{kc}},$$

откуда
$$\exp\left[-\frac{S_c - S_{c-kc}}{A}\right] = 1 - \frac{t_{kc}}{t_c},$$

$$t_c = \frac{t_{kc}}{1 - \exp[-(S_c - S_{c-kc})/A]} \quad (9)$$

или
$$t_c = \frac{t_{kc}}{1 - e^{-0,01/A}}, \quad (10)$$

где 0,01 – максимальное допустимое приращение осадки грунта за время t_{kc} , мм.

Установить момент, начиная с которого осадка грунта описывается уравнением (1) можно следующим образом.

После приложения нагрузки на испытываемый грунт через каждые равные интервалы приращения осадки грунта, например, $\Delta S = 0,005$ мм определяем время действия нагрузки. После того, как будут получены первые три последовательных значения времени действия нагрузки t_1 , t_2 и t_3 , проверяем не образуют ли они геометрическую прогрессию (4). Если равенство (4) не обеспечивается, через очередное приращение осадки грунта $\Delta S = 0,005$ мм, то определяем следующее значение времени действия нагрузки t_4 и проверяем, не образуют ли три последних точки наблюдений t_2 , t_3 и t_4 геометрическую прогрессию. Аналогичным образом проверяем наличие геометрической прогрессии с очередными значениями t_5 , t_6 и т.д. Как только будет установлено, что три последних значения времени действия нагрузки образуют геометрическую прогрессию, испытание грунта под действующей

степенью нагрузки можно закончить (рис. 1) и по уравнению (1) вычислить стабилизированную осадку грунта S_c [8].

Реализацию этого способа ускорения определения стабилизированной осадки грунта рассмотрим на примере компрессионных испытаний глины мягкопластичной с плотностью $\rho = 2,17$ г/см³, природной влажностью $W = 17$ %, коэффициентом водонасыщения $S_r = 0,98$ и числом пластичности $I_p = 21$ % при постоянной нагрузке $P = 100$ кПа (табл. 1).

Таблица 1. Результаты экспериментальных наблюдений за осадкой грунта

Номер точки наблюдений, n	Время действия нагрузки, t_n , ч	Осадка грунта, S_n , м
9	0,10	0,045
10	0,34	0,050
11	0,90	0,055
12	1,90	0,060
13	3,50	0,065
14	5,35	0,070
15	7,35	0,075
16	9,55	0,080
17	12,10	0,085
18	15,20	0,090
19	19,00	0,095
Точка при стабилизированной осадке грунта S_c	57,00	0,120

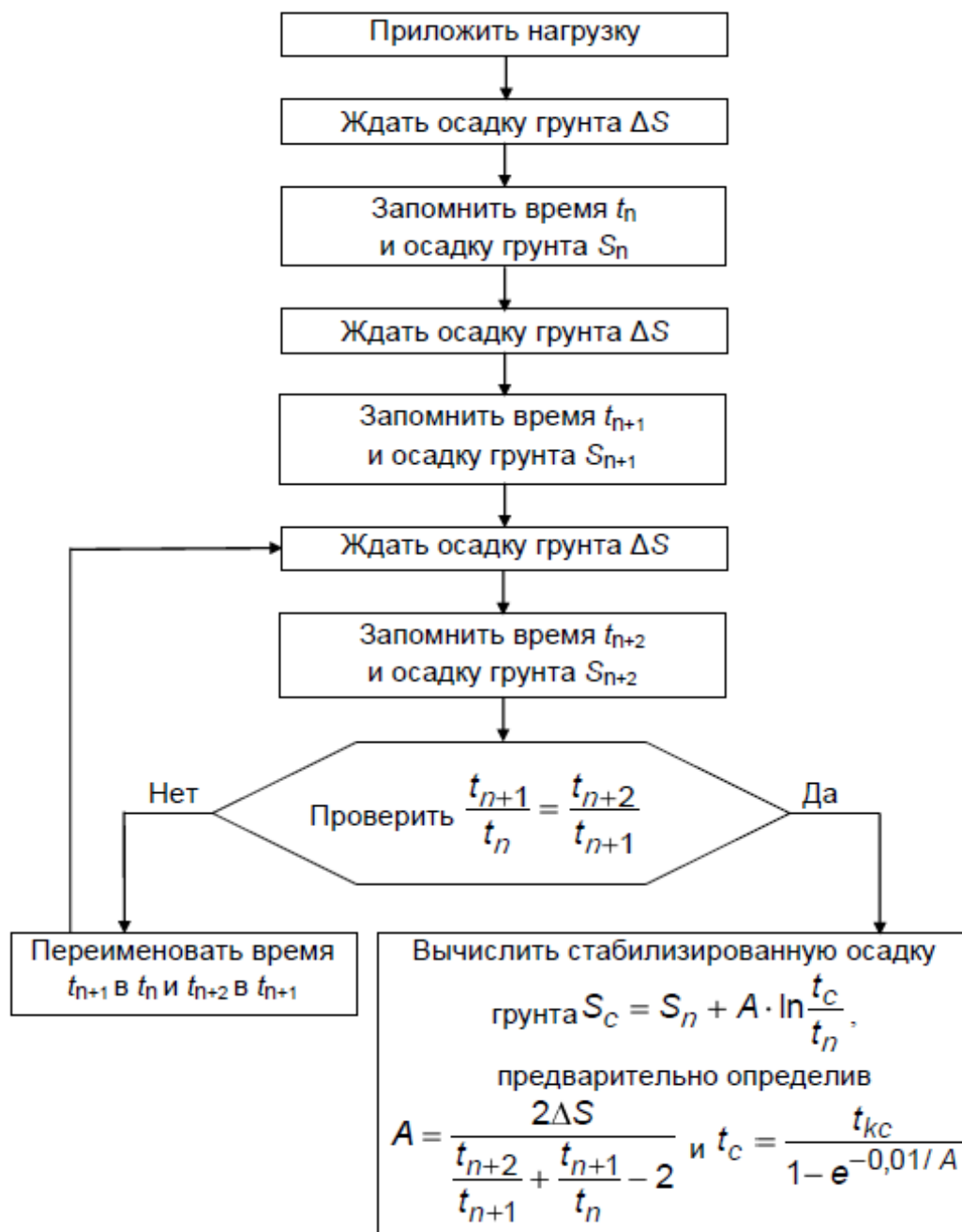


Рис. 1. Блок-схема алгоритма определения момента, с которого осадка грунта происходит по логарифмической зависимости

Расчеты начнем, например, с 13-й точки наблюдения $t_{13} = 3,50$ часа. Очередные точки наблюдения, соответствующие приращению осадки грунта $\Delta S = 0,005$ мм, были зафиксированы при $t_{14} = 5,35$ часа и $t_{15} = 7,35$ часа.

Определяем

$$\frac{t_{14}}{t_{13}} = \frac{5,35}{3,50} = 1,53; \quad \frac{t_{15}}{t_{16}} = \frac{7,35}{5,35} = 1,37.$$

Эти соотношения равны между собой с погрешностью:

$$\frac{1,37-1,53}{1,37} \cdot 100 = 11,68 (\%).$$

Чтобы установить, допустима ли такая погрешность, рассчитаем стабилизированную осадку грунта S_c .

По уравнению (7) находим постоянную $A_{13...15}$ для интервалов времени действия нагрузки t_{13} , t_{14} и t_{15}

$$A_{13...15} = \frac{2 \cdot 0,005}{\frac{7,35}{5,35} + \frac{5,35}{3,50} - 2} = 0,011 (\text{мм}).$$

По уравнению (10) вычисляем время достижения стабилизации осадки грунта. Так как в нашем случае испытывалась глина, за нормативный критерий стабилизации осадки глины примем осадку, не превышающую 0,01 мм за 16 часов, т.е. $t_{\text{кв}} = 16$ часов.

$$t_c = \frac{16}{1 - e^{-0,01/0,0111}} = 26,9 (\text{ч}).$$

По уравнению (1) рассчитываем стабилизированную осадку грунта

$$S_c = S_{13} + A_{13...15} \cdot \ln \frac{t_c}{t_{13}} = 0,065 + 0,011 \cdot \ln \frac{26,9}{3,50} = 0,088 (\text{мм}).$$

Фактическая стабилизированная осадка грунта при действующей ступени нагрузки составила 0,120 мм.

Погрешность расчета стабилизированной осадки грунта по точкам наблюдений № 13, 14 и 15 составляет:

$$\delta_{S_c} = \frac{S_c - S_c^{\Phi}}{S_c^{\Phi}} \cdot 100 = \frac{0,088 - 0,120}{0,120} \cdot 100 = 26,6 (\%).$$

Такая погрешность расчета стабилизированной осадки грунта не допустима, поэтому продолжаем аналогичные вычисления для следующих точек наблюдений № 14, 15 и 16 и т.д., результаты которых приведены в таблице 2.

Таблица 2. Сравнение расчетных значений осадки грунта с экспериментальными

Номер первой расчетной точки, n	13	14	15	16	17
Критерий выбора расчетных точек, $\frac{t_{n+1}}{t_n} = \frac{t_{n+2}}{t_{n+1}}$	$\frac{5,35}{3,50} = \frac{7,35}{5,35}$	$\frac{7,35}{5,35} = \frac{9,55}{7,35}$	$\frac{9,55}{7,35} = \frac{12,10}{9,55}$	$\frac{12,10}{9,55} = \frac{15,20}{12,10}$	$\frac{15,20}{12,10} = \frac{19,00}{15,20}$
Погрешность критерия выбора расчетных точек, %	11,68	5,44	2,60	1,09	0,48
Параметр кривой консолидации, A , мм	0,0111	0,0149	0,0175	0,0189	0,0198
Расчетное время стабилизации осадки грунта, t_c , ч	26,9	32,7	36,8	38,9	40,3
Расчетная стабилизированная осадка грунта, S_c , мм	0,088	0,097	0,103	0,106	0,109
Погрешность δ_{S_c} определения осадки грунта S_c , %	26,6	19,2	14,2	11,7	9,2
Примечание – Номера точек и соответствующие им значения времени действия нагрузки и осадки грунта приведены в таблице 1					

Допустим, что в данном примере погрешность δ_{S_c} определения стабилизированной осадки грунта может быть не более 10 %. Тогда из таблицы 2 определяем, что можно ограничиться точками наблюдений № 17, 18 и 19, при этом погрешность равенства отношений $\frac{t_{18}}{t_{17}}$ и $\frac{t_{19}}{t_{18}}$ должна быть не более 0,5 %. Следовательно, в рассматриваемом примере после 19-й точки наблюдений, соответствующей $t_{19} = 19$ часам после приложения нагрузки на грунт, испытание грунта на действующей ступени нагрузки можно закончить, а величину стабилизированной осадки грунта S_c вычислить по уравнению (1). Так

как фактическое время стабилизации осадки грунта на ступени нагрузки составляет 57 часов (см. табл. 1), получаем ускорение определения стабилизированной осадки грунта S_c на ступени нагрузки в 3 раза.

Таким образом, ускорение испытаний грунтов на сжимаемость можно осуществить путем установления на каждой ступени нагрузки момента, когда три последних значения времени действия ступени нагрузки, замеренные через равные интервалы приращения осадки испытываемого грунта, образуют геометрическую прогрессию. С этого момента испытание грунта под действующей ступенью нагрузки можно закончить, а его стабилизированную осадку определить по логарифмическому уравнению вторичной консолидации грунтов [5, 7, 9]. При этом обеспечивается достоверность получаемых результатов, т.к. рассмотренное ускорение испытаний грунтов на сжимаемость основано на использовании фактических данных испытываемых грунтов, и ускорение испытаний грунтов на сжимаемость, например, при 6-ти ступенях нагрузки до 18 раз.

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.

7. **Цытович Н.А.** Механика грунтов. М., Высшая школа, 1983. 288 с.

8. Авт. св. СССР № 1502700 Е 02 Д 1/00. Способ определения деформационных характеристик грунтов / **Ляшенко П.А., Горячев М.И., Денисенко В.В.** // Открытия. Изобретения. 1989, № 31.

9. **Вялов С.С.** Реологические основы механики грунтов. М.: Высшая школа, 1978. 447 с.

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. М.: Nedra, 1984. 438 p.

4. **Veselovskii V.M.** Precipitation structures over time. М.-L .: Stroyizdat, 1940. 80 p.

5. **Goldstein M.N.** Mechanical properties of soils (voltage-deformability and strength characteristics). М.: 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). М., 1986, pp. 25-33.

7. **Tsytovich N.A.** Soil Mechanics. М.: Graduate School, 1983. 288 p.

8. Aut. sv. USSR № 1502700 Е 02 Д 1/00. A method for determining the deformation characteristics of soils / **Ljashenko P.A., Gorjachev M.I., Denisenko V.V.** // Opening. Inventions. 1989, № 31.

9. **Vyalov S.S.** Rheological fundamentals of soil mechanics. М.: Higher School, 1978. 447 p.

*ACCELERATED TESTING OF SOIL ON THE COMPRESSIBILITY BY
DETERMINING THE MOMENT AT WHICH THEIR UPSET OCCURS
LOGARITHMIC DEPENDENCE*

V.V. DENISENKO¹, P.A. LYASHENKO²

¹*Kuban State University of Technology,
2, Moskovskay str., Krasnodar, Russian Federation, 350072,
e-mail: devivi@yandex.ru*

²*Kuban State Agrarian University,
13, Kalinina str., Krasnodar, Russian Federation, 350044,
e-mail: lyseich1@yandex.ru*

Describes a method for accelerating soil tests for compressibility, which consists in determining at each stage of the load point where the last three time values of stage loading, measured at regular intervals increment precipitation test soil, form a geometric progression. From this moment on the test soil under current load step can be completed, and it stabilized sludge determined by the logarithmic equation secondary consolidation of soil. Theoretical and experimental justification of the method and algorithm of the practical implementation of a method that simplifies the establishment of this point in the process of soil testing and to automate this operation. The method provides reliable results, because based on the use of evidence of the test soils in the tests and speed tests on soil compressibility at the 6 stages of loading up to 18 times.

Key words: compressive load, sludge stabilization, consolidation equation, the predicted sediment.