

УСКОРЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ ГРУНТОВ НА СЖИМАЕМОСТЬ ПУТЕМ ЭКСТРАПОЛЯЦИИ ИХ КРИВЫХ КОНСОЛИДАЦИИ

В.В. ДЕНИСЕНКО¹, П.А. ЛЯШЕНКО²

¹Кубанский государственный технологический университет,
350072, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Московская, 2в;
электронная почта: devivi@yandex.ru

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

Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований по оценке ускорения испытаний грунтов на сжимаемость путем установления момента совпадения фактической осадки испытываемого грунта с прогнозируемой по уравнению консолидации, выведенному по фактическим значениям осадки испытываемого грунта, предшествующим прогнозируемому, прекращения с этого момента испытания грунта под действующей ступенью нагрузки и определения стабилизированной осадки грунта по выведенному уравнению консолидации. Приведен алгоритм практического осуществления способа, упрощающий установление этого момента в процессе испытания грунтов и позволяющий автоматизировать эту операцию. Установлено, что рассмотренный способ ускорения испытаний грунтов на сжимаемость, обеспечивает достоверность получаемых 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 в процессе испытания конкретного грунта под действующей нагрузкой уравнения, описывающего осадку этого грунта до достижения стабилизации его осадки и позволяющего досрочно закончить испытание грунта под действующей нагрузкой и рассчитать величину его стабилизированной осадки.

Установить такое уравнение можно следующим образом.

После окончания приложения нагрузки в течение 1 часа через определенные интервалы времени, например, через 1, 2, 5, 10, 20, 30 и 60 мин измерить осадку грунта, соответственно $S_1, S_2 \dots S_7$. По значениям осадки грунта $S_1, S_2 \dots S_7$ вывести уравнение $S(t)$, по которому рассчитать прогнозируемое значение осадки грунта S^p_8 через определенное время, например, через 0,5 часа, а испытание грунта продолжить. Через 0,5 часа измерить значение фактической осадки грунта S_8 , которое сравнить с прогнозируемым S^p_8 . Если S^p_8 не совпадет с S_8 , в пределах допускаемой погрешности, вывести 2-е уравнение $S(t)$ с учетом последнего фактического значения осадки грунта S_8 и рассчитать очередное прогнозируемое значение осадки грунта S^p_9 через 0,5 часа, а затем сравнить его с фактическим S_9 через этот интервал времени и т.д. (рис. 1). Как только прогнозируемое значение осадки грунта совпадет с допускаемой погрешностью с фактическим, испытания грунта под действующей нагрузкой можно закончить и по последнему уравнению $S(t)$ рассчитать стабилизированную осадку грунта S_c [7].

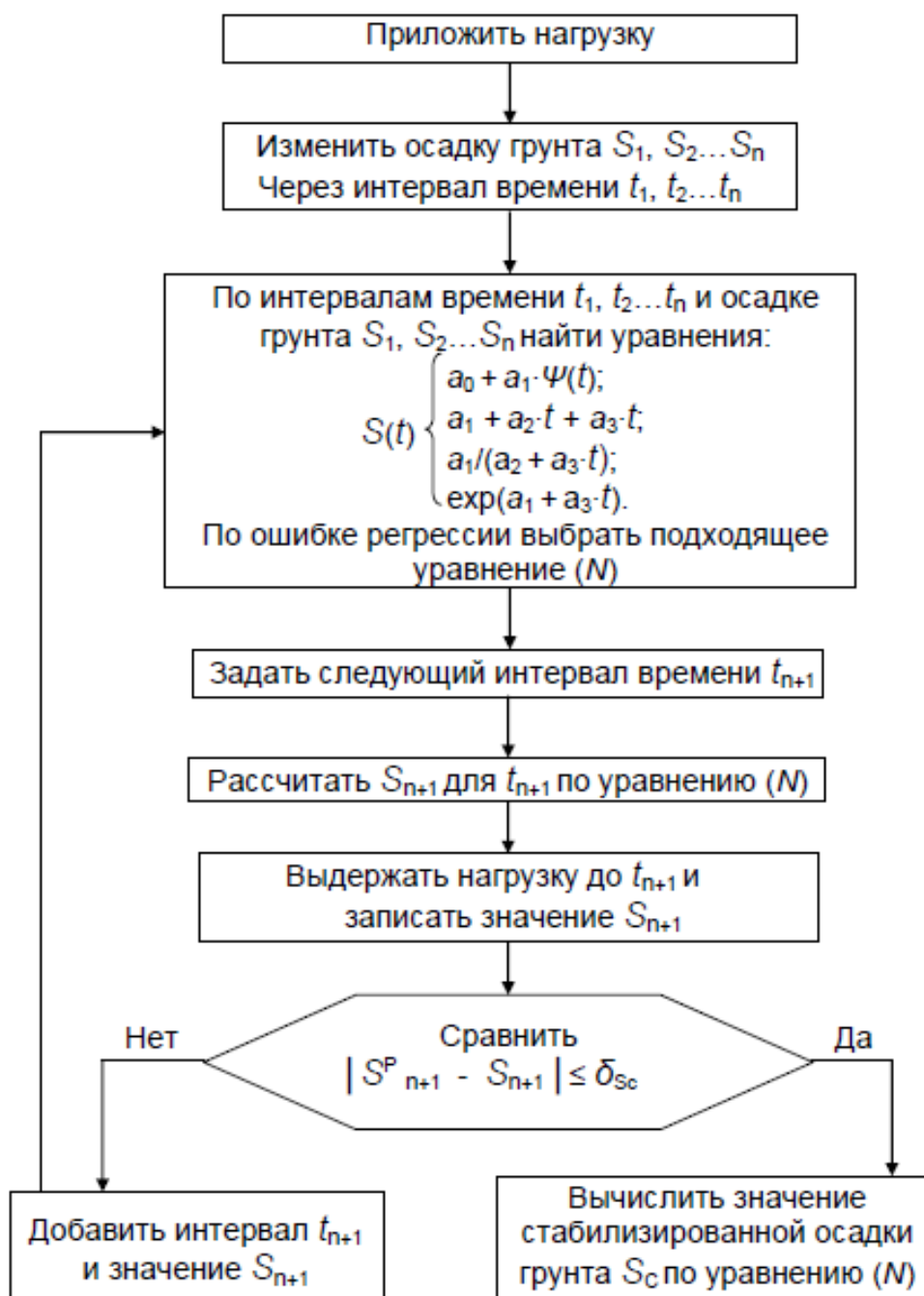


Рис. 1. Блок-схема выведения уравнения $S(t)$ для вычисления стабилизированной осадки грунта

Реализацию этого способа ускорения определения стабилизированной осадки грунта рассмотрим на примере компрессионных испытаний глины мягкопластичной с плотностью $\rho = 2,17 \text{ г/см}^3$, природной влажностью $W = 17 \%$, коэффициентом водонасыщения $S_r = 0,98$ и числом пластичности $I_p = 21 \%$ при постоянной нагрузке $P = 100 \text{ кПа}$ (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

Выведем уравнение $S(t)$ по первой группе точек наблюдений, например № 1-15. Для упрощения расчета ограничимся четырьмя последними точками этой группы № 12-15 и допустим, что по ошибке регрессии более подходящей для данного примера в качестве аппроксимирующей оказалась функция

$$S = a_0 + a_1 \cdot \psi(t), \quad (1)$$

где a_0 и a_1 – постоянные;

ψ – логарифмическая производная от гамма-функции [8].

Для вычисления постоянных воспользуемся методом средних [9]. Преобразуем запись осадки грунта к виду, удобному для дальнейшей обработки. Для этого введем новые безразмерные переменные

$$t_y = 10 \cdot t, \quad S_y = S / 0,005, \quad (2)$$

где t_y и t – время действия постоянной нагрузки после ее приложения соответственно в безразмерных единицах и часах;

10 – коэффициент преобразования 1/ч;

S_y и S – осадка грунта соответственно в безразмерных единицах и мм;

0,005 – осадка грунта, принятая для удобства перевода мм в безразмерные единицы, мм.

Переведем значения таблицы 1 в условные единицы (табл. 2).

Таблица 2. Результаты экспериментальных наблюдений за осадкой грунта в безразмерных переменных

Номер точки наблюдений, n	Время действия нагрузки, t_y	Осадка грунта, S_y
9	1	9
10	3	10
11	9	11
12	19	12
13	35	13
14	53	14
15	73	15
16	95	16
17	121	17
18	152	18
19	190	19
Точка при стабилизированной осадке грунта S_c	570	24

Выпишем уклонения, рассчитанные по уравнению (1), для точек № 12-15 из таблицы 2:

$$\begin{aligned} \delta_{12} &= a_0 + 2,918 \cdot a_1 - 12; \\ \delta_{13} &= a_0 + 3,541 \cdot a_1 - 13; \\ \delta_{14} &= a_0 + 3,961 \cdot a_1 - 14; \\ \delta_{15} &= a_0 + 4,290 \cdot a_1 - 15 \end{aligned} \quad (3)$$

Составим условие приближения функции (1) к опытным данным

$$\delta_{12} + \delta_{13} = 0, \quad \delta_{14} + \delta_{15} = 0, \quad (4)$$

или с учетом (3),

$$\begin{cases} 2a_0 + 6,459 \cdot a_1 = 25; \\ 2a_0 + 8,251 \cdot a_1 = 29. \end{cases} \quad (5)$$

Разрешая систему (5), получаем значения постоянных, и теперь аппроксимирующая функция имеет вид

$$S_y = 5,291 + 2,232 \cdot \psi(t_y). \quad (6)$$

Подставляя в уравнения (3) значения постоянных a_0 и a_1 , найдем среднее уклонение

$$\delta_{cp} = 1/4(\delta_{12} + \delta_{13} + \delta_{14} + \delta_{15}) = -0,0117. \quad (7)$$

Вычислим скорость осадки грунта

$$\frac{\Delta S_y}{\Delta t_y} \approx \frac{2,232}{t_y} \quad (8)$$

Примем за нормативный критерий стабилизации осадки глины осадку, не превышающую 0,01 мм за 16 часов или в условных переменных (2)

$$2/160 = 0,0125.$$

Расчетный момент времени, соответствующий принятому нормативному критерию стабилизации осадки грунта, получаем из уравнения (8)

$$t_y^c = \frac{2,232}{0,0125} = 178,$$

а расчетная величина стабилизированной осадки грунта составляет

$$S_y^c = 5,291 + 2,232 \cdot \psi(t_y^c) = 16,9.$$

Расчетное значение осадки грунта сравниваем с фактическим. При этом допустим, что в данном примере погрешность определения стабилизированной осадки грунта δ_{S_c} может быть не более 10 %.

$$\delta_{S_c} = \frac{S_y^c - S_c^\Phi}{S_c^\Phi} \cdot 100 = \frac{16,9 - 24,0}{24,0} \cdot 100 = 30 > 10(\%).$$

Возьмем другую группу точек № 13-16 и повторим вычисления, затем следующую и т.п.

Результаты последовательных вычислений в сравнении с экспериментальными данными приведены в таблице 3, из которой следует, что по мере снижения значений среднего уклонения, расчетная величина стабилизированной осадки грунта приближается к экспериментальной. Таким образом, среднее уклонение (мера приближения) может служить индикатором точности вычисления величины стабилизированной осадки грунта.

Таблица 3. Расчетные параметры стабилизации осадки грунта

Номера наблюдений	Аппроксимирующая функция	Среднее уклонение, δ_{cp}
1	2	3
12-15	$S_y = 5,291 + 2,232 \cdot \Psi(t_y)$	- 0,0117
13-16	$S_y = 2,320 + 2,981 \cdot \Psi(t_y)$	- 0,0021
14-17	$S_y = - 0,515 + 3,640 \cdot \Psi(t_y)$	- 0,0020
15-18	$S_y = - 2,623 + 4,098 \cdot \Psi(t_y)$	- 0,0017
16-19	$S_y = - 3,804 + 4,343 \cdot \Psi(t_y)$	- 0,0010

Продолжение таблицы 3

Время стабилизации осадки грунта, t_y^c	Величина стабилизированной осадки грунта, S_y^c	Погрешность определения стабилизированной осадки грунта S_c , δ_{S_c} , %
4	5	6
178	16,9	30
238	18,6	22
291	20,1	16
328	21,1	12
347	21,6	10

Примечания к таблице 3:

1. Номера точек и соответствующие им значения времени действия постоянной нагрузки и осадки грунта приведены в таблице 1;
2. S_y и t_y – соответственно безразмерные осадки грунта и время действия нагрузки.

Из результатов вычисления различных групп точек наблюдений (см. табл. 3) следует, что при допускаемой погрешности расчета величины стабилизированной осадки равной 10 % опыт можно закончить после 19-й точки наблюдения, т.е. через 19 часов (см. табл. 1).

Так как фактическое время стабилизации осадки грунта t_c составляет 57 часов, а по рассмотренному способу 19 часов, получаем сокращение длительности определения S_c в 3 раза.

Таким образом, ускорение испытаний грунтов на сжимаемость можно осуществить путем установления на каждой ступени нагрузки момента, когда величина фактической осадки испытываемого грунта совпадет с прогнозируемой по уравнению консолидации грунта, выведенному по фактическим значениям осадки испытываемого грунта, предшествующим прогнозируемому. С этого момента испытание грунта под действующей ступенью нагрузки можно закончить, а его стабилизированную осадку определить по уравнению консолидации, выведенному по фактическим данным испытываемого грунта. При этом обеспечивается достоверность получаемых результатов, т.к. рассмотренное ускорение испытаний грунтов на сжимаемость основано на использовании фактических данных испытываемых грунтов в ходе испытаний, 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 ПНИИИСа). М., 1986. С. 25-33.

7. Авт. св. СССР № 1502699 Е 02 D 1/00. Способ определения деформационных характеристик грунтов / **Ляшенко П.А., Горячев М.И., Денисенко В.В.** // Открытия. Изобретения. 1989, № 31.

8. **Янке Е., Эмде Ф., Леш Ф.** Специальные функции. М.: Наука, 1968. 344 с.

9. **Демидович Б.П., Марон И.А., Шувалов Э.З.** Численные методы анализа. М.: Физматгаз, 1962. 368 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. 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.

7. Aut. sv. USSR № 1502699 E 02 D 1/00. A method for determining the deformation characteristics of soils / **Ljashenko P.A., Gorjachev M.I., Denisenko V.V.** // Opening. Inventions. 1989, № 31.

8. **Jahnke E., Emde F., Losch F.** Spezial function. M.: Nauka, 1968. 344 p.

9. **Demidovich B.P., Maron I.A., Shuvalov E.Z.** Numerical methods of analysis. M.: Fizmatgiz, 1962. 368 p.

*ACCELERATED TESTING OF SOIL ON THE COMPRESSIBILITY BY
EXTRAPOLATING THEIR CURVES CONSOLIDATION*

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*

The results of theoretical and experimental studies to assess the acceleration test on the compressibility of the soil by setting matches the actual date of the test soil with rainfall predicted by the equation of consolidation, derived by the actual values of the precipitation of the test soil prior predictable termination from that moment on the test soil under the action of load steps and definitions stabilized sludge on soil derived equation consolidation. 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. It is found that the considered method of accelerated tests on soil compressibility, provides the reliability of the 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.