

УСКОРЕНИЕ КОМПРЕССИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ ГРУНТОВ МЕТОДОМ ПОСТОЯННО ВОЗРАСТАЮЩЕЙ НАГРУЗКИ

В.В. ДЕНИСЕНКО¹, П.А. ЛЯШЕНКО²

¹Кубанский государственный технологический университет,
350002, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Московская, 2,
электронная почта: *denvivi@yandex.ru*

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

Компрессионные испытания грунтов при определении их характеристик сжимаемости в настоящее время производятся главным образом методом ступенчато возрастающей нагрузки (методом СВН), который прост в реализации, но требует больших затрат времени и не соответствует режимам нагружения грунтов при строительстве. Из известных методов компрессионных испытаний грунтов наибольшее соответствие режимам нагружения грунтов оснований при строительстве обеспечивает метод постоянно возрастающей нагрузки (метод ПВН), не получивший до настоящего времени широкого применения при производстве инженерно-геологических изысканий, т.к. не достаточно изучен и не разработаны оборудование и методика для его реализации. Авторами проведены исследования особенностей сжимаемости грунтов при компрессионных испытаниях методом ПВН, в результате которых разработаны методика компрессионных испытаний грунтов методом ПВН и автоматический компрессионный прибор с постоянно возрастающей нагрузкой АКП-БН и проведены исследования по оценке ускорения компрессионных испытаний методом ПВН. Установлено, что по сравнению с методом ступенчато возрастающей нагрузки метод ПВН ускоряет компрессионные испытания грунтов в 1,4-8,4 раза.

Ключевые слова: постоянно возрастающая нагрузка, ступенчато возрастающая нагрузка, образец грунта, осадка образца, стабилизация осадки.

Одним из трудоемких процессов при производстве инженерно-геологических изыскания является определение характеристик сжимаемости грунтов. Основной объем этих определений производится в лабораторных условиях с помощью компрессионных приборов методом ступенчато возрастающей нагрузки (метод СВН), при котором приложение нагрузки на грунт прикладывается ступенями с выдержкой каждой до стабилизации осадки грунта. Метод СВН прост в реализации, но требует больших затрат времени. Кроме того приложение нагрузки на образец грунта ступенями с выдержкой каждой до стабилизации осадки грунта при методе СВН не соответствует режиму нагружения грунтов оснований при строительстве, при котором нагрузка увеличивается во времени практически постоянно [1].

Из известных методов компрессионных испытаний грунтов наибольшее соответствие режимам нагружения грунтовых оснований при строительстве обеспечивает метод постоянно возрастающей нагрузки (метод ПВН). Метод ПВН заключается в приложении постоянно возрастающей нагрузки со скоростью обеспечивающей консолидацию грунта в процессе его нагружения [1]. Кроме того он повышает достоверность и точность определения показателей сжимаемости грунтов и сокращает длительность их испытаний [1-3]. Однако до настоящего времени метод ПВН не получил широкого применения при производстве инженерно-геологических изысканий, т.к. не достаточно изучен, не разработаны методика и оборудование для его широкого практического применения [1].

Нами проведены исследования особенностей сжимаемости грунтов при компрессионных испытаниях постоянно возрастающей нагрузкой [4-10], в результате которых:

- обоснована достоверность результатов испытаний грунтов методом ПВН;
- изучены особенности сжимаемости грунтов при нагружении и после его окончания в зависимости от скорости приложения ПВН;
- изучено влияние физических свойств грунтов на скорость приложения ПВН;
- исследовано влияние скорости приложения ПВН на степень консолидации грунтов при нагружении и после его окончания;
- установлены закономерности деформирования грунтов в процессе нагружения и после его окончания при постоянной конечной нагрузке в зависимости от скорости приложения ПВН;
- установлена аналитическая связь предельной скорости приложения ПВН полностью водонасыщенных грунтов с их физическими свойствами;
- сформулирован физически обоснованный критерий выбора скорости нагружения грунтов методом ПВН;

- оценены случайная и общая погрешности определения показателей сжимаемости грунтов методом ПВН.

По результатам проведенных исследований [4-10] разработана методика компрессионных испытаний грунтов методом ПВН [11], сформулированы технические требования к компрессионному прибору с постоянно возрастающей нагрузкой и разработан автоматический компрессионный прибор с постоянно возрастающей нагрузкой АКП-6Н [12].

Кроме того нами проведены исследования по оценке ускорения компрессионных испытаний методом ПВН.

Исследования проводились по методике компрессионных испытаний грунтов методом ПВН [11] на автоматическом компрессионном приборе с постоянно возрастающей нагрузкой АКП-6Н [12] в сравнении с методом ступенчато возрастающей нагрузки (метод СВН) по ГОСТ 12248 на автоматическом компрессионном приборе со ступенчато возрастающей нагрузкой АКП-3С [13-14]. Метод СВН принят для сравнения [15], т.к. он строго определен по граничным условиям оценки сжимаемости испытываемых грунтов, стандартизирован и наиболее распространен на практике.

Испытания производились на образцах-близнецах глинистых грунтов (супесях, суглинках и глинах) природного сложения различной консистенции (таблица 1) до одинаковой конечной нагрузки P_k .

Таблица 1 – Физические свойства испытанных образцов-близнецов грунтов, испытанных методом ПВН и методом СВН

Номер образцов-близнецов грунтов	Глубина отбора, м	Природная влажность, W , %	Плотность, ρ , т/м ³	Плотность частиц, ρ_s , т/м ³	Коэффициент пористости, e	Коэффициент водонасыщения, S_r	Число пластичности, I_p , %	Показатель текучести, I_L
2	5,0	22	2,09	2,72	0,591	1,0	19	0,10
9	1,0	26	1,72	2,71	0,985	0,72	15	<0
10	2,0	25	1,82	2,71	0,856	0,79	15	<0
11	4,0	20	1,85	2,71	0,704	0,77	14	<0
12	5,0	21	1,86	2,71	0,760	0,75	15	<0
14	2,0	23	1,97	2,71	0,694	0,90	14	0
15	3,0	29	1,91	2,73	0,845	0,94	21	0
17	4,0	28	1,98	2,71	0,748	1,0	10	0,50
25	1,0	22	1,60	2,71	1,066	0,53	16	<0
27	1,0	19	1,97	2,70	0,636	0,81	13	<0

Окончание таблицы 1

34	3,0	6	1,51	2,67	0,880	0,18	5	<0
35	3,0	20	1,82	2,71	0,783	0,69	15	<0
36	3,0	32	1,95	2,73	0,845	1,0	21	0,14
37	5,0	27	2,02	2,67	0,679	1,0	6	0,83
45	3,0	19	1,70	2,70	0,862	0,60	11	<0
46	10,0	23	2,05	2,71	0,623	1,0	17	<0
73	6,0	26	2,03	2,67	0,658	1,0	6	1,0

В приборе АКП-3С нагрузка на образцы грунтов прикладывалась в соответствии с ГОСТ 12248 стандартными ступенями с выдержкой каждой ступени нагрузки до стабилизации деформации грунта.

В приборе АКП-6Н нагрузка на образцы грунтов прикладывалась с постоянной скоростью возрастания, определяемой в зависимости от физических свойств грунтов и условия обеспечения относительной дополнительной осадкой после приложения ПВН равной $Q \leq 10 \%$, по формуле [9]

$$V_{\max} = 3,672 \cdot Q^{0,1516 + 12,35 / I_p - 1,652 \cdot W / W_L + 1,453 \cdot e}, \text{ (кПа/ч)} \quad (1)$$

где I_p – число пластичности грунта, %;

W и W_L – влажность грунта, соответственно, природная и на границе текучести, %;

e – коэффициент пористости грунта, единиц долей;

Q – относительная дополнительная осадка грунта после окончания приложения ПВН при конечной нагрузке P_k , %.

$$Q = \frac{S_c}{S_k} 100, \quad (2)$$

где S_k и S_c – осадка грунта соответственно за время приложения ПВН до конечной нагрузки P_k и дополнительная стабилизированная при P_k после приложения ПВН, мм.

При методе ПВН после приложения ПВН до конечной нагрузки P_k образцы грунтов выдерживались при P_k до стабилизации их осадки.

При испытании образцов грунтов методом СВН регистрировалось t^c – общее время их испытания на всех ступенях нагрузки.

При испытании образцов грунтов методом ПВН регистрировалось t^n_k – время приложения ПВН до конечного значения нагрузки P_k и t^n – общее время испытания грунтов, включающее время приложения ПВН до P_k и время выдержки образцов грунтов при P_k до стабилизации их осадки.

Результаты испытаний пар образцов-близнецов грунтов при методе ПВН и методе СВН до одинаковой конечной нагрузки с относительной дополнительной осадкой после нагружения при методе ПВН $Q \leq 10\%$ приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Длительность компрессионных испытаний образцов-близнецов методами ПВН и СВН до одинаковой конечной нагрузки

Номер образцов-близнецов	Конечная нагрузка, P_k , кПа	Испытания методом				Сокращение длительности испытаний, раз	
		СВН	ПВН			t^c/t^n	t^c/t^n_k
			t^c , ч	t^n , ч	t^n_k , ч		
2	300	202,2	67,8	48	3,9	3,0	4,2
9	300	140,0	44,7	24	7,1	3,1	5,8
10	300	92,5	26,7	12	4,0	3,5	7,7
11	300	101,0	25,2	12	2,0	4,0	8,4
12	300	100,8	38,0	12	10,0	2,6	8,4
14	300	92,0	27,7	12	5,3	3,3	7,7
15	300	220,8	122,6	96	5,8	1,8	2,3
17	300	213,0	66,6	48	4,0	3,2	4,4
25	300	76,4	36,8	24	5,4	2,1	3,2
27	300	77,5	29,5	12	5,7	2,6	6,4
34	500	84,6	19,4	12	2,6	4,4	7,0
35	500	193,2	76,4	48	4,9	2,5	4,0
36	500	266,4	124,6	96	2,5	2,1	2,8
37	500	57,6	11,2	3	5,2	5,1	19,2
45	500	172,8	56,8	48	3,4	3,0	3,6
46	500	194,3	114,3	96	4,2	1,7	2,0
73	500	67,8	51,7	48	1,9	1,3	1,4
Средние значения		138,4	55,3	38,3			
<p>Примечания</p> <p>1 t^c и t^n – общая длительность испытания соответственно при методе СВН и методе ПВН с определением дополнительной осадки S_c при $P_k = const$.</p> <p>2 t^n_k – время нагружения образцов грунта до P_k при методе ПВН</p>							

Из таблицы 2 следует, что при испытании грунтов методом ПВН со скоростями приложения ПВН, обеспечивающими относительную дополнительную осадку грунтов $Q \leq 5\%$, при которой степень их консолидации составляет

$U \geq 0,952$ [9], длительность испытаний различных грунтов по сравнению с методом СВН сокращается в 1,4-8,4 раза. В среднем длительность испытаний грунтов методом ПВН сокращается в 4,5 раза, в т.ч. супесей – в 4,2 раза, суглинков – в 5,0 раз, глин – в 3,5 раза.

Даже при определении стабилизированной осадки грунтов после приложения ПВН при постоянной конечной нагрузке длительность испытаний различных грунтов сокращается в 1,4-5,1 раза. В среднем длительность испытаний различных грунтов методом ПВН с определением стабилизированной осадки грунтов после приложения ПВН при постоянной конечной нагрузке сокращается в 2,9 раза, в т.ч. супесей – в 3,6 раза, суглинков – в 2,9 раза, глин – в 2,3 раза.

Таким образом, за счет того, что при методе ПВН нагрузка прикладывается без выдержки до стабилизации осадки образца грунта, длительность компрессионных испытаний грунтов по сравнению с методом СВН, при котором каждая ступень нагрузки выдерживается до стабилизации осадки грунта, сокращается в 1,4-8,4 раза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Денисенко В.В., Ляшенко П.А. Анализ методов компрессионных испытаний грунтов // Научные труды Кубанского государственного технологического университета, 2015, № 2. – С. 104-125.
2. Денисенко В.В., Ляшенко П.А. Ускоренное определение сжимаемости грунтов методом ПВН // Проект. – М., 1994, № 1. – С. 7-9.
3. Денисенко В.В., Ляшенко П.А. Новые результаты компрессионных испытаний грунтов // Проект. – М., 1995, № 2-3. – С. 76-77.
4. Ляшенко П.А., Денисенко В.В., Беляева Ю.А. Изучение структурной прочности глинистого грунта при постоянно возрастающей нагрузке // Научный журнал КубГАУ. – Краснодар: КубГАУ, 2012, № 84 (10). – С. 207-221.
5. Денисенко В.В., Ляшенко П.А. О критерии выбора скорости нагружения грунтов постоянно возрастающей нагрузкой // Библиографический указатель депонированных рукописей. – М.: ВНИИТПИ, 1993, вып. 1, № 11393. – 15 с.

6. Ляшенко П.А. Микроструктурная деформируемость глинистых грунтов. – Краснодар: КубГТУ, 2001. 123 с.

7. Ляшенко П.А., Денисенко В.В. Вычисление характеристик микроструктуры грунта в опыте с компрессионным сжатием образца // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета, 2009, № 45 (01). С. 66-82.

8. Ляшенко П.А., Денисенко В.В. Контактное взаимодействие элементов микроструктуры глинистого грунта // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета, 2012, № 78 (04). С. 291-318.

9. Денисенко В.В., Ляшенко П.А. Обоснование критерия выбора скорости нагружения грунтов при компрессионных испытаниях постоянно возрастающей нагрузкой // Научные труды Кубанского государственного технологического университета. – Краснодар: КубГТУ, 2016, № 5. – С. 110-122.

10. Ляшенко П.А. Сопротивление и деформации глинистого грунта. – Краснодар: КубГАУ, 2014. – 163 с.

11. Денисенко В.В., Ляшенко П.А. Методика компрессионных испытаний грунтов постоянно возрастающей нагрузкой // Научные труды Кубанского государственного технологического университета. – Краснодар: КубГТУ, 2016, № 15. С. 16-27.

12. Денисенко В.В., Ляшенко П.А. Автоматический компрессионный прибор АКП-6Н для испытания грунтов постоянно возрастающей нагрузкой // Научные труды Кубанского государственного технологического университета. – Краснодар: КубГТУ, 2016, № 6. – С. 156-169.

13. Денисенко В.В., Литвинов Ю.А., Ляшенко П.А., Байков О.Н., Плахтеев Г.В. Автоматический компрессионный прибор АКП-3С // Отчет о НИОКР по теме № 42/87 Госстроя РСФСР. – Краснодар: СевКавТИСИЗ, 1987. – 320 с.

14. Денисенко В.В., Ляшенко П.А. Об экспериментальных компрессионных приборах для исследования сжимаемости грунтов постоянно

возрастающей нагрузкой / Научные труды Кубанского государственного технологического университета, 2015, № 9. С. 363-384.

15. Денисенко В.В., Ляшенко П.А. Экспериментальное обоснование правомерности сравнения компрессионных испытаний грунтов методом постоянно возрастающей нагрузки и методом ступенчато возрастающей нагрузки // Научные труды Кубанского государственного технологического университета, 2015, № 11. С. 416-429.

REFERENCES

1. Denisenko V.V., Lyashenko P.A. Analiz metodov kompressionnykh ispytaniy gruntov // Nauchnye trudy Kubanskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta, 2015, № 2. – S. 104-125.

2. Denisenko V.V., Lyashenko P.A. Uskorennoe opredelenie szhimaemosti gruntov metodom PVN // Proekt. – M., 1994, № 1. – S. 7-9.

3. Denisenko V.V., Lyashenko P.A. Novye rezultaty kompressionnykh ispytaniy gruntov // Proekt. – M., 1995, № 2-3. – S. 76-77.

4. Lyashenko P.A., Denisenko V.V., Belyaeva Yu.A. Izuchenie strukturnoy prochnosti glinistogo grunta pri postoyanno vozrastayushchey nagruzke // Nauchnyy zhurnal KubGAU. – Krasnodar: KubGAU, 2012, № 84 (10). – S. 207-221.

5. Denisenko V.V., Lyashenko P.A. O kriterii vybora skorosti nagruzheniya gruntov postoyanno vozrastayushchey nagruzkoj // Bibliograficheskiy ukazatel deponirovannykh rukopisey. – M.: VNIINTPI, 1993, vyp. 1, № 11393. – 15 s.

6. Lyashenko P.A. Mikrostrukturnaya deformiruemost glinistykh gruntov. – Krasnodar: KubGTU, 2001. 123 s.

7. Lyashenko P.A., Denisenko V.V. Vychislenie kharakteristik mikrostrukturny grunta v opyte s kompressionnym szhatiem obraztsa // Politematicheskii setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta, 2009, № 45 (01). S. 66-82.

8. Lyashenko P.A., Denisenko V.V. Kontaktnoe vzaimodeystvie elementov mikrostrukturny glinistogo grunta // Politematicheskii setevoy elektronnyy nauchnyy

zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta, 2012, № 78 (04). S. 291-318.

9. Denisenko V.V., Lyashenko P.A. Obosnovanie kriteriya vybora skorosti nagruzheniya gruntov pri kompressionnykh ispytaniyakh postoyanno vozrastayushchey nagruzkoy // Nauchnye trudy Kubanskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. – Krasnodar: KubGTU, 2016, № 5. – S. 110-122.

10. Lyashenko P.A. Soprotivlenie i deformatsii glinistogo grunta. – Krasnodar: KubGAU, 2014. – 163 s.

11. Denisenko V.V., Lyashenko P.A. Metodika kompressionnykh ispytaniy gruntov postoyanno vozrastayushchey nagruzkoy // Nauchnye trudy Kubanskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. – Krasnodar: KubGTU, 2016, № 15. S. 16-27.

12. Denisenko V.V., Lyashenko P.A. Avtomaticheskiiy kompressionnyy pribor AKP-6N dlya ispytaniya gruntov postoyanno vozrastayushchey nagruzkoy // Nauchnye trudy Kubanskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. – Krasnodar: KubGTU, 2016, № 6. – S. 156-169.

13. Denisenko V.V., Litvinov Yu.A., Lyashenko P.A., Baykov O.N., Plakhteev G.V. Avtomaticheskiiy kompressionnyy pribor AKP-3S // Otchet o NIOKR po teme № 42/87 Gosstroya RSFSR. – Krasnodar: SevKavTISIZ, 1987. – 320 s.

14. Denisenko V.V., Lyashenko P.A. Ob eksperimentalnykh kompressionnykh priborakh dlya issledovaniya szhimaemosti gruntov postoyanno vozrastayushchey nagruzkoy / Nauchnye trudy Kubanskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta, 2015, № 9. S. 363-384.

15. Denisenko V.V., Lyashenko P.A. Eksperimentalnoe obosnovanie pravomernosti sravneniya kompressionnykh ispytaniy gruntov metodom postoyanno vozrastayushchey nagruзки i metodom stupenchato vozrastayushchey nagruзки // Nauchnye trudy Kubanskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta, 2015, № 11. S. 416-429.

*ACCELERATION OF COMPRESSION TESTING GROUND
BY CONSTANTLY INCREASING LOAD*

V.V. DENISENKO¹, P.A. LYASHENKO²

¹*Kuban State Technological University,
2, Moskovskaya str., Krasnodar, Russian Federation, 350002,
e-mail: denvivi@yandex.ru*

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

Compression tests of soil when determining their characteristics of compressibility are made mainly by method of in steps increasing loading now which is simple in realization, but demands big expenses of time and doesn't correspond to the modes of loading of soil at construction. From the known methods of compression tests of soil the greatest compliance to the modes of loading of soil of the bases at construction provides a method of constantly increasing loading which wasn't widely used so far by production of engineering-geological researches since it isn't rather studied and the equipment and a technique for his realization aren't developed. Authors have conducted researches of features of compressibility of soil at compression tests by the method of constantly increasing loading as a result of which are developed a technique of compression tests of soil by the method of constantly increasing loading and the automatic compression device with constantly increasing loading of AKP-6N and researches on assessment of acceleration of compression tests are conducted by the method of constantly increasing loading. It is established that in comparison with method of in steps increasing loading the method of constantly increasing loading accelerates compression tests of soil by 1,4-8,4 times.

Key words: constantly increasing load stepwise increasing load, the sample soil sample sediment, sludge stabilization.