

*ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СКОРОСТИ ПРИЛОЖЕНИЯ  
ПОСТОЯННО ВОЗРАСТАЮЩЕЙ НАГРУЗКИ НА ПОКАЗАТЕЛИ  
СЖИМАЕМОСТИ ГРУНТОВ*

**В.В. ДЕНИСЕНКО<sup>1</sup>, П.А. ЛЯШЕНКО<sup>2</sup>**

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

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

Применяемый в настоящее время при компрессионных испытаниях грунтов метод ступенчато возрастающей нагрузки не соответствует режимам нагружения грунтов оснований при строительстве. Из известных методов компрессионных испытаний грунтов наибольшее соответствие режимам нагружения грунтов оснований при строительстве обеспечивает метод постоянно возрастающей нагрузки (метод ПВН), который повышает достоверность и точность определения показателей сжимаемости грунтов и сокращает длительность их испытаний, но до настоящего времени не получил широкого практического, т.к. не достаточно изучен. Авторами проведены исследования влияния скорости приложения ПВН на показатели сжимаемости грунтов. Установлено, что показатели сжимаемости грунтов при испытании методом ПВН зависят от скорости приложения ПВН: чем больше скорость, тем меньше сжимаемость грунтов; для каждого грунта существует граничное значение скорости приложения ПВН, при котором грунт успевает полностью консолидироваться в процессе нагружения.

**Ключевые слова:** постоянно возрастающая нагрузка, образец грунта, сжимающая нагрузка, скорость приложения нагрузки, осадка образца, стабилизация осадки образца.

Определение показателей сжимаемости грунтов оснований зданий и сооружений является важнейшей частью инженерно-геологических изысканий. Значительная часть определений показателей сжимаемости грунтов производится путём лабораторных испытаний в компрессионных приборах. Применяемая при этом в настоящее время методика испытаний заключается в приложении нагрузки отдельными ступенями (ступенчато возрастающая нагрузка) с выдержкой каждой до стабилизации осадки грунта (метод СВН). Метод СВН прост в реализации, но требует больших затрат времени и не соответствует режимам нагружения грунтов оснований при строительстве, при котором нагрузка увеличивается во времени практически постоянно [1].

Из известных методов компрессионных испытаний наибольшее соответствие режимам нагружения грунтов оснований при строительстве

обеспечивает метод постоянно возрастающей нагрузки (метод ПВН), который повышает достоверность и точность определения показателей сжимаемости грунтов и сокращает длительность их испытаний [1]. Метод ПВН заключается в приложении постоянно возрастающей нагрузки со скоростью обеспечивающей консолидацию грунта в процессе его нагружения [2-4]. Однако до настоящего времени метод ПВН не получил широкого практического применения, т.к. не достаточно изучен, в частности, не изучено влияние скорости приложения ПВН на показатели сжимаемости грунтов.

Авторами проведены исследования влияния скорости приложения ПВН на показатели сжимаемости грунтов.

Исследования производились на образцах-близнецах глинистых грунтов природного сложения различной консистенции (таблица 1).

Таблица 1 – Физические свойства испытанных образцов-близнецов грунтов

Номер образцов-близнецов	Природная влажность, $W$ , %	Плотность, $\rho$ , т/м <sup>3</sup>	Плотность частиц, $\rho_s$ , т/м <sup>3</sup>	Коэффициент пористости, $e$	Коэффициент водонасыщения, $S_r$	Число пластичности, $I_p$ , %	Показатель текучести, $I_L$
81	20	2,01	2,70	0,753	0,72	12	<0
82	20	2,01	2,70	0,753	0,72	12	<0
83	20	2,01	2,70	0,753	0,72	12	<0
84	20	2,01	2,70	0,753	0,72	12	<0
85	29	2,02	2,72	0,738	1,0	21	<0
86	43	1,91	2,69	1,014	1,0	26	0,23
88	36	1,91	2,63	0,872	1,0	27	0,04
97	25	2,06	2,71	0,649	1,0	15	<0
98	25	2,06	2,71	0,649	1,0	15	<0
99	25	2,06	2,71	0,649	1,0	15	<0
101	25	2,02	2,70	0,667	1,0	16	<0
103	35	1,93	2,76	0,930	1,0	35	0,03
104	20	2,10	2,70	0,543	0,99	13	<0

Образцы-близнецы грунтов с одинаковыми значениями плотности и влажности отбирались одним и тем же работникам парами и группами из 3-5 штук, физические характеристики грунтов определялись по ГОСТ 5180 [5-7].

Монолиты грунтов для образцов-близнецов отбирались на объектах Краснодарского края из шурфов-дудок механическим боковым грунтоносом, который обеспечивает сохранность природного сложения грунтов в монолитах

при коэффициенте корреляции по плотности скелета просадочных грунтов 0,954 в сравнении с монолитами, отобранными вручную [8].

Пары образцов-близнецов грунтов испытывались до одинаковой конечной нагрузки от 300 до 750 кПа при полном водонасыщении.

Скорость приложения ПВН для образцов грунтов каждой пары близнецов задавалась произвольно и в различных опытах имела различную величину. Диапазон скоростей приложения ПВН при испытаниях пар образцов-близнецов грунтов составил от 7,8 до 250 кПа/ч (таблица 2).

Таблица 2 – Режимы испытаний групп образцов-близнецов

Номер образцов грунтов	Скорости приложения ПВН, $V$ , кПа/ч	Относительная дополнительная осадка, $Q$ , %	Относительная влажность образцов-грунтов, $W/W_1$	Величина конечной нагрузки, $P_k$ , кПа
82	20,0	4,0	0,78	480
81	40,0	7,9		
84	80,0	18,4		
83	160,0	29,4		
85д	12,5	11,8	0,57	300
85г	25,0	16,8		
85а	50,0	23,8		
85б	50,0	26,2		
85в	100,0	43,7		
86г	28,0	7,5	0,68	680
86в	57,0	12,2		
86б	113,0	21,7		
86а	227,0	41,2	0,58	680
88в	57,0	4,3		
88б	113,0	5,6		
88а	227,0	5,6	0,61	500
97	10,4	3,3		
98	10,4	3,8		
99	83,0	6,8	0,55	750
101а	31,2	7,3		
101в	62,5	8,0		
101г	62,5	8,0		
101б	250,0	10,9	0,50	750
103в	7,8	5,0		
103а	15,6	7,6		
103б	31,8	9,5		
103г	62,5	11,6	0,55	750
104в	15,6	6,6		
104б	31,2	8,0		
104а	62,5	10,6		

Испытания образцов-близнецов грунтов проводились на автоматическом компрессионном приборе АКП-4Н с постоянно возрастающим приложением нагрузки [9], разработанном на базе автоматического компрессионного прибора АКП-3С со ступенчато возрастающей нагрузкой [10-11].

В процессе испытаний каждого образца грунта производилась регистрация: осадки грунта за время приложения ПВН и стабилизированной осадки грунта при постоянной конечной нагрузке  $P_k = const$ . Регистрация осадки образцов грунтов производилась с точностью 0,005 мм.

По всем испытанным образцам грунтов определялись: относительная вертикальная деформация  $\varepsilon$ ; модуль компрессионной деформации  $E_k$ ; относительная дополнительная осадка  $Q$  при постоянной конечной нагрузке  $P_k$  и степень консолидации  $U$  при окончании приложения ПВН [12]. Расчет этих показателей производился через интервал нагрузки  $\Delta P = 10$  кПа, позволяющий получить высокую точность определений [13-15].

Испытание групп образцов-близнецов грунтов с различными скоростями приложения ПВН  $V$  до одинаковой конечной нагрузки  $P_k$  (таблица 2) показали, что величина сжатия одних и тех же грунтов зависит от скорости приложения ПВН.

Так, при испытании суглинков, например, суглинка твердого (таблица 2), группа образцов-близнецов №№ 81-84) при уменьшении скорости приложения ПВН в 4 раза с 160 кПа/ч до 40 кПа/ч относительная вертикальная деформация образцов грунтов  $\varepsilon$  увеличивается до 2 раз (рисунок 1а).

При этом разница значений относительной вертикальной деформации образцов грунтов  $\varepsilon$ , полученных при различной скорости приложения ПВН наиболее велика при малой нагрузке (до 3 раз при 50 кПа) и уменьшается с увеличением нагрузки (до 1,5 раз при 480 кПа). Одновременно с увеличением относительной вертикальной деформации образцов грунтов  $\varepsilon$  при уменьшении скорости приложения ПВН, соответственно, уменьшается модуль компрессионной деформации образцов грунтов  $E_k$  (рисунок 1б). Разница значений модуля компрессионной деформации образцов грунтов  $E_k$ , полученных

при различных скоростях приложения ПВН, наиболее велика при меньших значениях нагрузки (более 3 раз при 50 кПа) и мала при больших нагрузках (1,4 раза при 480 кПа).

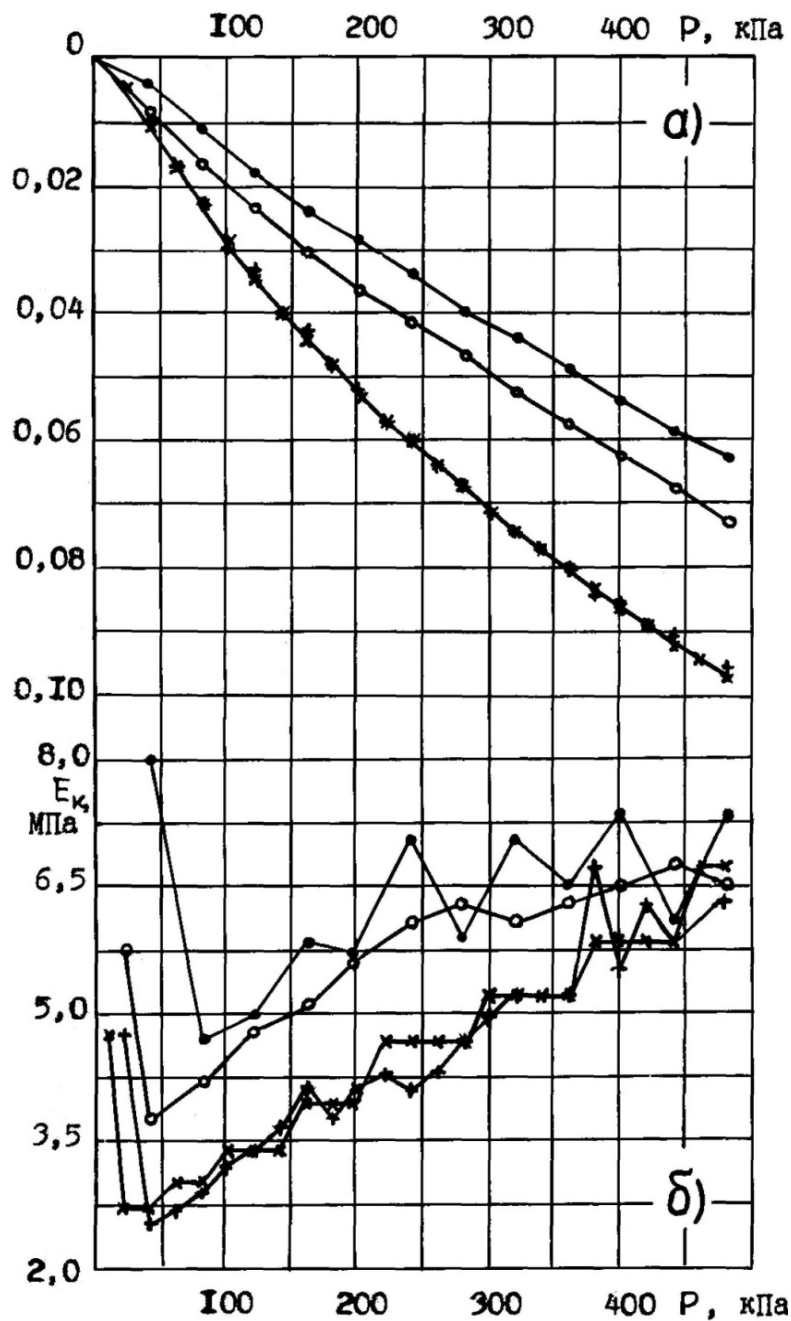


Рисунок 1 – График изменения относительной деформации  $\varepsilon$  и модуля компрессионной деформации  $E_k$  образцов-близнецов №№ 81-84 при различных скоростях приложения ПВН:

а) – график  $\varepsilon(P)$ ; б) – график  $E_k(P)$

● – 160 кПа/ч; ○ – 80 кПа/ч; + – 40 кПа/ч; × – 20 кПа/ч

При малых скоростях приложения ПВН (40 и 20 кПа/ч) разницы сжимаемости образцов-близнецов практически нет. Следовательно, можно выбрать такую скорость приложения ПВН, меньше которой любая другая не окажет влияния на деформационные характеристики испытываемых грунтов. В приведенном примере такая скорость равна 40 кПа/ч, так как при меньшей скорости приложения ПВН, равной 20 кПа/ч, имеют место те же параметры сжимаемости, что при скорости приложения ПВН равной 40 кПа/ч. Очевидно, что при малых скоростях приложения ПВН грунт успевает полностью консолидироваться в процесс приложения ПВН.

Такие же закономерности влияния скорости приложения ПВН на показатели сжимаемости грунтов получены и при испытании глин, например, глины полутвердой иловатой (таблица 2, группа образцов-близнецов №№ 86а-86г).

С увеличением скорости приложения ПВН при достижении одной и той же величины сжимающей нагрузки величина относительной вертикальной деформации образцов грунтов  $\varepsilon$  уменьшается (рисунок 2а), а модуль компрессионной деформации образцов грунтов  $E_k$  увеличивается (рисунок 2б).

В рассматриваемом примере разница в показателях сжимаемости образцов-близнецов грунтов наиболее заметна при скорости приложения ПВН равной 227 кПа/ч, а при 57 и 28 кПа/ч ее практически нет.

Таким образом, показатели сжимаемости грунтов при испытании методом ПВН зависят от скорости приложения ПВН: чем больше скорость, тем меньше сжимаемость грунтов [16]. Однако, для каждого грунта существует граничное значение скорости приложения ПВН, ниже которого скорость приложения ПВН не влияет на его сжимаемость. Это такое значение скорости приложения ПВН, при котором грунт успевает полностью консолидироваться в процессе нагружения. Наибольшая скорость приложения ПВН, которая позволяет грунту полностью консолидироваться за время нагружения, есть предельное для данного грунта значение скорости  $V_{\max}$ . При  $V \leq V_{\max}$  показатели сжимаемости грунтов не зависят от скорости приложения ПВН.

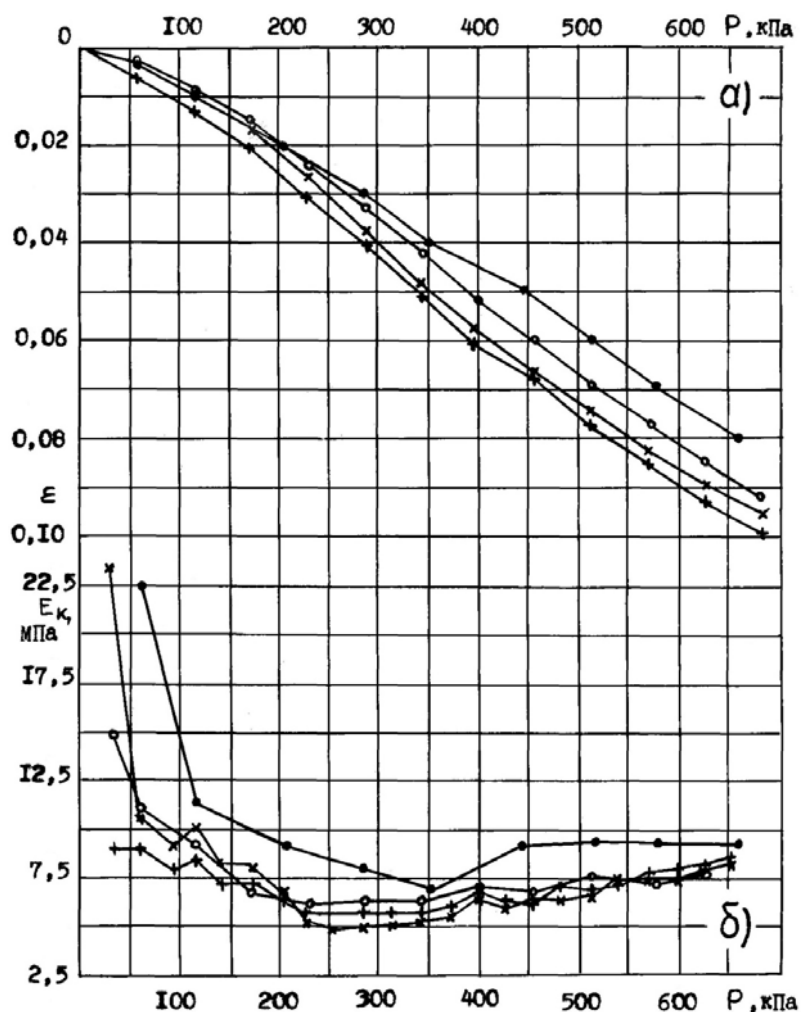


Рисунок 2 – График изменения относительной деформации  $\epsilon$  и модуля компрессионной деформации  $E_k$  образцов-близнецов №№ 86а-86г при различных скоростях приложения ПВН:

а) – график  $\epsilon(P)$ ; б) – график  $E_k(P)$

● – 227 кПа/ч; ○ – 113 кПа/ч; + – 57 кПа/ч; x – 28 кПа/ч

## ЛИТЕРАТУРА

1. Денисенко В.В., Ляшенко П.А. Анализ методов компрессионных испытаний грунтов // Научные труды Кубанского государственного технологического университета, 2015, № 2. – С. 104-125. – URL: <http://ntk.kubstu.ru/file/337>.
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. Шадунц К.Ш., Ляшенко П.А., Денисенко В.В. Лабораторное определение сжимаемости грунта и расчет просадки на его основе // Всероссийская научно-практическая конференция. Лессовые просадочные грунты как основания зданий и сооружений. Кн. 2. Теория и методы расчета оснований и фундаментов. Ч. 2. – Барнаул, 1990. – С. 188-189.

5. Авт. св. СССР № 1174817 G01N 1/20. Устройство для измельчения проб грунта / Денисенко В.В., Байков О.Н. // Открытия. Изобретения. – М., 1985, № 31.

6. Авт. св. СССР № 1200160 G01N3/00. Устройство для уплотнения проб грунтов / Денисенко В.В., Байков О.Н. // Открытия. Изобретения. – М., 1985, № 47.

7. Авт. св. СССР № 1546563 E02D 1/04, G01N 3/00. Устройство для уплотнения проб грунтов / Денисенко В.В. // Открытия. Изобретения. – М., 1990, № 8.

8. Авт. св. СССР № 1188240 E02D 1/00, E21B 49/06. Боковой грунтонос / Денисенко В.В., Байков О.Н. // Открытия. Изобретения. – М., 1985, № 40.

9. 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. – URL: <http://ntk.kubstu.ru/file/539>.

10. 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.

11. Денисенко В.В., Скрипаль С.М., Плахтеев Г.В., Байков О.Н., Горячев М.И., Дорошенко Г.И., Ляшенко П.А. Автоматизация срезного прибора ПСГ-3А // Отчет о НИОКР по теме № 76/86 Госстроя РСФСР. – Краснодар: СевКавТИСИЗ, 1986. – 432 с.

12. Денисенко В.В., Ляшенко П.А. Исследование влияния скорости приложения постоянно возрастающей нагрузки на дополнительную осадку грунтов после окончания приложения нагрузки // Научные труды Кубанского государственного технологического университета, 2016, № 12 – С. 53-64. – URL: <http://ntk.kubstu.ru/file/1218>.



13. Денисенко В.В., Ляшенко П.А. Повышение точности определения структурной прочности грунтов методом постоянно возрастающей нагрузки // Научные труды Кубанского государственного технологического университета, 2015, № 3. – С. 83-96. – URL: <http://ntk.kubstu.ru/file/361>.

14. 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. – <http://ej.kubagro.ru/2009/01/pdf/03.pdf>.

15. 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. – <http://ej.kubagro.ru/2012/04/pdf/25.pdf>.

16. 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.

#### REFERENCES

1. Denisenko V.V., Lyashenko P.A. Analiz metodov kompressionnykh ispytaniy gruntov // Nauchnye trudy Kubanskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta, 2015, № 2. – S. 104-125. – URL: <http://ntk.kubstu.ru/file/337>.

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. Shadunts K.Sh., Lyashenko P.A., Denisenko V.V. Laboratornoe opredelenie szhimaemosti grunta i raschet prosadki na ego osnove // Vserossiyskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya. Lessovye prosadochnye grunty kak osnovaniya zdaniy i sooruzheniy. Kn. 2. Teoriya i metody rascheta osnovaniy i fundamentov. Ch. 2. – Barnaul, 1990. – S. 188-189.

5. Avt. sv. SSSR № 1174817 G01N 1/20. Ustroystvo dlya izmelcheniya prob grunta / Denisenko V.V., Baykov O.N. // Otkrytiya. Izobreteniya. – M., 1985, № 31.

6. Avt. sv. SSSR № 1200160 G01N3/00. Ustroystvo dlya uplotneniya prob gruntov / Denisenko V.V., Baykov O.N. // Otkrytiya. Izobreteniya. – M., 1985, № 47.

7. Avt. sv. SSSR № 1546563 E02D 1/04, G01N 3/00. Ustroystvo dlya uplotneniya prob gruntov / Denisenko V.V. // Otkrytiya. Izobreteniya. – M., 1990, № 8.

8. Avt. sv. SSSR № 1188240 E02D 1/00, E21V 49/06. Bokovoy gruntonos / Denisenko V.V., Baykov O.N. // Otkrytiya. Izobreteniya. – M., 1985, № 40.

9. Denisenko V.V., Lyashenko P.A. Ob eksperimentalnykh kompressionnykh priborakh dlya issledovaniya szhimaemosti gruntov postoyanno vozrastayushchey nagruzkoj // Nauchnye trudy Kubanskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta, 2015, № 9 – S. 363-384. – URL: <http://ntk.kubstu.ru/file/539>.

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

11. Denisenko V.V., Skripal S.M., Plakhteev G.V., Baykov O.N., Goryachev M.I., Doroshenko G.I., Lyashenko P.A. Avtomatizatsiya sreznogo pribora PSG-3A // Otchet o NIOKR teme № 76/86 Gosstroya RSFSR. – Krasnodar: SevKavTISIZ, 1986. – 432 s.

12. Denisenko V.V., Lyashenko P.A. Issledovanie vliyaniya skorosti prilozheniya postoyanno vozrastayushchey nagruzki na dopolnitelnuyu osadku gruntov posle okonchaniya prilozheniya nagruzki // Nauchnye trudy Kubanskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta, 2016, № 12 – S. 53-64. – URL: <http://ntk.kubstu.ru/file/1218>.

13. Denisenko V.V., Lyashenko P.A. Povyshenie tochnosti opredeleniya strukturnoy prochnosti gruntov metodom postoyanno vozrastayushchey nagruzki // Nauchnye trudy Kubanskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta, 2015, № 3. – S. 83-96. – URL: <http://ntk.kubstu.ru/file/361>.

14. Lyashenko P.A., Denisenko V.V. Vychislenie kharakteristik mikrostruktury grunta v opyte s kompressionnym szhatiem obraztsa // Politematicheskij setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta, 2009, № 45 (01). – S. 66-82. – <http://ej.kubagro.ru/2009/01/pdf/03.pdf>.

15. Lyashenko P.A., Denisenko V.V. Kontaktnoe vzaimodeystvie elementov mikrostruktury glinistogo grunta // Politematicheskij setevoy elektronnyy nauchnyy

zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta, 2012, № 78 (04). – S. 291-318. – <http://ej.kubagro.ru/2012/04/pdf/25.pdf>.

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

*STUDY OF SPEED APPLICATIONS CONSTANTLY  
INCREASING LOAD INDICATORS COMPRESSIBILITY SOIL*

**V.V. DENISENKO<sup>1</sup>, P.A. LYASHENKO<sup>2</sup>**

*<sup>1</sup>Kuban State Technological University,  
2, Moskovskaya st., Krasnodar, Russian Federation, 350002,  
e-mail: denvivi@yandex.ru*

*<sup>2</sup>Kuban State Agrarian University,  
13, Kalinina st., Krasnodar, Russian Federation, 350044,  
e-mail: lyseich1@yandex.ru*

Apply now with compression test soil stepwise increasing load method does not correspond to load the bases with soil stroitelstve. Iz known methods of compression tests of soils most appropriate mode of loading the bases in the construction of soil provides a method of continuously increasing load (method PVN), which increases the reliability and accuracy determination of soil compressibility performance and shortens the duration of the test, but to date has not received wide practical because not enough izuchen. Avtorami studied PVN application rate effect on the compressibility of soil indicators. It is found that the compressibility of the soil under test method parameters are application PVN rate: the higher the speed, the less soil compressibility; for each soil there the boundary value of the PVN application rate at which the soil has time to fully consolidate the process of loading.

**Key words:** constantly increasing load, a sample of soil, compressive load, the speed of load application, sample sediment sample stabilization rainfall.