

*ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СКОРОСТИ ПРИЛОЖЕНИЯ
ПОСТОЯННО ВОЗРАСТАЮЩЕЙ НАГРУЗКИ НА ДОПОЛНИТЕЛЬНУЮ
ОСАДКУ ГРУНТОВ ПОСЛЕ ОКОНЧАНИЯ ПРИЛОЖЕНИЯ НАГРУЗКИ*

В.В. ДЕНИСЕНКО¹, П.А. ЛЯШЕНКО²

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

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

Отмечено, что 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. До настоящего времени метод ПВН не получил широкого применения при производстве инженерно-строительных изысканий, т.к. не разработаны оборудование и методика для его реализации. Для разработки методики и оборудования компрессионных испытаний грунтов методом ПВН нами проведены исследования влияния скорости приложения ПВН на дополнительную осадку грунтов после окончания приложения нагрузки. Установлено, что чем больше скорость ПВН, тем больше стабилизированная осадка грунта при постоянной конечной нагрузке и тем меньше грунт консолидируется к моменту окончания приложения ПВН. В такой же зависимости от скорости ПВН находится и относительная дополнительная осадка при постоянной конечной нагрузке. Выведена формула для определения скорости ПВН по заданному заранее значению относительной дополнительной осадке при постоянной конечной нагрузке, при котором грунт при окончании нагружения будет консолидирован до заданной степени.

Ключевые слова: постоянно возрастающая нагрузка, образец грунта, сжимающая нагрузка, скорость приложения нагрузки, деформация образца, стабилизация деформации.

Из известных методов компрессионных испытаний наибольшее соответствие режимам нагружения грунтов оснований при строительстве обеспечивает метод постоянно возроставшей нагрузки (метод ПВН). Он заключается в приложении постоянно возрастающей нагрузки со скоростью обеспечивающей консолидацию грунта в процессе его нагружения [1-4]. Метод ПВН повышает достоверность и точность определения показателей сжимаемости грунтов и сокращает длительность их испытаний [1]. Однако до настоящего времени метод ПВН не получил широкого применения при производстве инженерно-строительных изысканий, т.к. не разработаны оборудование и

методика его использования.

Для получения данных, необходимых для разработки методики компрессионных испытаний грунтов методом ПВН и формулирования технических требований к оборудованию для реализации метода ПВН нами проведены исследования влияния скорости приложения ПВН на дополнительную осадку грунтов после окончания приложения нагрузки.

Исследования влияния скорости приложения ПВН на дополнительную осадку грунтов после окончания приложения нагрузки 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, 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
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 ПВН для образцов грунтов каждой пары близнецов задавалась произвольно и в различных опытах имела различную величину. Диапазон скоростей 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
81	40,0	7,9	0,78	480
82	20,0	4,0		
83	160,0	29,4		
84	80,0	18,4		
85а	50,0	23,8	0,57	300
85б	50,0	26,2		
85в	100,0	43,7		
85г	25,0	16,8		
85д	12,5	11,8		
86а	227,0	41,2	0,68	680
86б	113,0	21,7		
86в	57,0	12,2		
86г	28,0	7,5		
88а	227,0	5,6	0,58	680
88б	113,0	5,6		
88в	57,0	4,3		
97	10,4	3,3	0,61	500

Окончание таблицы 1

98	10,4	3,8		
99	83,0	6,8		
101а	31,2	7,3	0,55	750
101б	250,0	10,9		
101в	62,5	8,0		
101г	62,5	8,0		
103а	15,6	7,6	0,50	750
103б	31,8	9,5		
103в	7,8	5,0		
103г	62,5	11,6		
104а	62,5	10,6	0,55	750
104б	31,2	8,0		
104в	15,6	6,6		

Испытания образцов-близнецов грунтов проводились на автоматическом компрессионном приборе АКП-4Н с постоянно возрастающим приложением нагрузки [9], разработанном на базе стандартного компрессионного прибора КПр-1 и автоматического компрессионного прибора приборе АКП-3С со ступенчатым приложением нагрузки [10-11].

Измерение осадки образцов-близнецов грунтов на приборе АКП-4Н осуществлялось с точностью 0,005 мм.

По всем испытанным образцам-близнецам грунтов методом ПВН определялись при i -ой величине нагрузки:

- относительная вертикальная деформация ε по формуле

$$\varepsilon_i = \frac{\Delta h_i}{h}, \quad (1)$$

где Δh_i – величина абсолютной вертикальной деформации образца грунта при i -ой нагрузке, мм;

h – начальная высота образца грунта, мм;

- модуль компрессионной деформации E_k по формуле

$$E_{ki} = \frac{\Delta P_i}{\Delta \varepsilon_i} \beta, \quad (2)$$

где ΔP_i – величина i -го приращения давления, кПа;

$\Delta \varepsilon_i$ – величина приращения относительной вертикальной деформации образца грунта;

β – коэффициент, учитывающий отсутствие поперечной деформации образца грунта при компрессионном сжатии;

- относительная дополнительная осадка Q при постоянной конечной нагрузке $P_k = const$ по формуле

$$Q = \frac{S_c}{S_k} 100, \quad (3)$$

где S_k – осадка грунта за время приложения ПВН, мм;

S_c – стабилизированная осадка грунта при постоянной конечной нагрузке $P_k = const$, мм;

- степень консолидации U при окончании нагружения по формуле

$$U = \frac{S_k}{S_k + S_c} = \frac{1}{1 + \frac{S_c}{S_k}}. \quad (4)$$

Расчет значений ε производился через интервал $\Delta P = 10$ кПа, позволяющий получить высокую точность определений [12-15].

Испытание групп образцов-близнецов грунтов с различными скоростями ПВН V до одинаковой конечной нагрузки P_k (таблица 2) показали, что после окончания приложения ПВН при постоянной конечной нагрузке P_k имеет место дополнительная осадка грунтов S_c , которая постепенно затухает (стабилизируется). Наличие S_c после окончания приложения ПВН свидетельствует о том, что за время приложения ПВН грунт консолидируется не полностью.

Наблюдения за величиной S_c при испытании групп образцов-близнецов различных грунтов с различными скоростями приложения ПВН V до одинаковой конечной нагрузки P_k показали, что величина S_c в большей степени зависит от

скорости приложения ПВН V . Так, при испытании глины полутвердой иловатой (группа образцов-близнецов №№ 86а-86г (таблицы 1, 2) наибольшая величина S_c имеет место при наибольшей скорости ПВН равной 227 кПа/ч (рисунок 1).

С уменьшением скорости приложения ПВН V в 2,4 и 8 раз величина S_c уменьшается соответственно в 1,8; 3,1 и 4,6 раза. Следует отметить, что при рассмотрении графиков $\varepsilon(P)$ и $E_k(P)$ для данной группы образцов-близнецов разница в показателях сжимаемости при скоростях V 57 и 28 кПа/ч практически отсутствует (рисунок 2) и скорость 57 кПа/ч могла быть принята за предельную.

Аналогичное влияние скорости приложения ПВН было выявлено и при испытании образцов-близнецов других групп грунтов.

Таким образом, экспериментами установлено, что чем больше скорость приложения ПВН V , тем больше S_c и тем меньше грунт консолидируется к моменту окончания приложения ПВН.

В такой же зависимости от скорости приложения ПВН V находится и относительная дополнительная осадка Q (таблица 2), вычисленная по формуле (3).

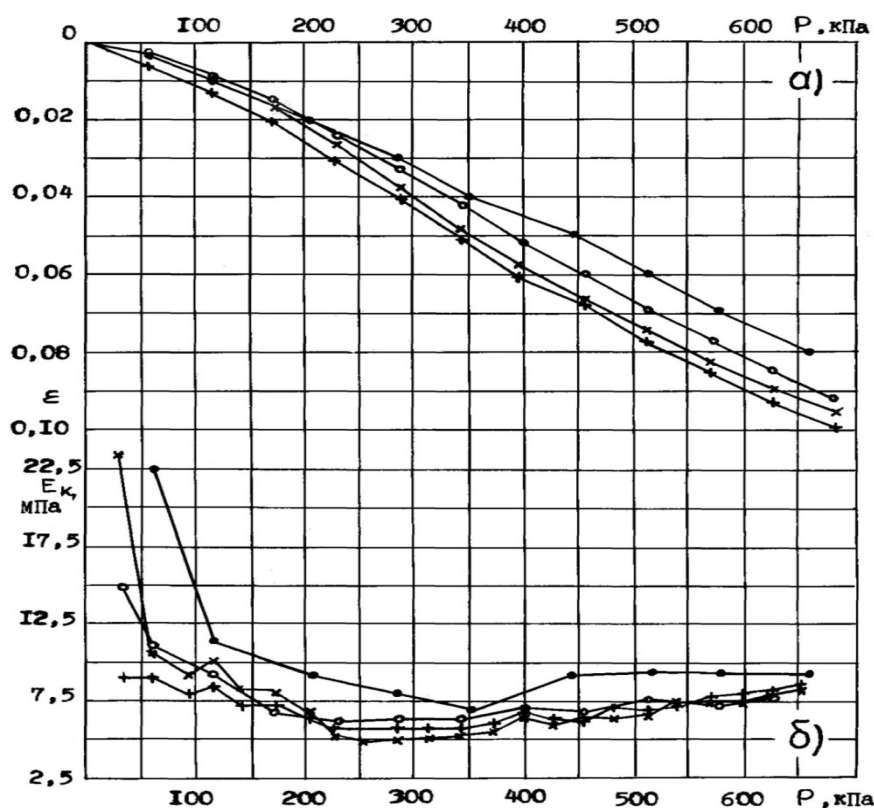


Рисунок 2 – График изменения ε и E_k образцов-близнецов №№ 86а-86г при различных скоростях приложения ПВН V : а) – график $\varepsilon(P)$; б) – график $E_k(P)$ ● – 227 кПа/ч; ○ – 113 кПа/ч; + – 57 кПа/ч; х – 28 кПа/ч

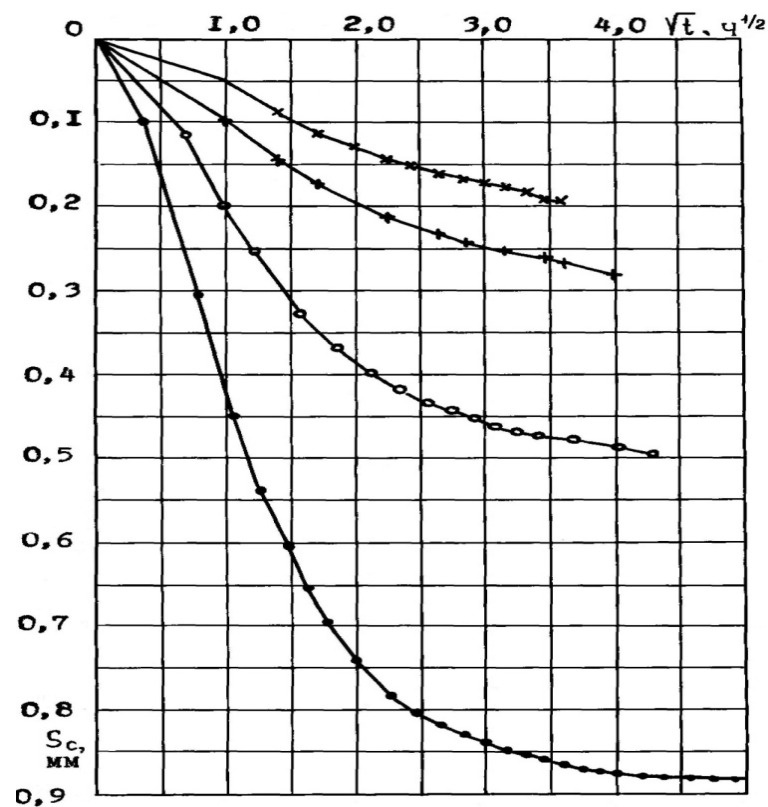


Рисунок 1 – Дополнительная осадка образцов-близнецов №№ 86а-86г при различных скоростях приложения ПВН V : ● – 227 кПа/ч; ○ – 113 кПа/ч; + – 57 кПа/ч; х – 28 кПа/ч

Зависимость относительной дополнительной осадки Q от скорости приложения ПВН V имеет вполне определенный характер и выражается линейным графиком в логарифмических координатах (рисунок 3).

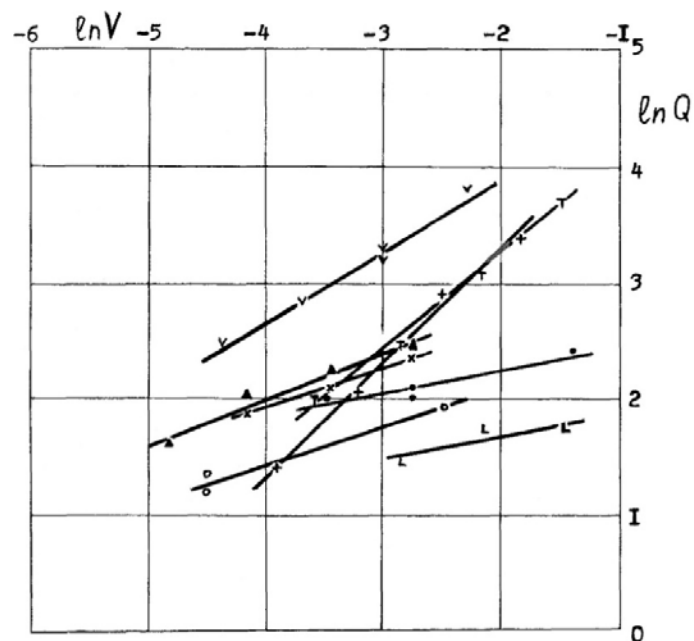


Рисунок 3 – Зависимость относительной дополнительной осадки Q от скорости приложения ПВН V для групп образцов-близнецов:
 +- №№ 81-84; v – № 85; T – № 86; L – № 88;
 o – №№ 97-99; ● – № 101; ▲ – № 103; х – № 104

Уравнение этой зависимости имеет вид

$$\ln Q = B_1 \cdot \ln V + B_0, \quad (5)$$

где B_1 и B_0 – постоянные коэффициенты для конкретного грунта, определяемые методом наименьших квадратов. Для рассматриваемых групп образцов-близнецов грунтов B_1 и B_0 приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Коэффициенты B_1 и B_0 уравнения зависимости относительной дополнительной осадки Q от скорости приложения ПВН V для различных групп образцов-близнецов

Номера групп образцов-близнецов	Коэффициенты уравнения зависимости $\ln V$ от $\ln Q$		Коэффициенты корреляции $\ln V$ и $\ln Q$
	B_1	B_0	
81-84	0,981	5,25	0,998
85а-85д	0,617	5,12	0,997
86а-86г	0,821	4,90	1,000
88а-88в	0,187	2,04	0,753
97-99	0,319	2,71	0,991
101а-101г	0,199	2,65	0,998
103а-103г	0,395	3,59	0,947
104а-104в	0,338	3,28	1,000

При установлении корреляционной связи между $\ln V$ и $\ln Q$ получены высокие значения коэффициентов корреляции для всех испытанных групп образцов-близнецов (таблица 3), свидетельствующие о том, что уравнение (5) устанавливает функциональную зависимость между скоростью приложения ПВН V и относительной дополнительной осадкой Q .

Преобразуя уравнение (5) получаем формулу для определения скорости ПВН V по заданному заранее значению относительной дополнительной осадки Q , при котором грунт при окончании приложения ПВН будет консолидирован до заданной степени:

$$V = \exp\{1/B_1 \cdot (\ln Q - B_0)\}. \quad (6)$$

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. Денисенко В.В., Байков О.Н., Михайлов Ю.К. Боковой грунтонос для отбора монолитов грунтов // Проектирование и инженерные изыскания. – 1984, № 2. – С. 32-34.
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 теме № 76/86 Госстроя РСФСР. – Краснодар: СевКавТИСИЗ, 1986. – 432 с.

12. Ляшенко П.А., Денисенко В.В. Совершенствование компрессионных испытаний грунтов на основе цикличности сжимаемости // Библиографический указатель депонированных рукописей. – М.: ВНИИТПИ, 1993, вып. 1, № 11335. – 17 с.

13. 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>.

14. 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>.

15. 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. – М., 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. Denisenko V.V., Baykov O.N., Mikhaylov Yu.K. Bokovoy gruntonos dlya otbora monolitov gruntov // Proektirovanie i inzhenernye izyskaniya. – 1984, № 2. – S. 32-34.

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. Avtomaticheskii 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. Lyashenko P.A., Denisenko V.V. Sovershenstvovanie kompressionnykh ispytaniy gruntov na osnove tsiklichnosti szhimaemosti // Bibliograficheskiy ukazatel deponirovannykh rukopisey. – M.: VNIINTPI, 1993, vyp. 1, № 11335. – 17 s.

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

14. Lyashenko P.A., Denisenko V.V. Kontaktnoe vzaimodeystvie elementov mikrostruktury glinistogo grunta // Politematicheskii setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta, 2012, № 78 (04). – S. 291-318. – <http://ej.kubagro.ru/2012/04/pdf/25.pdf>.

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

*STUDY OF SPEED APPLICATIONS ALWAYS INCREASES
THE LOAD ON EXTRA RAINFALL SOIL AFTER APPLIED LOAD*

V.V. DENISENKO¹, P.A. LYASHENKO²

¹*Kuban State Technological University,
2, Moskovskaya st., Krasnodar, Russian Federation, 350072,
e-mail: denvivi@yandex.ru*

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

It is noted that of the 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 (MPP method), which increases the reliability and accuracy of the compressibility of the soil parameters and reduces the duration of the test. So far, the DID method is not widely used in the production of construction and engineering research, because not developed equipment and methods of its implementation. To develop techniques and equipment compression tests of soils by DID we studied the effect of the speed of applications for an additional DID sediment soil after application of the load. It is found that the greater the speed of the DID, the more stable soil settlement at a constant finite load, and the less the ground is consolidated by the end of HRP application. At the same depending on the DID speed is relative and additional sediment at constant ultimate load. The formula for determining the rate of DID on the set value in advance for additional sediment at constant ultimate load at which the ground at the end of the load will be consolidated to the desired degree.

Key words: constantly increasing load of soil sample, compressive load, the rate of application of the load, the specimen deformation, deformation stabilization.