

МЕТОДИКА КОМПРЕССИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ ГРУНТОВ ПОСТОЯННО ВОЗРАСТАЮЩЕЙ НАГРУЗКОЙ

В.В. ДЕНИСЕНКО¹, П.А. ЛЯШЕНКО²

¹*Кубанский государственный технологический университет,
350002, 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*

Одним из трудоемких процессов при производстве инженерно-геологических изысканий в настоящее время являются компрессионные испытания грунтов, т.к. производятся методом ступенчато возрастающей нагрузки (методом СВН), который прост в реализации, но требует больших затрат времени и не соответствует режиму нагружения грунтов оснований при строительстве. Наибольшее соответствие режимам нагружения грунтов оснований при строительстве обеспечивает метод постоянно возрастающей нагрузки (метод ПВН), не получивший практического применения из-за отсутствия оборудования и методики для его осуществления. Авторами проведены исследования особенностей сжимаемости грунтов при компрессионных испытаниях методом ПВН, в результате которых: обоснована достоверность результатов испытаний грунтов методом ПВН; установлена аналитическая связь предельной скорости приложения ПВН с физическими свойствами грунтов; сформулирован физически обоснованный критерий выбора скорости нагружения грунтов методом ПВН; сформулированы технические требования к компрессионному прибору с постоянно возрастающей нагрузкой; разработана методика компрессионных испытаний грунтов методом ПВН, обеспечивающая консолидацию грунтов в процессе приложения ПВН. Приведено описание методики компрессионных испытаний грунтов методом ПВН.

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

Одним из трудоемких процессов при производстве инженерно-геологических изысканий в настоящее время являются компрессионные испытания грунтов, т.к. производятся методом ступенчато возрастающей нагрузки (методом СВН), который прост в реализации, но требует больших затрат времени и не соответствует режиму нагружения грунтов оснований при строительстве, т.к. нагрузка на испытываемый грунт прикладывается отдельными ступенями с выдержкой каждой до стабилизации его осадки [1].

Из известных методов компрессионных испытаний грунтов наибольшее соответствие режимам нагружения грунтовых оснований при строительстве обеспечивает метод постоянно возрастающей нагрузки (метод ПВН) [1]. Он

заключается в приложении постоянно возрастающей нагрузки со скоростью обеспечивающей консолидацию грунта в процессе его нагружения. Кроме того метод ПВН 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 разработаны методика и оборудование для его практического применения.

Нами проведены исследования особенностей сжимаемости грунтов при компрессионных испытаниях постоянно возрастающей нагрузкой, в результате которых: обоснована достоверность результатов испытаний грунтов методом ПВН [4, 5]; изучены особенности сжимаемости грунтов при нагружении и после его окончания в зависимости от скорости приложения ПВН [6-8]; изучено влияние физических свойств грунтов на скорость приложения ПВН [8-10]; исследовано влияние скорости приложения ПВН на степень консолидации грунтов при нагружении и после его окончания [11-12]; установлены закономерности деформирования грунтов в процессе нагружения и после его окончания при постоянной конечной нагрузке в зависимости от скорости приложения ПВН [8-10]; установлена аналитическая связь предельной скорости приложения ПВН полностью водонасыщенных грунтов с их физическими свойствами [12]; сформулирован физически обоснованный критерий выбора скорости нагружения грунтов методом ПВН [12-13]; оценены случайная и общая погрешности определения показателей сжимаемости грунтов методом ПВН [14]; сформулированы технические требования к компрессионному прибору с постоянно возрастающей нагрузкой [15-16].

По результатам проведенных исследований [4-14] разработана методика компрессионных испытаний грунтов методом ПВН, основные положения которой заключаются в следующем.

Подготовка и загрузка образцов грунтов в одометр компрессионного прибора производится аналогично методу ступенчато возрастающей нагрузки (метод СВН) по ГОСТ 12248.

Испытания образцов грунтов производятся в условиях постоянного увеличения нагрузки от нуля до конечного значения с заданной скоростью.

Скорость приложения ПВН задается в зависимости от физических свойств испытываемых грунтов:

1) для грунтов с коэффициентом водонасыщения $S_r = 0,9-1,0$; коэффициентом пористости $0,7 \leq e \leq 1,0$ и отношением природной влажности к влажности на границе текучести $0,4 \leq W/W_L \leq 1,0$ – по графикам зависимости скорости приложения ПВН от числа пластичности $V(I_p)$ (рисунки 1-4) или по формуле (1), а для грунтов с $S_r = 0,9-1,0$; $0,7 > e > 1,0$ и $0,4 > W/W_L > 1,0$ – по формуле (1)

$$V_{\max} = 3,672 \left(\frac{100}{U} - 100 \right)^{0,1516 + 12,35/I_p - 1,652 \cdot WW_L + 1,453 \cdot e}, \quad (1)$$

где U – степени консолидации грунта при окончании приложения ПВН.

Степень консолидации грунта при окончании приложения ПВН определяется по формуле

$$U = \frac{S_k}{S_k + S_c} = \frac{I}{1 + \frac{S_c}{S_k}}, \quad (2)$$

где S_k – осадка грунта за время приложения ПВН;

S_c – стабилизированная осадка грунта при постоянной конечной нагрузке $P_k = const$ после приложения ПВН.

При этом:

- если число пластичности грунтов $I_p < 5$ %, то скорость приложения ПВН V принимается при $I_p = 5$ %, если $I_p > 25$ % – при $I_p = 25$ % с определением степени консолидации U грунта при окончании нагружения по формуле (2);

- если степень консолидации будет $U < 0,952$, то скорость приложения ПВН следует уменьшить до получения степени консолидации $U = 0,952-0,989$;

2) для грунтов с коэффициентом водонасыщения $S_r < 0,9$ скорость приложения ПВН определяется аналогично пункту 1) при полном водонасыщении;

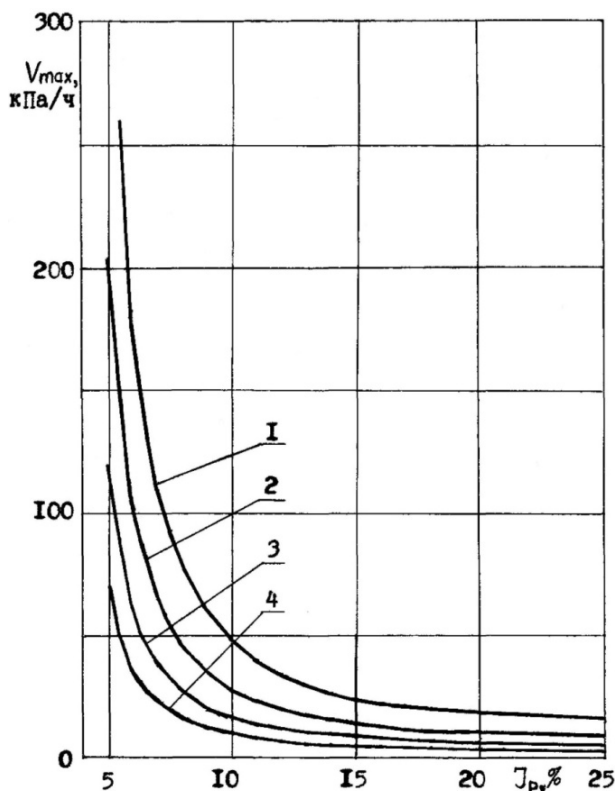


Рисунок 1 – Зависимость максимально допускаемой скорости приложения ПВН от числа пластичности $V(I_p)$ при коэффициенте пористости $e = 0,700$ ($S_r = 0,9-1,0$; $Q = 5\%$; $U = 0,952$):
 1 – $W/W_L = 0,4$; 2 – $W/W_L = 0,6$; 3 – $W/W_L = 0,8$; 4 – $W/W_L = 1,0$

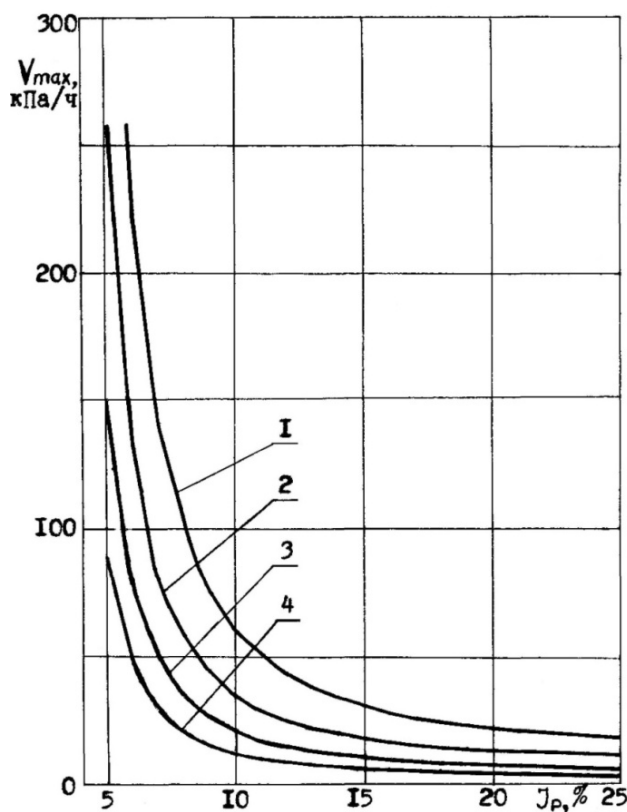


Рисунок 2 – Зависимость максимально допускаемой скорости приложения ПВН от числа пластичности $V(I_p)$ при коэффициенте пористости $e = 0,800$ ($S_r = 0,9-1,0$; $Q = 5\%$; $U = 0,952$):
 1 – $W/W_L = 0,4$; 2 – $W/W_L = 0,6$; 3 – $W/W_L = 0,8$; 4 – $W/W_L = 1,0$

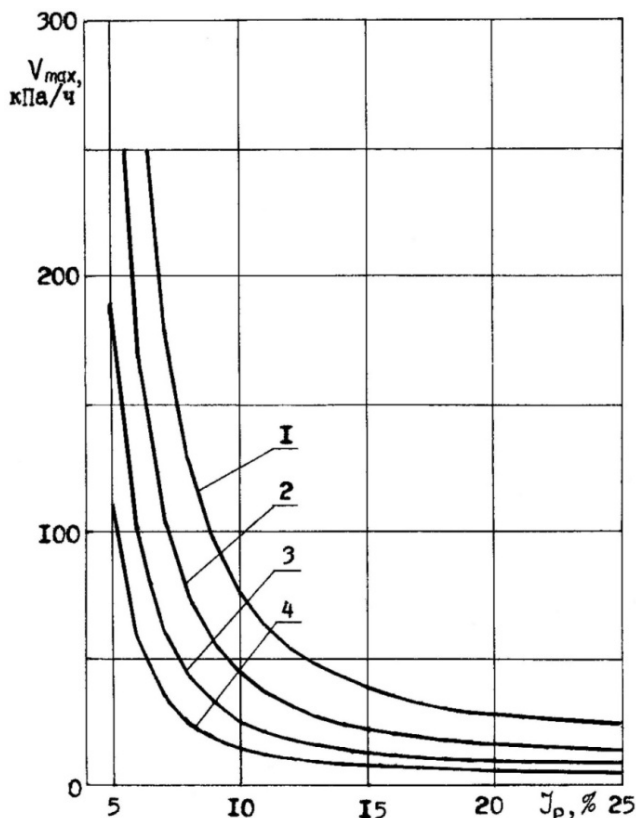


Рисунок 3 – Зависимость максимально допускаемой скорости приложения ПВД от числа пластичности $V(I_p)$ при коэффициенте пористости $e = 0,900$ ($S_r = 0,9-1,0$; $Q = 5\%$; $U = 0,952$):
 1 – $W/W_L = 0,4$; 2 – $W/W_L = 0,6$; 3 – $W/W_L = 0,8$; 4 – $W/W_L = 1,0$

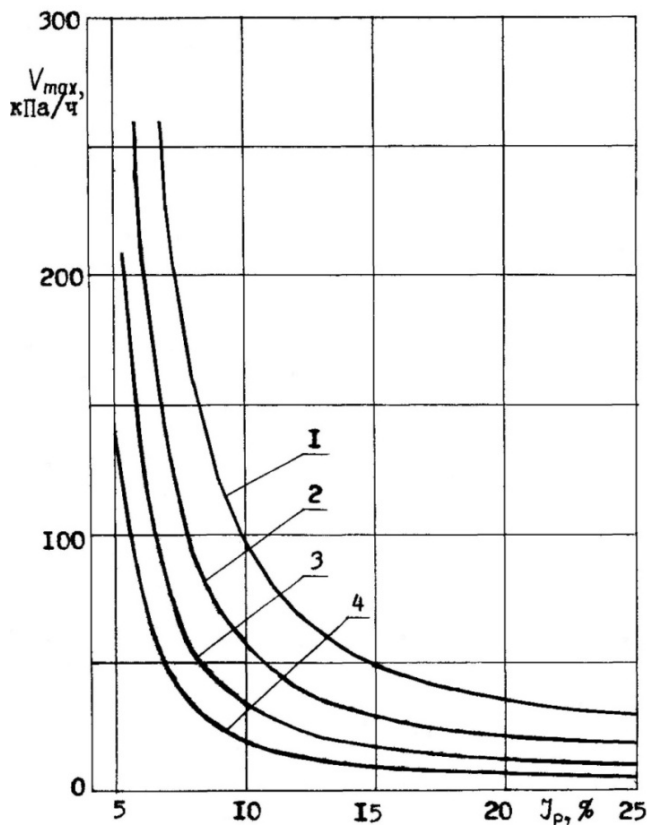


Рисунок 4 – Зависимость максимально допускаемой скорости приложения ПВД от числа пластичности $V(I_p)$ при коэффициенте пористости $e = 1,000$ ($S_r = 0,9-1,0$; $Q = 5\%$; $U = 0,952$):
 1 – $W/W_L = 0,4$; 2 – $W/W_L = 0,6$; 3 – $W/W_L = 0,8$; 4 – $W/W_L = 1,0$

3) для грунтов, которые по программе испытаний должны иметь природную влажность, скорость приложения ПВН принимается $V = 10$ кПа/ч с определением степени консолидации грунта при окончании нагружения по формуле (2). Если степень консолидации будет $U < 0,952$, то скорость приложения ПВН V следует уменьшить до получения степени консолидации $U = 0,952-0,989$;

4) для водонасыщенных грунтов с коэффициентом водонасыщения $S_r < 1,0$ и числом пластичности $I_p > 0,5$ предельную скорость приложения ПВН V можно задавать из условия подобия скорости нагружения основания сооружения [Авт. св. № 1506022 СССР / Ляшенко П.А., Горячев М.И., Денисенко В.В.] по формуле (8).

Так, из уравнения фильтрационной консолидации [Вялов С.С. Реологические основы механики грунтов. – М.: Высшая школа, 1978] следует, что отношение длительности фильтрации воды под нагрузкой P к квадрату мощности фильтрационного слоя H есть величина постоянная для данного грунта, т.е.

$$\frac{T}{H^2} = const. \quad (3)$$

Поэтому при компрессионном сжатии грунта в основании сооружения и в компрессионном приборе длительности фильтрации находятся в следующем соотношении

$$\frac{T_1}{H_0^2} = \frac{T^2}{h^2} \text{ или } \frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{H_0}{h} \right)^2, \quad (4)$$

где T_1 и T_2 – длительность фильтрации воды при сжатии грунта соответственно в основании и компрессионном приборе, ч;

H_0 и h – соответственно высота фильтрующего слоя грунта в основании и компрессионном приборе, м.

Из отношения (4) следует, что при уменьшении мощности сжимаемого слоя грунта в q раз, время отжатия воды из него при соответствующей сжимающей нагрузке уменьшается в q^2 раз. Таким образом, отношение (4) определяет длительность испытания грунта в компрессионном приборе, если

известна мощность слоя грунта в основании сооружения и длительность его возведения.

При компрессионных испытаниях методом ПВН нагрузка на испытываемый образец грунта постоянно возрастает от нуля до конечной величины с заданной скоростью и описывается формулой

$$P = V \cdot t, \quad 0 \leq t \leq t_k, \quad (5)$$

где V – скорость приложения ПВН, кПа/ч;

t – текущее время приложения ПВН, ч;

t_k – время приложения ПВН до конечного значения P_k , ч.

Конечное значение нагрузки выражается формулой

$$P_k = V \cdot t_k. \quad (6)$$

Подставляя выражение для t из (6) в (4), получаем условие подобия скоростей нагружения основания сооружения и образца грунта

$$\frac{P/V_0}{P/V} = \left(\frac{H_0}{h}\right)^2 \text{ или } \frac{V}{V_0} = \left(\frac{H_0}{h}\right)^2 \text{ откуда } V = V_0 \left(\frac{H_0}{h}\right)^2, \quad (7)$$

где V_0 – скорость нагружения основания, кПа/ч.

При односторонней фильтрации (вверх) грунта в основании мощность эквивалентного слоя [Цытович Н.А. Механика грунтов. – М., Высшая школа, 1983] $H_{0э} = H_0/2$, а условие (7) имеет вид

$$V = V_0 \left(\frac{H_0/2}{h}\right)^2. \quad (8)$$

Рассмотрим пример задания скорости приложения ПВН по условию подобия скорости нагружения основания сооружения. Пусть средняя величина нагрузки в сжимаемом слое грунта мощностью 7,5 м под фундаментом составляет 100 кПа за 1 год, т.е. скорость нагружения составит:

$$V_0 = \frac{100}{365 \cdot 24} = 1,1 \cdot 10^{-2} \text{ (кПа/ч)}.$$

При толщине образца грунта $h = 0,025$ м скорость нагружения образца по формуле (8) составит $V = 1,1 \cdot 10^{-2} \cdot \left(\frac{3,75}{0,025}\right)^2 = 247,5$ (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.
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. Повышение точности определения структурной прочности грунтов методом постоянно возрастающей нагрузки // Научные труды Кубанского государственного технологического университета, 2015, № 3. – С. 83-96.
6. Ляшенко П.А. Микроструктурная деформируемость глинистых грунтов. – Краснодар: КубГТУ, 2001. – 123 с.
7. Ляшенко П.А. Сопротивление и деформации глинистого грунта. – Краснодар: КубГАУ, 2014. – 163 с.
8. Денисенко В.В., Ляшенко П.А. О сжимаемости грунтов при компрессионных испытаниях методом постоянно возрастающей нагрузки // Научные труды Кубанского государственного технологического университета. – Краснодар: КубГТУ, 2015, № 12. – С. 108-120.
9. 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.
10. 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.

11. 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.

12. 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.

13. 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.

14. Денисенко В.В., Ляшенко П.А. Об оценке случайной погрешности определения показателей сжимаемости грунтов // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). 2014, № 4.– С. 52-59.

15. 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.

16. Денисенко В.В., Ляшенко П.А. Технические требования к компрессионному прибору для испытаний грунтов постоянно возрастающей нагрузкой // Научные труды Кубанского государственного технологического университета. – Краснодар: КубГТУ, 2016, № 6. – С. 11-28.

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. Povysenie tochnosti opredeleniya strukturnoy prochnosti gruntov metodom postoyanno vozrastayushchey nagruzki // Nauchnye trudy Kubanskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta, 2015, № 3. – S. 83-96.
6. Lyashenko P.A. Mikrostrukturnaya deformiruemost glinistykh gruntov. – Krasnodar: KubGTU, 2001. – 123 s.
7. Lyashenko P.A. Soprotivlenie i deformatsii glinistogo grunta. – Krasnodar: KubGAU, 2014. – 163 s.
8. Denisenko V.V., Lyashenko P.A. O szhimaemosti gruntov pri kompressionnykh ispytaniyakh metodom postoyanno vozrastayushchey nagruzki // Nauchnye trudy Kubanskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. – Krasnodar: KubGTU, 2015, № 12. – S. 108-120.
9. Lyashenko P.A., Denisenko V.V. Vychislenie kharakteristik mikrostrukтуры grunta v opyte s kompressionnym szhatiem obraztsa // Politematicheskiiy setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta, 2009, № 45 (01). – S. 66-82.
10. Lyashenko P.A., Denisenko V.V. Kontaktnoe vzaimodeystvie elementov mikrostrukтуры glinistogo grunta // Politematicheskiiy setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta, 2012, № 78 (04). – S. 291-318.
11. 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.

12. 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.

13. 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.

14. Denisenko V.V., Lyashenko P.A. Ob otsenke sluchaynoy pogreshnosti opredeleniya pokazateley szhimaemosti gruntov // Nauka. Tekhnika. Tekhnologii (politekhnicheskiy vestnik). 2014, № 4.– S. 52-59.

15. 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.

16. Denisenko V.V., Lyashenko P.A. Tekhnicheskie trebovaniya k kompressionnomu priboru dlya ispytaniy gruntov postoyanno vozrastayushchey nagruzkoy // Nauchnye trudy Kubanskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. – Krasnodar: KubGTU, 2016, № 6. – S. 11-28.

*METHOD OF COMPRESSION TESTING GROUND
CONSTANT LOAD AN INCREASINGLY*

V.V. DENISENKO¹, P.A. LYASHENKO²

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

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

One of the time-consuming processes in the production of engineering and geological surveys are currently the compression testing of soils, since produced by stepwise increasing load (method SVN), which is simple to implement, but it is time consuming and does not correspond to the load during the construction of foundation soils. The most appropriate mode of loading the bases in the construction of soil provides a method of continuously increasing load (method PVN), not poluchivshiy prakticheskogo application due to lack of equipment

and methodology for its implementation. The authors studied the characteristics of the compressibility of the soil with the compression test method MPP, resulting in: proved the accuracy of the results of soil tests by PVN; established analytical connection limit PVN application rate with the physical properties of soil; formulated physically reasonable criterion for selecting the speed of loading of soil by PVN; formulate technical requirements to a compression device with an ever increasing workload; the technique of compression tests of soils by PVN, providing consolidation of the soil in the process of PVN application. The description of methods of compression tests of soils by PVN.

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