

*ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРАВОМЕРНОСТИ СРАВНЕНИЯ
КОМПРЕССИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ ГРУНТОВ МЕТОДОМ ПОСТОЯННО
ВОЗРАСТАЮЩЕЙ НАГРУЗКИ И МЕТОДОМ СТУПЕНЧАТО
ВОЗРАСТАЮЩЕЙ НАГРУЗКИ*

В.В. ДЕНИСЕНКО¹, П.А. ЛЯШЕНКО²

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

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

Приведены методика проведения компрессионных испытаний грунтов методом ПВН в сравнении с методом СВН, который строго определен по граничным условиям оценки сжимаемости испытываемых грунтов, стандартизирован и наиболее распространен на практике. Было испытано 88 пар образцов-близнецов различных грунтов. Испытания образцов-близнецов грунтов проводились на автоматических компрессионных приборах, разработанных на базе стандартного компрессионного прибора КПр-1: методом ПВН – на приборе АКП-4Н с постоянно возрастающим приложением нагрузки, а методом СВН – на приборе АКП-3С со ступенчатым приложением нагрузки. Анализом результатов сравнительных испытаний установлена их представительность и правомерность сравнения компрессионных испытаний грунтов методом ПВН с методом СВН.

Ключевые слова: постоянно возрастающая нагрузка, ступенчато возрастающая нагрузка, образец грунта, сжимающая нагрузка.

Из известных методов компрессионных испытаний грунтов наибольшее соответствие режимам нагружения грунтовых 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].

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 технологических факторов и конструктивных параметров на сжимаемость грунтов методом ПВН. В качестве сравнения был принят метод ступенчато возрастающей нагрузки (метод СВН), который строго определен по граничным условиям оценки сжимаемости испытываемых грунтов, стандартизирован [3] и наиболее распространен на практике.

Сравнительные компрессионные испытания грунтов методами ПВН и СВН производились на образцах-близнецах глинистых грунтов природного сложения различной консистенции: глинах твердых и полутвердых (с коэффициентом пористости $e = 0,578-1,014$ и природной влажностью $W = 8-43$ %); суглинках твердых, полутвердых, туго- и мягкопластичных ($e = 0,494-1,279$ и $W = 11-35$ %); супесях твердых и пластичных ($e = 0,658-0,921$ и $W = 6-27$ %).

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 [4].

Монолиты грунтов для образцов-близнецов отбирались на объектах Краснодарского края из шурфов-дудок по 2-5 штук с одной глубины механическим боковым грунтоносом [5-6], который обеспечивает сохранность природного сложения грунтов в монолитах при коэффициенте корреляции по плотности скелета просадочных грунтов 0,954 в сравнении с монолитами, отобранными вручную [7].

Пары образцов-близнецов грунтов испытывались до одинаковой конечной нагрузки от 300 до 500 кПа по одинаковой схеме:

- с водонасыщением грунта до начала приложения нагрузки;
- при природной влажности грунта без водонасыщения в процессе испытания.

Из каждой пары образцов близнецов грунтов один образец испытывался методом ПВН, а другой – методом СВН. Скорость ПВН для образцов грунтов каждой пары близнецов задавалась произвольно и в различных опытах имела различную величину. Диапазон скоростей ПВН при сравнительных испытаниях пар образцов-близнецов грунтов методами ПВН и СВН составил от 1 до 1000 кПа/ч. Приложение СВН до конечного значения нагрузки осуществлялась ступенями, последовательно принимающими значения 50, 100, 150, 200, 300, 400 и 500 кПа с выдержкой каждой до условной стабилизации осадки образцов грунтов по ГОСТ 12248 [3].

Испытания образцов-близнецов грунтов проводились на автоматических компрессионных приборах, разработанных на базе стандартного компрессионного прибора КПр-1: методом ПВН – на приборе АКП-4Н с постоянно возрастающим приложением нагрузки, а методом СВН – на приборе АКП-3С со ступенчатым приложением нагрузки [8-12].

Измерение осадки образцов-близнецов грунтов на приборах АКП-4Н и АКП-3С осуществлялось с точностью 0,005 мм.

По всем испытанным образцам-близнецам грунтов методами ПВН и СВН определялись относительная вертикальная деформация ε и коэффициент относительной сжимаемости α_0 . Кроме того, по образцам грунтов, испытанным методом ПВН, определялись их относительная дополнительная осадка Q при постоянной конечной нагрузке $P_k = \text{const}$ и степень консолидации U при окончании нагружения по формулам:

$$Q = \frac{S_c}{S_{\dot{\varepsilon}}} 100; \quad (1)$$

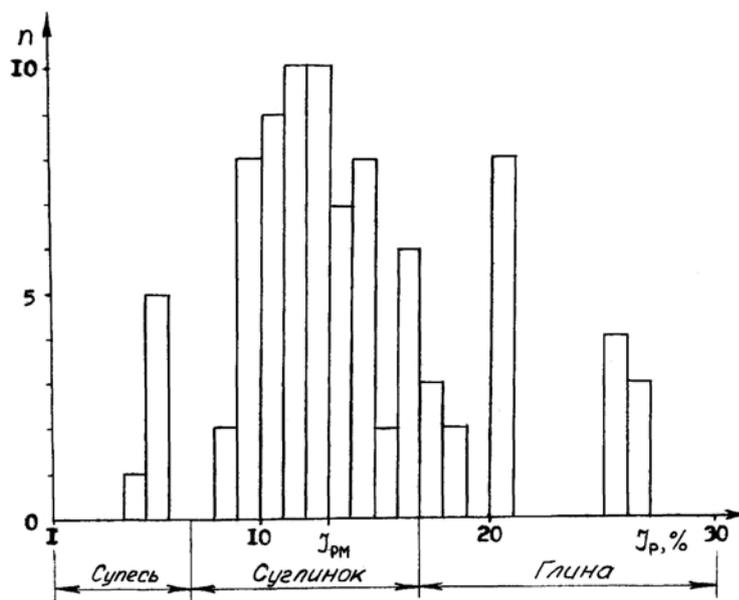
$$U = \frac{S_{\dot{\varepsilon}}}{S_{\dot{\varepsilon}} + S_c} = \frac{1}{1 + \frac{S_c}{S_{\dot{\varepsilon}}}}, \quad (2)$$

где S_k – осадка грунта за время приложения ПВН;

S_c – стабилизированная осадка грунта при постоянной конечной нагрузке $P_k = \text{const}$.

Расчет значений ε при методе СВН производился через интервалы приращения сжимающей нагрузки, соответствующие стандартным ступеням, которыми производились испытания $\Delta P = 50$ и 100 кПа, а при методе ПВН – через интервалы $\Delta P = 10$ кПа, позволяющие получить высокую точность определения α_o [13] при относительно небольшой трудоемкости расчетов.

Всего было испытано 88 пар образцов-близнецов грунтов, из которых 6 пар были представлены супесью, 62 – суглинками и 20 – глиной. Среднее значение числа пластичности I_p – медианы графика распределения испытанных пар образцов-близнецов грунтов по типу грунтов составляет $I_{PM} = 13\%$ (рисунок 1).



n – количество испытаний;

$I_{PM} = 13\%$ – медиана графика распределения

Рисунок 1 – Распределение количества сравнительных испытаний образцов-близнецов грунтов методами ПВН и СВН по типу грунтов

Так как при испытаниях образцов-близнецов грунтов методом ПВН скорость ПВН задавалась произвольно и в различных опытах имела различную величину, для обоснования правомерности сравнения результатов экспериментов рассмотрим распределение значений относительной осадки Q при постоянной конечной нагрузке $P_k = \text{const}$, полученных методом ПВН, которые указывают на степень консолидации образцов грунтов при окончании приложения ПВН.

Кроме того, проведем дисперсионный анализ по относительной вертикальной деформации ε и относительному коэффициенту сжимаемости α_o .

Распределение значений Q . Все значения Q разбиваем на группы с интервалом увеличения Q равным 2 %. Получаем 14 групп значений Q от 1,9 до 28 % (таблица 1), охватывающих 85 результатов.

Таблица 1 – Проверка гипотезы о логнормальном распределении

$Q, \%$	n_i	$\ln Q$	$y_i = \frac{\ln Q - 0,69}{-0,69}$	t_i	$\Phi(t_i)$	$\frac{(N_i - n_i)^2}{N_i}$
2	1	0,69	0	-2,74	0,003	4,75
4	12	1,39	0,70	-1,41	0,079	0,51
6	18	1,79	1,10	-0,65	0,258	0,20
8	19	2,08	1,39	-0,10	0,460	0,23
10	12	2,30	1,61	0,31	0,622	2,84
12	5	2,48	1,79	0,66	0,745	1,50
14	4	2,64	1,95	0,96	0,831	0,65
16	3	2,77	2,08	1,21	0,887	0,24
18	4	2,89	2,20	1,43	0,924	0,37
20	3	3,00	2,31	1,64	0,949	0,10
22	1	3,09	2,40	1,81	0,965	0,01
24	1	3,18	2,49	1,98	0,976	0,03
26	1	3,26	2,57	2,13	0,983	0,80
28	1	3,33	2,64	2,27	0,988	$\chi_{10}^2 = 12,23$

Строим график распределения значений Q . В натуральных координатах график распределения значений Q (рисунок 2а) имеет существенно

несимметричный вид с положительной асимметрией, а в полулогарифмических координатах – симметричный вид (рисунок 2б). Следовательно, естественным будет проверить гипотезу о логнормальном распределении [14].

Для упрощения вычислений введем новую переменную

$$y = \ln Q - B, \quad (3)$$

где B – константа.

Для распределения значений Q рассчитываем следующие показатели [14]:

- среднее значение

$$y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k n_i \cdot y_i, \quad (4) \text{ где}$$

$n = 85$ – общее число испытаний;

n_i – число испытаний (наблюдений) в i -ом интервале разбиения значений Q ;

$k = 14$ – число интервалов разбиения значений Q ;

- дисперсию

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^k n_i \cdot (y_i - \bar{y})^2; \quad (5)$$

- параметр для каждого интервала разбиения значений Q

$$t_i = \frac{y_i - y}{S}. \quad (6)$$

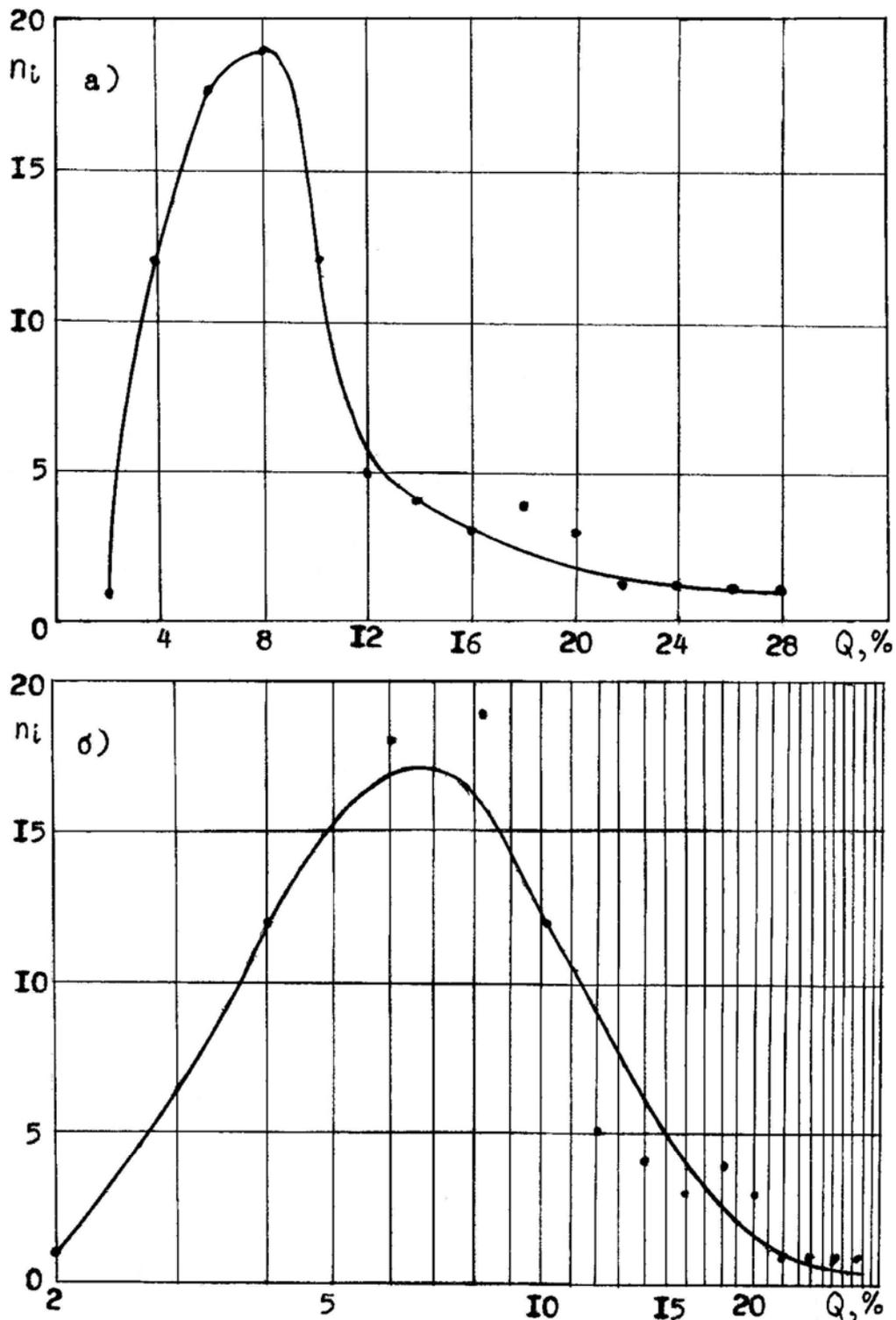


Рисунок 2 – Распределение значений Q :
 а) – в натуральных координатах;
 б) – в полулогарифмических координатах

По значениям параметра t_i находим по таблицам [14] значения нормальной стандартной функции распределения $\Phi(t_i)$ и рассчитываем:

- теоретические частоты

$$N_i = [\Phi(t_{i+1}) - \Phi(t_i)]; \quad (7)$$

- критерий Пирсона при числе степеней свободы

$$k - m = 13 - 3 = 10;$$

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(N_i - n_i)^2}{N_i}, \quad (8)$$

где m – число ограничений при проверке нашей гипотезы (n , y и S^2).

Результаты вычислений сводим в таблицу 1. Для удобства расчетов принимаем $B = 0,69$.

Вычисленное значение $\chi^2 = 12,23$ меньше, чем допустимое при 10%-ном уровне значимости $\chi_{0,1;10}^2 = 15,99$, поэтому гипотезу о логнормальном распределении принимаем как непротиворечащую полученным результатам, которые можно считать по значению Q достаточно представительными для использования при обработке сравнительных испытаний образцов-близнецов грунтов методами ПВН и СВН.

Дисперсионный анализ относительной вертикальной деформации ε и коэффициента относительной сжимаемости α_0 . Обозначим относительную вертикальную деформацию и коэффициент относительной сжимаемости грунтов при методе ПВН, соответственно через ε_n и α_{on} , а при методе СВН – через ε_c и α_{oc} .

Все значения Q разбиваем на 3 группы, каждая из которых охватывает следующее количество пар результатов сравнительных испытаний образцов-близнецов грунтов методами ПВН и СВН:

$$\begin{aligned} Q_I &= 0-5 \% & - n_I &= 21; \\ Q_{II} &= 5,01-10 \% & - n_{II} &= 43; \\ Q_{III} &>10 \% & - n_{III} &= 24. \end{aligned}$$

Рассчитываем критерий Фишера и коэффициент корреляции между ε_n и ε_c и между α_{on} и α_{oc} при линейной регрессии при нагрузке 50, 100, 150, 200 и 300 кПа (таблицы 2-5).

Таблица 2 – Сравнение ε_n и ε_c по критерию Фишера

U	Q _n , %	Сжимающая нагрузка, P, кПа				
		50	100	150	200	300

1,0-0,952	0-5	2,73>2,09*	1,12<2,09*	1,15<2,09*	1,12<2,09*	1,09<2,09*
	v	21	21	21	21	12
0,951-0,909	5,01-10	2,38>1,68*	2,22>1,68*	1,97>1,69*	1,60<1,68*	1,46<1,76*
	v	43	43	41	43	35
<0,909	>10	2,28>1,98*	2,13>1,98*	2,05>1,98*	1,31<1,98*	1,49<2,09*
	v	24	24	24	24	21

Таблица 3 – Сравнение $\alpha_{он}$ и $\alpha_{ос}$ по критерию Фишера

U	$Q_n, \%$	Сжимающая нагрузка, P , кПа				
		50	100	150	200	300
1,0-0,952	0-5	2,73>2,09*	1,27<2,09*	2,15<2,09*	1,29<2,09*	1,12<2,69*
	v	21	21	21	21	12
0,951-0,909	5,01-10	2,40>1,68*	4,03>1,68*	2,04>1,69*	2,56>1,68*	1,44<1,76*
	v	43	43	41	43	35
<0,909	>10	2,28>1,98*	2,12>1,98*	2,71>1,98*	3,84>1,98*	2,00<2,09*
	v	24	24	24	24	21

Таблица 4 – Коэффициенты корреляции между ε_n и ε_c

U	$Q_n, \%$	Сжимающая нагрузка, P , кПа				
		50	100	150	200	300
1,0-0,952	0-5	0,606	0,947	0,932	0,943	0,956
0,951-0,909	5,01-10	0,649	0,671	0,712	0,745	0,829
<0,909	>10	0,684	0,783	0,803	0,875	0,819

Таблица 5 – Коэффициенты корреляции между $\alpha_{он}$ и $\alpha_{ос}$

U	$Q_n, \%$	Сжимающая нагрузка, P , кПа				
		50	100	150	200	300
1,0-0,952	0-5	0,606	0,889	0,682	0,881	0,944
0,951-0,909	5,01-10	0,646	0,498	0,701	0,625	0,834
<0,909	>10	0,684	0,765	0,607	0,511	0,666

Примечания к таблицам 2-5

1 U – степень консолидации при окончании нагружения образцов грунтов методом ПВН; Q_n – интервал значений относительной дополнительной осадки образцов грунтов при постоянной конечной нагрузке при методе ПВН; v – объем выборки;

2 Знаком «*» отмечены табличные значения критерия Фишера [14] при 95 %-ой обеспеченности.

Сравнение рассчитанных критериев Фишера с табличными [14] показывает (см. таблицы 2 и 3), что о равенстве средних значений ε и α_o , полученных при испытании пар образцов-близнецов грунтов методами ПВН и

СВН, можно говорить при значениях $Q = 0-5 \%$ и $P = 100-300$ кПа, а также при значениях $Q = 5,01-10 \%$ и $P = 300$ кПа. В таблицах 2 и 3 наиболее тесная связь между ε_n и ε_c и между α_{on} и α_{oc} выделена зоной выше и правее пунктирной линии.

В то же время коэффициент корреляции ε_n и ε_c и α_{on} и α_{oc} велики (см. таблицы 4-5) и значительно превышают предельные значения [14] для указанных в таблицах 2-3 объемов выборок, по которым они рассчитаны. Это свидетельствует о том, что ε_n и α_{on} , полученные при методе ПВН, сопоставимы с ε_c и α_{oc} , полученными при методе СВН, и следовательно, их сравнение правомерно.

Таким образом, полученные результаты компрессионных испытаний образцов-близнецов грунтов природного сложения методами ПВН и СВН имеют логнормальное распределение, указывающее на достаточную их представительность для последующей обработки.

Правомерность сравнения результатов компрессионных испытания образцов-близнецов грунтов методами ПВН и СВН установлена дисперсионным анализом, при котором получены достаточно низкие значения критерия Фишера, и корреляционным анализом, при котором получены и высокие значения коэффициентов корреляции сжимаемости грунтов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Денисенко В.В., Ляшенко П.А.** Анализ методов компрессионных испытаний грунтов // Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды КубГТУ». – Краснодар: КубГТУ. – 2015, № 2. – 22 с. – URL: <http://ntk.kubstu.ru/file/337>.

2. Авт. св. СССР № 1506022 Е 02 D 1/00. Способ определения деформационных характеристик грунтов / **Горячев М.И., Денисенко В.В., Ляшенко П.А.** // Открытия. Изобретения. – 1989, № 33.

3. ГОСТ 12248-2010 Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости.

4. ГОСТ 5180-84 Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик.

5. Авт. св. СССР № 985737 G 01 N 1/04, E 21 В 49/06. Боковой грунтонос / **Денисенко В.В., Байков О.Н.** // Открытия. Изобретения. Промышленные образцы. Товарные знаки. 1982, № 48.

6. **Денисенко В.В.** О боковом грунтоносе для механизированного отбора монолитов просадочных грунтов из стенок дудок // Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды КубГТУ». – Краснодар: КубГТУ, 2014. № 4. – 20 с. – URL: <http://ntk.kubstu.ru/file/92>.

7. **Денисенко В.В.** Исследование качества механизированного отбора монолитов просадочных грунтов боковым грунтоносом из стенок дудок // Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды КубГТУ». – Краснодар: КубГТУ, 2014, № 5. – 20 с. – URL: <http://ntk.kubstu.ru/file/222>.

8. **Денисенко В.В., Ляшенко П.А.** Об экспериментальных компрессионных приборах для исследования сжимаемости грунтов постоянно возрастающей нагрузкой // Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды КубГТУ». – Краснодар: КубГТУ, 2015, № 9. – 22 с. – URL: <http://ntk.kubstu.ru/file/539>.

9. Авт. св. СССР № 1599704 G 01 N 3/00. Устройство для определения механических свойств грунтов / **Денисенко В.В., Литвинов Ю.А.** // Открытия. Изобретения. – 1990, № 38.

10. Авт. св. СССР № 1608290 E 02 D 1/00. Компрессионный прибор / **Денисенко В.В.** // Открытия. Изобретения. – 1990, № 43.

11. Авт. св. СССР № 1604921 E 02 D 1/02, G 01 N 3/08. Устройство для компрессионных испытаний грунтов / **Денисенко В.В.** // Открытия. Изобретения. – 1990, № 41.

12. Авт. св. СССР № 1689508 E 02 D 1/00, G 01 N 33/24. Автоматический компрессионный прибор / **Денисенко В.В.** // Открытия. Изобретения. – 1990, № 41.

13. **Денисенко В.В., Ляшенко П.А.** Об оценке случайной погрешности определения показателей сжимаемости грунтов // Научный мультидисциплинарный журнал «Наука. Техника. Технологии» (Политехнический вестник). – 2014, № 4. – С. 52-59.

14. **Радионов Д.А.** Статистические решения в геологии. – М., Недра, 1981. – 231 с.

REFERENCES

1. **Denisenko V.V., Lyashenko P.A.** Analysis of methods of compression tests of soils // Electronic Network polythematic journal "Proceedings KubGTU." – Krasnodar KubGTU. – 2015, № 2. – 22. – URL: <http://ntk.kubstu.ru/file/337>.

2. Aut. sv. USSR № 1506022 E 02 D 1/00. A method for determining deformation characteristics of soils / **Denisenko V.V., Lyashenko P.A.** // Disco-veries. Inventions. – 1989, № 33.

3. GOST 12248-2010 Soils. Laboratory methods for determining the characteristics of strength and deformability.

4. GOST 5180-84 Soils. Laboratory methods for determining the physical characteristics.

5. Aut. sv. USSR № 985737 G 01 N 1/04, E 21 B 49/06. Sidewall sampler / **Denisenko V.V., Bajkov O.N.** // Opening. Invention. Industrial designs. Trademarks. 1982, № 48.

6. **Denisenko V.V.** About sidewall sampler selection for mechanical monoliths prasadochnyh soils from wall chimes // Electronic network polythematic journal "Proceedings KubGTU." – Krasnodar KubGTU 2014, № 4. – 20 p. – URL: <http://ntk.kubstu.ru/file/92>.

7. **Denisenko V.V.** Research quality mechanical selection monoliths soil subsidence side corer of the walls of pipes // Electronic network polythematic journal "Proceedings KubGTU." – Krasnodar: KubGTU, 2014, № 5. – 20 p. – URL: <http://ntk.kubstu.ru/file/0222>.

8. **Denisenko V.V., Lyashenko P.A.** On the experimental kompression instruments for the study of the compressibility of the soil is constantly increasing

load // Electronic Network polythematic journal "Proceedings KubGTU." – Krasnodar KubGTU, 2015, № 9. – 22 p. – URL: <http://ntk.kubstu.ru/file/539>.

9. Aut. sv. USSR № 1599704 G 01 N 3/00. An apparatus for determining the mechanical properties of soils / **Denisenko V.V., Litvinov Y.A.** // Discoveries. Inventions. – 1990, № 38.

10. Aut. sv. USSR № 1608290 E 02 D 1/00. Compression at-boron / **Denisenko V.V.** // Discoveries. Inventions. – 1990, № 43.

11. Aut. sv. USSR № 1604921 E 02 D 1/02, G 01 N 3/08. Device for compression tests of soils / **Denisenko V.V.** // Discoveries. Inventions. – 1990, № 41.

12. Aut. sv. USSR № 1689508 E 02 D 1/00, G 01 N 33/24. Automatic compression device / **Denisenko V.V.** // Discoveries. Inventions. – 1990, № 41.

13. **Denisenko V.V., Lyashenko P.A.** An estimate of the random error in determining the parameters of the compressibility of soil // Scientific multidisciplinary journal "Science. Equipment. Technology "(Polytechnic Gazette). – 2014, № 4. – P. 52-59.

14. **Rodionov D.A.** Statistical solutions in geology. – M., Nedra, 1981. – 231 p.

EXPERIMENTAL JUSTIFICATION A MEANINGFUL COMPARISON OF COMPRESSION SOIL TESTING TECHNIQUES ARE CONTINUOUSLY INCREASING LOAD WITH THE METHOD OF STEPWISE INCREASING LOAD

V.V. DENISENKO¹, P.A. LYASHENKO²

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

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

The technique of compression tests of soils by CRL compared with the method of IOS, which is strictly defined by the boundary conditions of assessment compressibility test soils, the standardized, and is most common in practice. It has been tested 88 pairs of the sample-twins of different soils. Tests of samples twin soil were carried out on automatic compression devices, both based on a standard compression device CHR-1: CRL-method – the instrument AKP-4N with the monotonously increasing load application, and by IOS-PCA on the device with a AKP-3S with the stepwise application load. Analysis of the results of comparative

tests set their representative and reliable comparison of the CRL method test with the method IOS.

Key words: constantly increasing load stepwise increasing load, soil sample, compressive load.