Пономарев А.Б., Безгодов М.А. Определение коэффициента фильтрации глинистого грунта по данным статического зондирования с измерением порового давления // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. – 2017. – Т. 8, № 4. – С. 43–53. DOI: 10.15593/2224-9826/2017.4.05

Ponomarev A.B., Bezgodov M.A. Determination of the filtration coefficient of clay soil using cone penetration test with measurement of pore pressure. *Bulletin of PNRPU. Construction and Architecture*. 2017. Vol. 8, no. 4. Pp. 43-53. DOI: 10.15593/2224-9826/2017.4.05



DOI: 10.15593/2224-9826/2017.4.05 УДК 624.15

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ФИЛЬТРАЦИИ ГЛИНИСТОГО ГРУНТА ПО ДАННЫМ СТАТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ С ИЗМЕРЕНИЕМ ПОРОВОГО ДАВЛЕНИЯ

## А.Б. Пономарев, М.А. Безгодов

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

#### О СТАТЬЕ

Получена: 05 июля 2017 Принята: 23 августа 2017 Опубликована: 15 декабря 2017

#### Ключевые слова:

статическое зондирование, диссипационный тест, поровое давление, пьезоконус, модель упрочняющегося грунта, коэффициент фильтрации

#### аннотация

На сегодняшний день в отечественной практике инженерных изысканий используются преимущественно традиционные методы исследования, включающие полевые испытания грунтов с отбором образцов и их последующим изучением в лабораторных условиях. Проведение таких инженерно-геологических изысканий традиционными методами - весьма трудоемкий и продолжительный процесс, требующий значительных материальных затрат. В связи с этим возникает необходимость применения экспресс-методов. Одним из наиболее распространенных среди них является метод статического зондирования. В отечественной практике статическое зондирование чаще всего используется лишь как дублирующий метод в силу сложности и точности данных, получаемых при интерпретации результатов, что связано с устаревшим оборудованием, которое применяют изыскательские организации. Таким образом, на практике зондирование чаще всего применяется для уточнения напластования грунтов, определения несущей способности свай, а также для определения прочностных характеристик грунтов. В настоящее время в зарубежной практике нашли широкое применение электрические зонды с датчиками порового давления. Данные зонды позволяют с гораздо большей точностью определять тип грунта, а при проведении диссипационных тестов на рассеивание поровой воды – оценивать фильтрационные параметры грунта.

В данной статье рассмотрено применение метода статического зондирования с измерением порового давления для нахождения коэффициента фильтрации глинистого грунта. Приведены результаты лотковых и натурных исследований по погружению зонда в слабый глинистый грунт. На основании экспериментальных данных предложена численная модель погружения зонда и представлена последовательность ее калибровки с целью нахождения коэффициента фильтрации грунта.

© Пономарев Андрей Будимирович – доктор технических наук, профессор, e-mail: spstf@pstu.ru. Безгодов Михаил Александрович – аспирант, e-mail: spstf@pstu.ru.

Andrei B. Ponomarev – Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: spstf@pstu.ru. Mikhail A. Bezgodov – Postgraduate Student, e-mail: spstf@pstu.ru.

# DETERMINATION OF THE FILTRATION COEFFICIENT OF CLAY SOIL USING CONE PENETRATION TEST WITH MEASUREMENT OF PORE PRESSURE

### A.B. Ponomarev, M.A. Bezgodov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia Federation

ARTICLE INFO	ABSTRACT			
Received: 05 July 2017 Accepted: 23 August 2017 Published: 15 December 2017	In the Russian practice of engineering surveys, traditional methods of research are used, including field testing of soils with the selection of samples and their subsequent study in laboratory conditions. Performing surveys using these methods is a labor- intensive and long term process that requires considerable material costs.			
Keywords:	there is a need to apply express methods. One of the most common express methods is			
cone penetration test, dissipation test, pore pressure, piezocones, hardening soil model, coefficient of filtration	the method of cone penetration test (CPT). In Russia, CPT is most often used only as a duplicating method, since it is difficult to obtain accurate data in interpreting the results, which is associated with old equipment for engineering surveys. Therefore, in practice, sounding is most often used to determine the bedding, determine the bearing capacity of piles and to determine the strength characteristics of soils with high reliability. At present, electric cones with pore pressure sensors have found wide application in foreign practice. These cones make it possible to increase the accuracy, determine the soil type and evaluate the soil filtration parameters from the dissipation test data.			
	In the article the authors will consider the application of the cone penetration test with the measurement of pore pressure to find the filtration coefficient of clay soil. The results of trough and field tests on immersing the cone in clay soil are presented. On the basis of the experimental data, a numerical model of probe immersion			

© PNRPU

### Введение

finding the soil filtration coefficient.

has been developed and a sequence of its calibration is presented with the aim of

В настоящее время в связи с появлением современных зондов с датчиками порового давления появилась возможность оценить фильтрационные характеристики грунтов при проведении статического зондирования [1–6]. Однако на сегодняшний день отсутствует апробированная методика определения коэффициента фильтрации по данным статического зондирования. В зарубежной практике данные зонды активно применяются, но существующих методик расчета также недостаточно. К наиболее известным и распространенным относятся методика Parez и Fauriel (1988) и методика Robertson (1992) [7–9]. Данные методики расчета основаны главным образом на использовании диссипационных тестов и носят преимущественно эмпиричный характер с привязкой к конкретным разновидностям грунтов и региону их залегания. В связи с этим они имеют весьма ограниченное применение и не могут использоваться на территории России.

В данной статье будет рассмотрен способ оценки коэффициента фильтрации грунта по данным статического зондирования с использованием численного моделирования.

Оценка коэффициента фильтрации грунта была выполнена на основании результатов статического зондирования, полученных на опытной экспериментальной площадке.

### 1. Описание опытной площадки

Экспериментальная площадка находится в пригороде г. Перми. На данной площадке были выполнены инженерно-геологические изыскания с проведением статического зондирования, а также испытания натурных забивных висячих свай [10, 11]. В настоящей статье

Пономарев А.Б., Безгодов М.А. / Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура, т. 8, № 4 (2017), 43–53

представлены результаты диссипационных испытаний основного несущего слоя свайных фундаментов. Данный слой характеризуется водонасыщенным суглинком мягкопластичной консистенции (ИГЭ-1).

Для рассматриваемого инженерно-геологического элемента было проведено статическое зондирование с измерением порового давления. Статическое зондирование выполнялось установкой GeoMil LWC100 XS с гидравлической системой задавливания зонда. Зондирование осуществлялось электрическим пьезоконусом с датчиком порового давления и муфтой трения (зонд 2-го типа по ГОСТ 19912).

На площадке были выполнены диссипационные тесты (тесты на рассеивание поровой воды). Испытания проводились путем остановки пьезозонда на заданной глубине, после чего фиксировался процесс падения давления воды в грунте с течением времени. Эксперимент проводился до 90 % падения порового давления и длился на каждой отметке около 20 мин. Диссипационные тесты проводились в двух точках на трех разных отметках. Их результаты представлены в конце статьи. Время рассеивания порового давления по результатам диссипационных тестов в различные временные интервалы приведено в табл. 1.

Таблица 1

### Результаты диссипационных тестов по данным численного моделирования

Table 1

ка ния очки кого зания		По данным численного моделирования			По данным натурных испытаний				
Отмет испыта	Номер т статичес зондиров	<i>k</i> <sub>ф</sub> , м/сут	<i>t</i> <sub>50</sub> , c	<i>t</i> <sub>70</sub> , c	<i>t</i> <sub>90</sub> , c	$k_{\phi}$ , м/сут (Parez и Fauriel, 1988)	<i>t</i> <sub>50</sub> , c	<i>t</i> <sub>70</sub> , c	<i>t</i> <sub>90</sub> , c
7,5 м	CPTU5	0,00030	155	317	701	0,00018	156	345	1200
	CPTU8	0,00018	257	528	1169	0,00007	352	690	1620
95.4	CPTU5	0,00025	154	347	646	0,00011	226	430	1380
0,5 М	CPTU8	0,00015	339	594	1128	0,00012	217	390	1110
9,5 м	CPTU8	0,00020	159	379	539	0,00013	204	390	1260
	CPTU5	0,00018	221	431	749	0,00011	231	420	1470
Среднее значение С		0,00021	214	432	822	0,00012	231	444	1340

### The results of dissipation tests from numerical modeling

Примечание:  $k_{\phi}$  – коэффициент фильтрации,  $t_{50}$  – время при 50 % рассеивании порового давления;  $t_{70}$  – время при 70 % рассеивании порового давления;  $t_{90}$  – время при 90 % рассеивании порового давления;  $t_{90}$  – время при 90 % рассеивании порового давления.

По времени рассеивания порового давления был произведен расчет коэффициента фильтрации по методике Parez и Fauriel [7], которая является аппроксимацией экспериментальных данных, полученных учеными, и заключается в определении коэффициента фильтрации по времени рассеивания порового давления до 50 % от максимального значения. Результаты расчета по данной методике представлены в табл. 1. Сопротивление грунта по муфте трения и конусу зонда на отметках проведения диссипационных тестов приведены в табл. 2.

Таблица 2

## Удельное сопротивление грунта по конусу и муфте трения по данным численного моделирования

Table 2

	Удельное со	противление	Удельное сопротивление		
	по конусу	у $q_c$ , МПа	по муфте трения <i>f<sub>si</sub></i> , кПа		
	Среднее значение	По данным	Среднее значение	По данным	
испытания	по данным	численного	по данным	численного	
	зондирования	моделирования	зондирования	моделирования	
7,5 м	1,09	0,81	11.2	12,4	
8,5 м	1,18	0,90	13,9	13,5	
9,5 м	1,01	1,02	12,6	15,6	

## Sleeve friction resistance and cone resistance based on the results of numerical simulation

### 2. Лотковые эксперименты

Для разработки и калибровки численной модели погружения зонда в слабый водонасыщенный глинистый грунт были проведены лотковые испытания [12] в условиях объемной деформации с использованием испытательного стенда (лотка). Данный стенд представляет собой лоток размером 1×1×1 м, заполненный глинистой пастой, электрический зонд, датчик измерения глубины и скорости погружения зонда, блок регистрации сигналов.

Лоток заполнялся глинистой пастой с заданной влажностью и послойным уплотнением грунта. Влажность и степень уплотнения грунта были подобраны таким образом, чтобы по физико-механическим свойствам она была приближена к глинистым грунтами, залегаемым на опытных площадках.

В точках проведения зондирования с целью оценки деформации массива грунта глинистая паста укладывалась слоями высотой 10–15 мм с устройством маяков. В качестве маяков использовалась специальная водорастворимая бумага разных цветов, которая укладывалась после уплотнения каждого слоя.

Контроль однородности укладки и уплотнения глинистой пасты осуществлялся путем отбора грунта из каждого слоя с определением плотности лабораторным методом. После проведения испытания при откопке грунта были отобраны пробы грунта: для испытания на сдвиг, компрессионных и трехосных испытаний.

Всего было выполнено три погружения зонда на глубину от 12 до 13 см. Результаты зондирования в лотке представлены на рис. 1.

Среднее удельное сопротивление по конусу зонда на отметке вдавливания 12 см составило  $q_c = 0,21$  МПа.

После погружения зонда производилась откопка зонда с измерением вертикальной деформации окружающего грунтового массива. Измерение деформаций проводилось с точностью до 1 мм. Результаты полученных деформаций грунтового массива после погружения зонда представлены на рис. 2, *а*.

Полученные деформации глинистой пасты имеют тот же характер, что и у других исследователей, в частности проведенных БашНИИстроем с помощью рентгена и представленных на рис. 2, *б* [13].





Рис. 1. Графики зависимости удельного сопротивление грунта по наконечнику зонда от глубины погружения зонда в лоток Fig. 1. The graph of cone resistance on the depth in the tray



Рис. 2. Вертикальные деформации грунта после погружения зонда: *а* – по данным проведенных экспериментов; *б* – по данным экспериментов БашНИИстроя (НИИпромстрой) [13]

Fig. 2. Vertical deformation of the soil after the penetration of the cone: a – according to the data of the conducted experiments; b – according to the data of the experiments of BashNIIstroi (NIIpromstroy) [13]

На основании данных результатов была разработана численная модель погружения зонда в грунт.

### 3. Численное моделирование

Численное моделирование производилось с помощью программного комплекса Plaxis 2D с использованием модели упрочняющегося грунта (Hardening Soil) [14–16].

Параметры грунтовой модели для лотковых испытаний определялись в соответствии с рекомендациями Руководства Plaxis [14–16]. Прочностные характеристики грунта принимались по данным лабораторных испытаний. Деформационные характеристики Ponomarev A.B., Bezgodov M.A. / PNRPU Bulletin. Construction and Architecture, vol. 8, no. 4 (2017), 43–53

грунта принимались по данным компрессионных и трехосных испытаний глинистой пасты. Входные параметры глинистой пасты, принимаемые при численном моделировании, представлены в табл. 3.

Параметры грунтовой модели для опытной площадки определялись в соответствии с рекомендациями Руководства Plaxis [14–16]. Прочностные характеристики грунта принимались по данным лабораторных испытаний. Деформационные характеристики грунта принимались по данным компрессионных испытаний. Входные параметры для суглинка мягкопластичного, принимаемые при численном моделировании, сведены в табл. 3.

Таблица 3

### Входные параметры грунтов для модели упрочняющегося грунта

Table 3

Параметр	Глинистая паста	Суглинок мягкопластичный	
Объемный вес грунта ү, кН/м <sup>3</sup>	17,6	19,4	
Удельное сцепление <i>c</i> <sub>ref</sub> , кПа	19	14	
Угол внутреннего трении ф, град	7	10	
Базовое давление <i>p</i> <sub>ref</sub> , кПа	100	100	
Показатель степенной зависимости жесткости	1	1	
от уровня напряжений <i>т</i>	1		
Секущий модуль деформации грунта <i>E</i> 50 <sub>ref</sub> , МПа	2,8	2,8	
Одометрический модуль деформации Eoed <sub>ref</sub> , МПа	3,3	3,6	

### Input parameters of soils for the model of hardening soil

Моделирование производилось в двумерном программном комплексе Plaxis 2D в осесимметричной постановке задачи. В данной постановке рассматривается модель в виде сектора вращения в 1 радиан с предположением, что в любом из радиальных направлений деформация и напряжения являются одинаковыми.

При создании модели грунтовый массив разбивался на 15-узловые треугольные конечные элементы с интерполяцией четвертого порядка для перемещений и интегрирования по 12 точкам напряжений. С целью уменьшения времени численного расчета применялось локальное измельчение сетки вокруг конуса и боковой поверхности зонда.

Расчетная модель была составлена в натурном масштабе 1:1 со стандартными геометрическими размерами зонда радиусом 18 мм и углом при вершине 60°.

Граничные условия в расчетной схеме принимались следующими: по нижней границе модели запрещены перемещения по вертикали и горизонтали, по вертикальной границе запрещены горизонтальные перемещения, по верхней границе перемещения не ограничены.

Одна из главных задач численного эксперимента состояла в анализе напряженнодеформированного состояние вокруг боковой поверхности зонда, в частности распределения порового давления в месте установки датчика непосредственно между муфтой трения и конуса зонда. При стандартных подходах моделирования контактной поверхности путем продления интерфейсных элементов в углах зонда возникала концентрация напряжений, которая сильно влияла на распределение порового давления на данном участке и сходимости задачи в целом. С целью уменьшения концентрации напряжений вокруг углов модели зонда, а также минимизации влияния интерфейсных элементов на распределение давления в зоне выше конуса была разработана модель с равномерным сглаживанием сетки конечных элементов в углах зонда (рис. 3). На первом этапе численного моделирования были произведены проверка и калибровка полученной численной модели по данным лотковых экспериментов.

По результатам численного моделирования удалось добиться качественной сходимости полученных расчетных сопротивлений грунта по конусу зонда с экспериментальными данными. В конце расчета значение удельного сопротивления по конусу зонда составило  $q_c = 0.23$  МПа, что близко к экспериментальными  $q_c = 0.21$  МПа.

На втором этапе был произведен расчет на отметках проведения диссипационных тестов на опытной площадке. В первую очередь была произведена калибровка прочностных параметров грунта. Результаты калибровки представлены на рис. 4 и сведены в табл. 2.









Рис. 4. График зависимости удельных сопротивлений грунта по конусу и муфте трения вертикальных перемещений моделируемого зонда для опытной площадки: a – на глубине 7,5 м; b – на глубине 8,5 м; e – на глубине 9,5 м Fig. 4. The graph of cone resistance and sleeve friction of the vertical displacements of the simulated cone for the experimental site: a – at a depth of 7.5 m; b – at a depth of 8.5 m; c – at a depth of 9.5 m

Как видно из табл. 2, в результате проведенной калибровки результаты численного расчета дают величины  $q_c$  и  $f_{si}$ , близкие к натурным значениям.

На следующем этапе была произведена оценка максимального избыточного порового давления, которое возникает после погружения зонда. Полученные максимальные значения порового давления, возникающего после погружения зонда, представлены в табл. 4.

Как видно из табл. 4, максимальное поровое давление, полученное по данным численного моделирования, хорошо сходится с реальными значениями, полученными при зондировании на опытной площадке. Таким образом, можно переходить к расчету консолидации грунта и оценке коэффициента фильтрации.

Таблица 4

### Избыточное поровое давление, возникающее в процессе погружения зонда

Table 4

Отметка испытания, м	Максимальное избыточное поровое давление в месте расположения датчика зонда (между конусом и муфтой трения) и, кПа				
	Среднее значение по данным зондирования	По данным численного моделирования			
7,5	201	235			
8,5	271	256			
9,5	243	270			

Excess pore pressure after the penetration of the cone

Расчет консолидации грунта производился до рассеивания избыточного порового давления. Численный эксперимент, как и натурный, проводился до 90 % падения порового давления.

В результате проведенных расчетов по времени рассеивания порового давления была откалибрована грунтовая модель и получены коэффициенты фильтрации грунта. На рис. 5 представлены графики зависимости порового давления от времени в откалиброванной модели грунта и их сопоставление с реальными диссипационными тестами. Расчетные коэффициенты фильтрации и время рассеивания порового давления в различные интервалы времени приведены в табл. 1.



Рис. 5. Графики зависимости порового давления от времени по результатам численного моделирования: a – на отметке 7,5 м;  $\delta$  – на отметке 8,5 м; e – на отметке 9,5 м Fig. 5. Graphs of pore pressure from time as a result of numerical simulation: a – at a depth of 7.5 m; b – at a depth of 8.5 m; c – at a depth of 9.5 m

Как видно из табл. 1 и графиков на рис. 5, удалось получить достаточную сходимость решения задачи в пределах времени, при котором поровое давление рассеивается до 70 % от максимального значения. Коэффициент фильтрации, полученный по численным расчетам, имеет тот же порядок, что и по методике Parez и Fauriel.

Таким образом, по результатам проведенных расчетов удалось определить коэффициент фильтрации глинистого грунта, который дает хорошую сходимость с проведенными на опытной площадке диссипационными тестами.

### Выводы

1. Разработана численная модель погружения зонда в глинистый грунт, которая при соответствующей калибровке обладает хорошей сходимостью с реальным статическим зондированием.

2. С помощью численного моделирования можно определить коэффициент фильтрации путем калибровки параметров грунта при проведении консолидационного расчета.

3. Результаты калибровки параметров грунта по численной модели зонда будут использованы в дальнейших численных расчетах вдавливаемых или забивных свай.

### Библиографический список

1. Fellenius H. Basics of foundation design. - Sidney, Canada, 2014. - 413 p.

2. Long M. Regional report for Nortern Eourope // Proceedings of the 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing. – Huntington Beach, CA, USA, 2010. – P. 22. – URL: http://www.cpt10.com (дата обращения: 14.05.2015).

3. Mayne P.W. Regional report for North America // Proceedings of the 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing. – Huntington Beach, CA, USA, 2010. – P. 38. – URL: http://www.cpt10.com (дата обращения: 14.05.2015).

4. Mlunarck Z. Regional report for East European Countries // Proceedings of the 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing. – Huntington Beach, CA, USA, 2010. – Р. 38. – URL: http://www.cpt10.com (дата обращения: 14.05.2015).

5. Salgado R., Lee J. Pile design based on cone penetration test results. – West Lafayette, Indiana, USA, 1999. – 268 p.

6. Togliani G., Reuter G.R. CPT/CPTu pile capacity prediction methods – question time // 3rd International Symposium on Cone Penetration Testing. – Las Vegas, Nevada, USA, 2014. – P. 993–1002.

7. Parez L., Fauriel R. Le piézocône, améliorations apportées à la reconnaissance des sols // Rev. Fr. Géotech. – 1988. – Vol. 2. – P. 13–27.

8. Estimating coefficient of consolidation from piezocone tests / P.K. Robertson, J.P. Sully, D.J. Woeller, T. Lunne, J.J.M. Powell, D.G. Gillespie // Canadian Geotechnical Journal. – 1992. – Vol. 4. – P. 539–550.

9. Robertson P.K. Estimating in-situ soil permeability from CPT & CPTu // Proceedings of the 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing. – Huntington Beach, CA, USA, 2010. – P. 8. – URL: http://www.cpt10.com (дата обращения: 14.05.2015).

10. Безгодов М.А., Пономарев А.Б. Несущая способность забивных свай в слабых водонасыщенных грунтах с учетом фактора времени // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2014. – № 1. – С. 7–16. Ponomarev A.B., Bezgodov M.A. / PNRPU Bulletin. Construction and Architecture, vol. 8, no. 4 (2017), 43–53

11. Ponomaryov A.B., Zakharov A.V., Bezgodov M.A. Research into time effect influence on pile bearing capacity // Geotechnics of Roads and Railways. – 2014. – Vol. 2. – P. 885–891.

12. Клевеко В.И., Татьянников Д.А., Драчева Е.О. Сравнение модельных штамповых испытаний и расчетов по методу конечных элементов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2014. – № 4. – С. 170–179.

13. Рыжков И.Б., Исаев О.Н. Статическое зондирование грунтов: монография. – М.: Изд-во ACB, 2010. – 496 с.

14. Строкова Л.С. Определение параметров для численного моделирования поведения грунтов // Изв. Том. политехн. ун-та. – 2008. – № 1. – С. 69–74.

15. Vermeer P.A., Schanz T., Bonnier P.G. The hardening soil model: formulation and verification // Beyond 2000 in Computational Geotechnics – 10 Years of Plaxis. – Balkema, Rotterdam, 1999. – Vol. 2. – P. 281–297.

16. Vermeer P.A., Verruijt A. An accuracy condition for consolidation by finite element // International Journal for Numerical Analytical Methods in Geomechanics. -1981. - Vol. 5,  $N_{2} 1. - P. 1-14$ .

## References

1. Fellenius, H. Basics of foundation design. Revised electronic edition. Canada, Sidney, 2014, 413 p.

2. Long M. Regional report for Nortern Eourope. *Proceedings of the 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing*. Huntington Beach, CA, USA, 2010, p. 22, available at: http://www.cpt10.com (accessed 14 May 2015).

3. Mayne P.W. Regional report for North America. *Proceedings of the 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing*. Huntington Beach, CA, USA, 2010, p. 38, available at: http://www.cpt10.com (accessed 14 May 2015).

4. Mlunarck Z. Regional report for East European Countries. *Proceedings of the 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing*. Huntington Beach, CA, USA, 2010, p. 38, available at: http://www.cpt10.com (accessed 14 May 2015).

5. Salgado R., Lee J. Pile design based on Cone Penetration Test results. USA, Indiana, West Lafayette, 1999, 268 p.

6. Togliani G., Reuter G.R. CPT/CPTu pile capacity prediction methods – question time. *3rd International Symposium on Cone Penetration Testing*, Las Vegas, Nevada, USA, 2014, pp. 993-1002.

7. Parez L., Fauriel R. Le piézocône, améliorations apportées á la reconnaissance des sols. *Rev. Fr. Géotech*,1988, vol. 2, pp. 13-27.

8. Robertson P.K., Sully J.P., Woeller D.J., Lunne T., Powell J.J.M., Gillespie D.G. Estimating coefficient of consolidation from piezocone tests. *Canadian Geotechnical Journal*, 1992, vol. 4, pp. 539-550.

9. Robertson P.K. Estimating in-situ soil permeability from CPT & CPTu. *Proceedings of the 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing*. Huntington Beach, CA, USA, 2010, p. 8. available at: http://www.cpt10.com (accessed 14 May 2015).

10. Bezgodov M.A., Ponomarev, A.B. Nesushhaja sposobnost' zabivnyh svaj v slabyh vodonasyshhennyh gruntah s uchetom faktora vremeni [Bearing capacity of driven piles in weak water-saturated soils, taking into account the time factor]. *Vestnik Permskogo national'nogo issledovatel'skogo politehnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2014, no. 1, pp. 7-16. Пономарев А.Б., Безгодов М.А. / Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура, т. 8, № 4 (2017), 43–53

11. Ponomaryov A.B., Zakharov A.V., Bezgodov M.A. Research into time effect influence on pile bearing capacity. *Geotechnics of Roads and Railways*, 2014, vol. 2, pp. 885-891.

12. Kleveko V.I., Tat'jannikov D.A., Dracheva E.O. Sravnenie model'nyh shtampovyh ispytanij i raschetov po metodu konechnyh jelementov [Comparison of model stamp tests and calculations using the finite element method]. *Vestnik Permskogo national'nogo issledovatel'skogo politehnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2014, no. 4, pp. 170-179.

13. Ryzhkov I.B., Isaev O.N. Staticheskoe zondirovanie gruntov [Cone penetration test of soils]. Moscow, Izdatel'stvo Associacii stroitel'nyh vuzov, 2010, 496 p.

14. Strokova L.S. Opredelenie parametrov dlja chislennogo modelirovanija povedenija gruntov [Determination of parameters for numerical modeling of soil behavior]. *Izvestija Tomskogo politehnicheskogo universiteta*, 2008, no.1, pp. 69-74.

15. Vermeer P. A., Schanz T., Bonnier P. G. The hardening soil model: Formulation and verification. *Beyond 2000 in Computational Geotechnics – 10 Years of Plaxis*. Rotterdam, Balkema, 1999, vol. 2, pp.281-297.

16. Vermeer P. A., Verruijt A. An accuracy condition for consolidation by finite element. *International Journal for Numerical Analytical Methods in Geomechanics*, 1981, vol. 5, no. 1, pp. 1-14.