

## Теоретический расчет конусного индекса заболоченного грунта

Е.Г. Хитров<sup>1 a</sup>, М.Н. Дмитриева<sup>1 b</sup>, В.А. Лухминский<sup>1 c</sup>, А.М. Хахина<sup>2 d</sup>,  
И.В. Григорьев<sup>3 e</sup>, В.А. Иванов<sup>4 f</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, пер. Институтский 5, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, ул. Политехническая 29, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup>Якутская государственная сельскохозяйственная академия, ш. Сергеляхское 3, Якутск, Россия

<sup>4</sup>Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия

<sup>a</sup>ye.gorkhitrov@gmail.com, <sup>b</sup>maryndmitrieva@gmail.com, <sup>c</sup>vladl1112@yandex.ru,

<sup>d</sup>hahin@mail.ru, <sup>e</sup>silver73@inbox.ru, <sup>f</sup>ivanovva55@mail.ru

Статья поступила 1.10.2017, принята 16.10.2017

*Целью исследования является получение зависимости, связывающей сопротивление заболоченного почвогрунта вдавливаю конического индентора с модулем деформации грунта. Результаты получены на базе экспериментальных сведений о физико-механических свойствах заболоченных грунтов и теоретических зависимостей механики контактного взаимодействия. При получении расчетных зависимостей использованы численные методы аппроксимации данных. На первом этапе исследования по результатам аппроксимации статистических сведений о физико-механических свойствах покрытия мохового, травяного, лесного и осушенного болота получены линейная зависимость удельного сцепления заболоченного почвогрунта от модуля деформации, логарифмическая зависимость угла внутреннего трения заболоченного почвогрунта от модуля деформации и линейная зависимость модуля сдвига заболоченного почвогрунта от модуля деформации. На втором этапе выполнен теоретический расчет конусного индекса с использованием зависимостей, полученных предыдущими исследователями, апробированных и подтвержденных экспериментально для глинистых и суглинистых грунтов, а также для лесных почвогрунтов. Расчет выполнен при диаметре основания конуса 35,7 мм, длине конической части пенетromетра 31 мм, угле при вершине конуса 30° с использованием выражений для угла внутреннего трения, внутреннего сцепления и модуля сдвига через модуль деформации, полученных на первом этапе. По результатам аппроксимации расчетных данных получена линейная зависимость для оценки конусного индекса по модулю деформации заболоченного почвогрунта (также приводится формула для оценки модуля деформации заболоченного почвогрунта по конусному индексу). Коэффициент пропорциональности в полученной зависимости, равный 1,1319, сравнен с известным ранее экспериментальным значением коэффициента пропорциональности органоминеральных глинистых грунтов (шлов), находящимся в пределах от 0,4 до 4. На основании результатов сравнения сделан вывод о том, что полученная линейная зависимость в целом не противоречит опубликованным ранее экспериментальным данным.*

**Ключевые слова:** конусный индекс; модуль деформации; заболоченный почвогрунт; физико-механические свойства грунта; контактная задача.

## Theoretical estimation of wetland soil cone index

E.G. Khitrov<sup>1 a</sup>, M.N. Dmitrieva<sup>1 b</sup>, V.A. Lukhminskij<sup>1 c</sup>, A.M. Khakhina<sup>2 d</sup>,  
I.V. Grigorev<sup>3 e</sup>, V.A. Ivanov<sup>4 f</sup>

<sup>1</sup>St. Petersburg State Forest Technical University under name of S.M. Kirov; 5, Institutsky Per., St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup>Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University; 29, Polytechnicheskaya St., St. Petersburg, Russia

<sup>3</sup>Yakutsk State Agricultural Academy; 3rd km, 3, Sergelyakhskoe Highway, Yakutsk, Russia

<sup>4</sup>Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia

<sup>a</sup>ye.gorkhitrov@gmail.com, <sup>b</sup>maryndmitrieva@gmail.com, <sup>c</sup>vladl1112@yandex.ru,

<sup>d</sup>hahin@mail.ru, <sup>e</sup>silver73@inbox.ru, <sup>f</sup>ivanovva55@mail.ru

The article was received 1.10.2017, adopted 16.10.2017

*The aim of the study is to obtain a relationship linking wetland soil resistance to indentation of the conical indenter and the soil deformation modulus. The research results are obtained on the basis of experimental data on the physical and mechanical properties of wetland soils and theoretical dependencies of contact mechanics. When obtaining the calculated dependencies, numerical methods of data approximation are used. In the first stage, the study obtains a linear dependence of the inner cohesion of wetland soil of the deformation modulus, logarithmic dependence of the angle of internal friction of wetland soil on the module of deformation and linear dependence of the shear modulus deformation of wetland soil of the deformation modulus. The dependencies come as a result of approximation of statistical data on the physical and mechanical properties of moss, grass, forest and dry swamp. The second stage provides calculation of the cone index with the theoretical dependencies, obtained by previous researchers and verified experimentally for clay and loam soils, as well as for forest soils. Calculation is made with a base cone diameter of 35,7 mm, the length of the conical portion penetrometer 31 mm, the cone apex angle of 30° using the expressions for the angle of internal friction,*

*cohesion and shear modulus through deformation modulus obtained in the first stage. As a result of the calculated data approximation, the study obtains a linear dependence to assess the cone index of wetland soil with deformation modulus (as well as a formula for estimating deformation modulus of wetland soil with cone index). The proportionality factor in the resulting dependence equals to 1,1319, compared with previously known experimental value of the coefficient for organic-clay soils (silt), ranging from 0,4 to 4. Basing on the comparison of the results, the paper concludes that, in general, linear relationship, obtained in the paper, is consistent with experimental data published previously.*

**Keywords:** cone index; deformation modulus; waterlogged soils; physical and mechanical properties of soil; contact problem.

### Введение

В зарубежных исследованиях представлено множество моделей для прогноза тягово-сцепных свойств и глубины колеи, полученных при помощи WES-метода.

WES-метод предполагает построение моделей либо по результатам полевых испытаний техники, либо по экспериментальным данным, полученным на модельных стендах.

При этом основной характеристикой почвогрунта является показатель сопротивления вдавливанию конического индентора — конусный индекс (*cone index*), определяемый экспериментально при помощи стандартизованного прибора (пенетromетра) и представляющий собой отношение усилия вдавливания пенетromетра к площади горизонтальной проекции конической части наконечника пенетromетра. Конусный индекс является интегральной характеристикой прочностных свойств почвогрунта.

Результаты экспериментальных замеров тягово-сцепных свойств или глубины колеи аппроксимируют функциями конусного индекса почвогрунта и движителя машины (приведенная нагрузка, геометрические параметры движителя, жесткость). Эти приближенные функции и называются WES-моделями.

У WES-моделей есть очевидные достоинства: они просты в использовании и близки к опытным данным. Но для их построения необходимы обширные, трудоемкие эксперименты. Сугубо эмпирический характер затрудняет анализ и обобщение взаимосвязей факторов, включаемых в модели, и исследуемых показателей процесса взаимодействия движителя машины с почвогрунтом.

В отечественной школе разработан теоретический аппарат, базирующийся на решениях ряда задач о вдавливании штампа (как модели движителя) в деформируемое полупространство (как модели почвогрунта). Теория позволяет учесть как геометрию, так и жесткость штампа, что делает возможными расчеты для шин различной конструкции. В расчетных зависимостях свойства почвогрунта характеризуют несколько показателей — модуль деформации, удельное сцепление, угол внутреннего трения, модуль сдвига, удельный вес, толщину деформируемого слоя.

Теоретические зависимости нуждаются в экспериментальной проверке. Можно предположить, что источником сведений для проверки могут являться WES-модели. Но для этого необходимо соотнести характеристики почвогрунта в рамках двух подходов, т. е. принять зависимость для расчета конусного

индекса по физико-механическим свойствам почвогрунта, используемым в теории.

*Целью настоящей работы* является получение зависимости, связывающей сопротивление заболоченного почвогрунта вдавливанию конического индентора с модулем деформации грунта.

*Материалы и методы исследования.* Результаты исследования получены на базе экспериментальных сведений о физико-механических свойствах заболоченных грунтов и теоретических зависимостей механики контактного взаимодействия. При получении расчетных зависимостей использованы численные методы аппроксимации данных.

**Результаты исследования. Физико-механические свойства заболоченного грунта.** Данные о физико-механических свойствах заболоченных грунтов по [1] представлены в табл. 1.

Таблица 1

Физико-механические свойства заболоченных грунтов

Вид болота	Характеристика дернового покрова	$\varphi, ^\circ$	$C, \text{кПа}$	$E, \text{МПа}$	$G, \text{МПа}$
Моховое	Преобладают сфагновые мхи без кустарника	12–14	5–8	0,26–0,29	0,36–0,43
	Преобладают сфагновые мхи с кустарником	13–16	10–17	0,36–0,43	0,48–0,63
	Преобладают гипновые мхи с кустарником	11–15	8–14	0,29–0,34	0,43–0,57
Травяное	Осоковый покров с развитыми осоковыми кочками	18–20	26–45	1,05–1,58	0,84–1,26
	Осоковый покров с межкочечными понижениями	3–8	4–14	0,14–0,24	0,34–0,57
Лесное	Березово-лесной в межкочечных понижениях	5–7	4–10	0,09–0,14	0,34–0,48
Осушенное	Гипново-осоково-лесной	16–20	30–50	0,65–1,4	0,93–1,38

Данные, представленные в табл. 2, проиллюстрированы графиками на рис. 1–3.

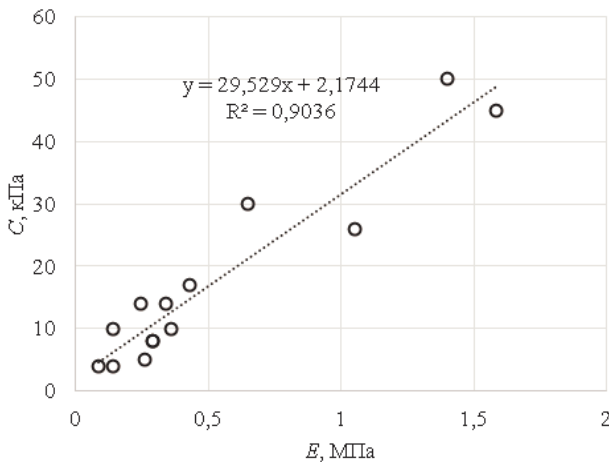


Рис. 1. Зависимость удельного сцепления заболоченного почвогрунта от модуля деформации

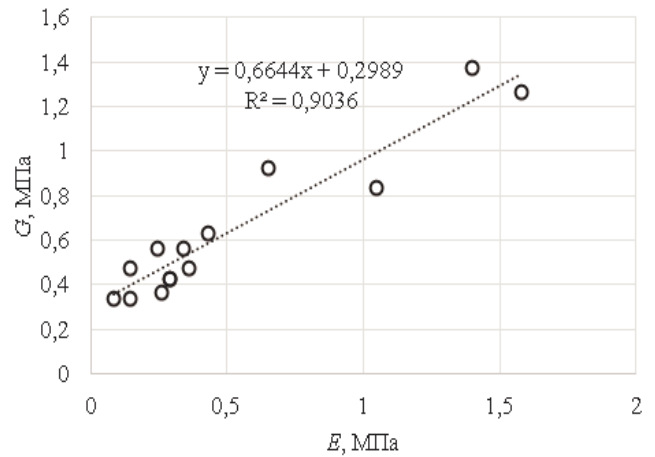


Рис. 3. Зависимость модуля сдвига заболоченного почвогрунта от модуля деформации

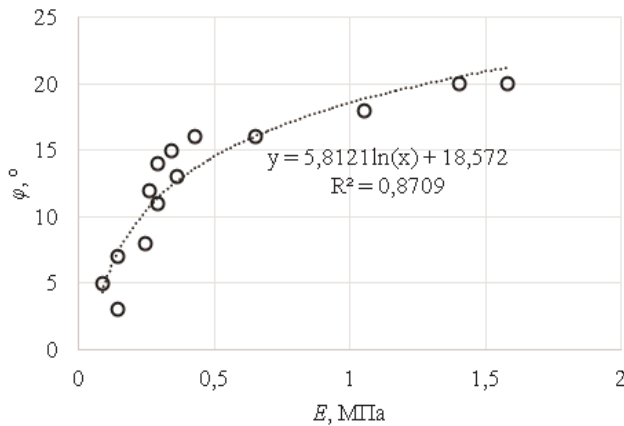


Рис. 2. Зависимость угла внутреннего трения заболоченного почвогрунта от модуля деформации

Величины  $C$  [кПа],  $\varphi$  [°] и  $G$  [МПа] можно с удовлетворительной точностью выразить через модуль деформации  $E$  [МПа] при помощи следующих аппроксимированных зависимостей:

$$C = 29,529E + 2,1744 \quad (1)$$

$$\varphi = 5,812 \ln E + 18,572 \quad (2)$$

$$G = 0,6644E + 0,2989 \quad (3)$$

**Расчет конусного индекса.** Конусный индекс определяется, как правило, опытным путем при помощи специального прибора — стандартного penetromетра, представляющего собой металлический стержень с коническим наконечником (эскиз представлен на рис. 4).

Ручной penetromетр вдавливают на определенную глубину  $Z$  ( $Z \approx 2L$ ), и при помощи индикатора замеряется усилие вдавливания  $F_z$ . Конусный индекс определяется путем деления зарегистрированного значения усилия вдавливания на площадь проекции наконечника на плоскость вдавливания [2].

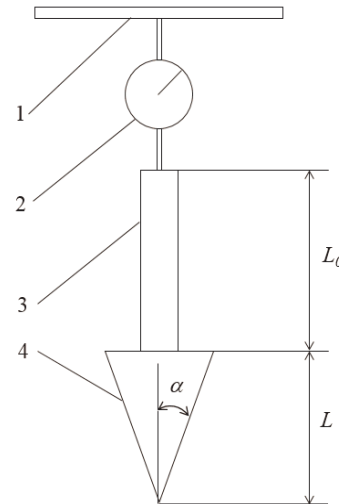


Рис. 4. Эскиз конусного penetromетра: 1 — рукоять; 2 — индикатор усилия вдавливания; 3 — металлический стержень; 4 — металлический наконечник

Геометрические параметры стандартных ручных конусных penetromетров по ГОСТ 19912-2012 и международному стандарту ISO 22476-1 представлены в табл. 2.

Известны работы, например [2], в которых приводятся зависимости для расчета конусного индекса с использованием фундаментальных механических характеристик грунта, а именно угла внутреннего трения, внутреннего сцепления и модуля сдвига.

Таблица 2

Геометрические параметры стандартных ручных конусных penetromетров

Параметр	ГОСТ 19912-2012	ISO 22476-1
$L$	31 мм	1,48 "
$d$	35,7 мм	1,71 "
$\alpha$	30°	30°

В таблице обозначены:  $d$  — диаметр основания конуса;  $L$  — длина конической части penetromетра;  $\alpha$  — угол при вершине конуса.

Расчетная схема процесса вдавливания конуса пенетromетра в грунт представлена на рис. 5.

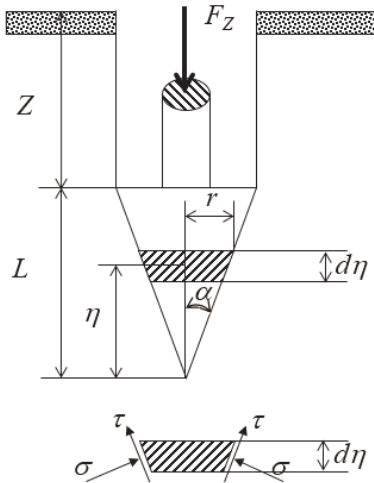


Рис. 5. Расчетная схема процесса вдавливания конусного пенетromетра в грунт

Усилие вдавливания  $F_Z$  определяется по формуле [2, 3]:

$$F_Z = \int_0^L (\sigma \operatorname{tg} \alpha + \tau) \cdot 2\pi \eta \operatorname{tg} \alpha d\eta, \quad (4)$$

где  $\sigma$  — нормальная к плоскости конуса составляющая сопротивления вдавлыванию;  $\tau$  — касательная к плоскости конуса составляющая сопротивления вдавлыванию;  $\eta$  — координата элементарного поперечного сечения конуса.

Нормальная составляющая сопротивления вдавлыванию определяется по формуле [2]:

$$\sigma = 3 \frac{1 + \sin \varphi}{3 - \sin \varphi} (q + C \operatorname{ctg} \varphi) \cdot \left( \frac{G}{C + q \operatorname{tg} \varphi} \right)^{\frac{4 \sin \varphi}{3(1 + \sin \varphi)}} - C \operatorname{ctg} \varphi, \quad (5)$$

$$q = (Z + L - \eta) \cdot \gamma,$$

где  $\gamma$  — объемный вес грунта;  $G$  — модуль сдвига грунта.

Касательная составляющая сопротивления вдавлыванию определяется по формуле [2]:

$$\tau = C + \sigma \operatorname{tg} \varphi \quad (6)$$

Непосредственно конусный индекс  $CI$  рассчитывается при известном значении  $F_Z$  по формуле [2]:

$$CI = \frac{4F_Z}{\pi d^2} \quad (7)$$

Аналитическое выражение для расчета конусного индекса имеет вид [2, 4]:

$$CI = -C \cot \varphi + \Theta \cdot \frac{24G^m (\tan \alpha + \tan \varphi) (1 + \sin \varphi) \tan \alpha}{d^2 \gamma^2 (m - 2)(m - 3)(3 - \sin \varphi) \tan^3 \varphi} \quad (8)$$

$$\Theta = \{C + (Z + L) \cdot \gamma \tan \varphi\}^{3-m} - \{C + Z \cdot \gamma \tan \varphi\}^{2-m} \cdot \{C + (Z + 3L - Lm) \cdot \gamma \tan \varphi\}$$

Ранее зависимость (8) была апробирована и подтверждена экспериментально для глинистых и суглинистых грунтов [2], а также для лесных почвогрунтов [4, 5].

Ранее было показано [4], что удельный вес почвогрунтов  $\gamma$  в расчетах по формуле (8) можно принять постоянной величиной, равной  $14 \text{ кН/м}^3$ , без существенной потери точности.

Результаты расчета конусного индекса по формуле (8), в которой физико-механические свойства почвогрунта выражены по зависимостям (1) – (3), представлены графиком на рис. 6.

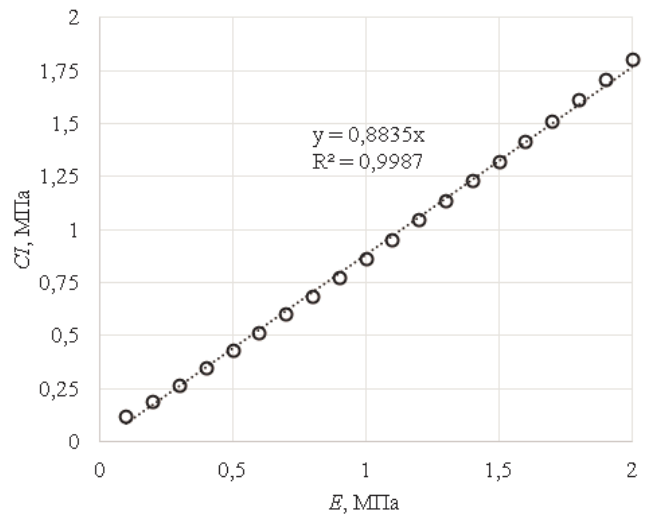


Рис. 6. Зависимость конусного индекса при вдавлывании пенетromетра в заболоченный почвогрунт от модуля деформации

По результатам аппроксимации расчетных данных получим зависимость для оценки конусного индекса по модулю деформации заболоченного почвогрунта:

$$CI = 0,8835 E. \quad (9)$$

Формулу для оценки модуля деформации заболоченного почвогрунта получим, выразив модуль деформации из зависимости (9):

$$E = 1,1319 CI. \quad (10)$$

Отметим, что в работах [6–9] также приводится зависимость для оценки модуля деформации грунта по конусному индексу в виде линейной функции:

$$E = a_K CI \quad (11)$$

Значения коэффициента  $a_K$  в формуле (11) представлены в табл. 3.

Таблица 3

Коэффициент пропорциональности при расчете модуля деформации грунта по конусному индексу [6–9]

Грунты	Сопротивление грунта внедрению конуса $C_I$ , МПа	Коэффициент пропорциональности $a_K$
Суглинки и глины низкой пластичности	< 0,7	3–8
	0,7–2	2–5
	> 2	1–2,5
Суглинки легкие, супеси	< 2	3–6
	> 2	1–3
Суглинки тяжелые, глины высокой пластичности	< 2	2–6
Органоминеральные глинистые грунты	< 1,2	2–8
Торф и органо-минеральные глинистые грунты (илы)	< 0,7	
	50 < W < 100	1,5–4
	100 < W < 200	1–1,5
	W > 200	0,4 – 1

Отметим, что по табл. 3 коэффициент пропорциональности органоминеральных глинистых грунтов (илов) находится в пределах от 0,4 до 4. В нашем случае для заболоченных почвогрунтов расчетным путем получен коэффициент пропорциональности в формуле (10), равный 1,1319, что в целом не противоречит опытным данным, представленным в табл. 3.

Считаем целесообразным проведение в дальнейшем экспериментальных расчетов с целью верификации математических моделей (9), (10).

#### Литература

1. Агейкин Я.С. Проходимость автомобилей. М.: Машиностроение, 1981. 232 с.
2. Rohani B., Baladi G.Y. Correlation of mobility cone index with fundamental engineering properties of soil. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, 1981. 41 p.
3. Vesic A.S. Expansion of Cavities in Infinite Soil Mass // Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. 1972. № 98. 113-123 p.
4. Хитров Е.Г., Григорьев И.В., Хахина А.М. Повышение эффективности трелевки обоснованием показателей работы лесных машин при оперативном контроле свойств почвогрунта. СПб.: СПбГЛТУ, 2015. 146 с.

5. Устинов В.В. Экспериментальные исследования сопротивления почвогрунта при вдавлении конического индентора // Лесотехнический журнал. 2016. Т. 6, № 3 (23). С. 188-196.

6. Зиангиров Р.С. Каширский В.И. Оценка деформационных свойств дисперсных грунтов по данным статического зондирования. Основания, фундаменты и механика грунтов. 2005. № 1. С. 12-16.

7. Sandven N., Senneset K., Janbu N. Interpretation of piezocone tests in cohesive soils. Penetration Testing 1988, ISOPT-1, Rotterdam. P. 939-953.

8. Senneset K., Janbu N., Svano G. Strength and deformation parameters from cone penetration tests. Proceedings of the European Symposium on Penetration Testing. ESOPT – I. Amsterdam, 1982. Vol. 2. P. 863-870.

9. Van Impe W.F. The evaluation deformation and bearing capacity parameters of foundations from static CPT-results // Proc. Fourth Int. Geotechnical seminar // Filed instrumentation and in-site measurements. Singapore, 1986. P. 51-70.

#### References

1. Ageikin Ya.S. Passability of cars. M.: Mashinostroenie, 1981. 232 p.
2. Rohani B., Baladi G.Y. Correlation of mobility cone index with fundamental engineering properties of soil. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, 1981. 41 p.
3. Vesic A.S. Expansion of Cavities in Infinite Soil Mass // Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. 1972. № 98. 113-123 p.
4. Khitrov E.G., Grigor'ev I.V., Khakhina A.M. Improving the efficiency of logging justification performance forest machines in operational control of soil-ground properties. SPb.: SPbGLTU, 2015. 146 p.
5. Ustinov V.V. Experimental studies of soil resistance with indentation of a conical indenter // Lesotekhnicheskii Zhurnal. 2016. Т. 6, № 3 (23). P. 188-196.
6. Zianguirov R.S., Kashirskii V.I. Evaluation of the deformation properties of dispersed soils according to static sensing data // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2005. № 1. P. 12-16.
7. Sandven N., Senneset K., Janbu N. Interpretation of piezocone tests in cohesive soils. Penetration Testing 1988, ISOPT-1, Rotterdam. P. 939-953.
8. Senneset K., Janbu N., Svano G. Strength and deformation parameters from cone penetration tests. Proceedings of the European Symposium on Penetration Testing. ESOPT - I. Amsterdam, 1982. Vol. 2. P. 863-870.
9. Van Impe W.F. The evaluation deformation and bearing capacity parameters of foundations from static CPT-results // Proc. Fourth Int. Geotechnical seminar // Filed instrumentation and in-site measurements. Singapore, 1986. P. 51-70.