

УДК 630.3

DOI: 10.15393/j2.art.2017.3941

Статья

## Исследование связи конусного индекса и модуля деформации различных типов грунтов

Егор Г. Хитров<sup>1\*</sup>, Анна М. Хахина<sup>2</sup>, Владислав А. Лухминский<sup>1</sup> и Денис П. Казаков<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С. М. Кирова, 194021, г. Санкт-Петербург, пер. Институтский, 5;

E-Mails: yegorkhitrov@gmail.com (Е. Х.), vlad1112@yandex.ru (В. Л.), kdp.manage@gmail.com (Д. К.)

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29; E-Mail: hahin@mail.ru (А. Х.)

\* Автор, с которым следует вести переписку; E-Mail: yegorkhitrov@gmail.com (Е. Х.); Tel.: +7(921)4145593.

Получена: 07 ноября 2017 / Принята: 24 декабря 2017 / Опубликовано: 30 декабря 2017

---

**Аннотация:** Разработаны математические модели для прогнозирования модуля деформации связных грунтов (суглинистого, супесчаного, глинистого грунта, лесного и заболоченного почвогрунта) по сопротивлению вдавливанию стандартного конического индентора (конусному индексу). Материалом для исследования служат справочные данные и экспериментальные результаты, полученные независимыми исследователями, а также теоретические зависимости механики контактного взаимодействия. Методы исследования — вычислительный эксперимент и методы аппроксимации расчётных данных. В результате установлены логарифмические зависимости модуля деформации глинистого, суглинистого и супесчаного грунтов от конусного индекса, изменяющегося в пределах от 0,1 до 5 МПа. Разработанные зависимости согласуются с результатами, полученными предыдущими исследователями для связных грунтов, разделённых на категории по прочности (менее 0,7 МПа, 0,7—2 МПа и более 2 МПа). Кроме того, получены линейные зависимости модуля деформации лесного и заболоченного почвогрунтов от конусного индекса, изменяющегося в пределах до 1,5—2 МПа. Результаты расчётов по предлагаемым формулам согласуются с экспериментальными и справочными данными, полученными предыдущими исследователями, для органоминеральных грунтов.

**Ключевые слова:** зондирование, физико-механические свойства грунта, прочностные свойства грунта, конусный индекс, модуль деформации.

---

DOI: 10.15393/j2.art.2017.3941

Article

## Study of relationship between cone index and deformation modulus of various soil types

Egor Khitrov<sup>1,\*</sup>, Anna Khakhina<sup>2</sup>, Vladislav Lukhminskiy<sup>1</sup> and Denis Kazakov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Saint-Petersburg State Forest-Technical University named after S. M. Kirov, 194021, Saint-Petersburg, per. Institutskiy, 5; E-Mails: yegorkhitrov@gmail.com (E. Kh.), vladl1112@yandex.ru (V. L.), kdp.manage@gmail.com (D. K.)

<sup>2</sup> Saint-Petersburg Polytechnic University of Peter the Great, 195251, Saint-Petersburg, Polytekhnicheskaya st., 29; E-Mail: hahin@mail.ru (A. Kh.)

\* Author to whom correspondence should be addressed; E-Mail: yegorkhitrov@gmail.com (E. Kh.);  
Tel.: +7(921)4145593.

*Received: 07 November 2017 / Accepted: 24 December 2017 / Published: 30 December 2017*

---

**Abstract:** The article presents mathematical models used to predict deformation modulus of cohesive soil (loamy, sandy loamy, clayey soil, forest soil and wetland soil) based on the resistance to indentation of a standard conic indenter (cone index). The studied material includes reference data and experimental results obtained by independent researchers, as well as the theoretical formulae of contact mechanics. The research methods are a computational experiment and methods of estimated data approximation. Calculations were performed using Maple 2015 and MS Excel 2013 programs. Logarithmic dependencies of deformation modulus of clay, loamy and sandy loam soil from the cone index were obtained, varying from 0.1 to 5 MPa. The developed dependencies correspond to the results obtained by previous researchers for cohesive soils, divided into categories by the strength (less than 0.7 MPa, 0.7—2 MPa and more than 2 MPa). Moreover, linear dependences of deformation modulus of forest soil and wetland soil on the cone index were obtained, varying within the limits up to 1.5—2 MPa. The results of calculations for the proposed formulae correspond to experimental and reference data obtained by previous researchers for organomineral soils.

**Keywords:** penetrative tests, physical and mechanical properties of soil, strength properties of soil, cone index, deformation modulus.

---

## 1. Введение

В отечественной научной школе разработаны математические модели, предназначенные для теоретической оценки тягово-сцепных свойств, проходимости трелёвочных машин, для прогноза глубины колеи, образующейся при их работе. Для описания свойств поверхностей движения принято пользоваться несколькими характеристиками, одна из важнейших среди них — модуль деформации  $E$ .

С другой стороны, зарубежные учёные предложили математические модели, предназначенные для тех же целей, но полученные на базе результатов полевых испытаний машин. В литературе приняты термины «WES-модели» и «WES-метод», подробнее WES-метод и модели описаны, например, в [1]. Как правило, основной характеристикой поверхности движения в WES-методе является сопротивление грунта вдавливанию конического индентора — конусный индекс  $CI$ . Конусный индекс определяется по стандартизированной процедуре [2].

Ранее высказывалось предположение [3], что WES-модели могут быть использованы для проверки результатов теоретических исследований, поскольку, как отмечено выше, WES-модели основываются на результатах полевых опытов. При этом до определённой степени нет необходимости в трудоёмких экспериментах, поскольку влияние многих параметров движителя (таких как ширина, диаметр колёсного движителя, нагрузка, буксование, жёсткость движителя) на интересующие показатели его взаимодействия с грунтом уже исследованы в рамках WES-метода. Для этого необходимо соотнести характеристики грунта, используемые в теории, с конусным индексом. При возможности проверить и, по потребности, откорректировать теоретические разработки; упрочняется база для дальнейшего развития теории, дополнения теоретических моделей большим числом факторов.

В связи с изложенным полагаем, что решение задачи об оценке физико-механических свойств грунта по результатам пенетрационных испытаний актуально для теории и практики лесоинженерного дела.

Цель настоящей работы — составить математические модели для прогнозирования модуля деформации различных типов грунта по конусному индексу и провести их верификацию.

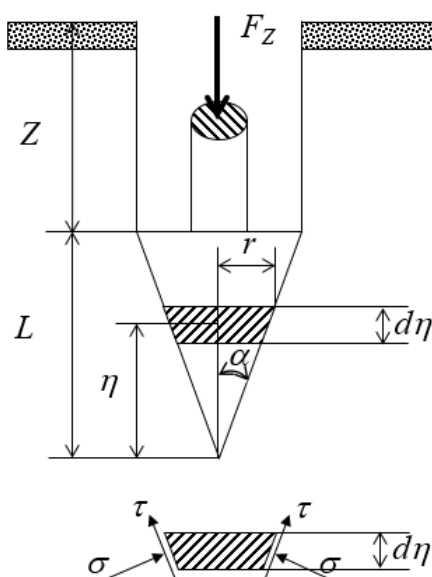
## 2. Материалы и методы

Материалом для исследования служат справочные данные и экспериментальные результаты, полученные независимыми исследователями, а также теоретические зависимости механики контактного взаимодействия.

Методы исследования — вычислительный эксперимент и методы аппроксимации расчётных данных. Для проведения вычислений использованы программы Maple 2015 и MS Excel 2013.

### 3. Результаты

**Теоретическое решение задачи о вдавливании конического индентора в грунт.** Вначале зададимся теоретической зависимостью для оценки конусного индекса. Известны работы [3], [4], в которых приводятся зависимости для расчёта конусного индекса с использованием физико-механических характеристик грунта: угла внутреннего трения  $\varphi$ , удельного сцепления  $C$ , удельного веса  $\gamma$  и модуля сдвига  $G$ . Расчётная схема к решению задачи о вдавливании конического индентора в полупространство представлена на рисунке 1.



**Рисунок 1.** Расчётная схема процесса вдавливания конусного пенетрометра в грунт [4]

Усилие вдавливания  $F_Z$  определяется по формуле (4):

$$F_Z = \int_0^L (\sigma \operatorname{tg} \alpha + \tau) \cdot 2\pi\eta \operatorname{tg} \alpha d\eta \quad (1)$$

где  $\sigma$  — нормальная к плоскости конуса составляющая сопротивления вдавливанию,  $\tau$  — касательная к плоскости конуса составляющая сопротивления вдавливанию,  $\eta$  — координата элементарного поперечного сечения конуса,  $d$  — диаметр основания конуса,  $\alpha$  — угол при вершине конуса.

Нормальная составляющая сопротивления вдавливанию определяется по формуле (2):

$$\sigma = 3 \frac{1 + \sin \varphi}{3 - \sin \varphi} (q + C \operatorname{ctg} \varphi) \cdot \left( \frac{G}{C + q \operatorname{tg} \varphi} \right)^{\frac{4 \sin \varphi}{3(1 + \sin \varphi)}} - C \operatorname{ctg} \varphi \quad (2)$$

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

где  $C$  — удельное сцепление грунта,  $\varphi$  — угол внутреннего трения грунта,  $\gamma$  — объёмный вес грунта,  $G$  — модуль сдвига грунта,  $L$  — длина конической части индентора,  $Z$  — расстояние от поверхности грунта до начала конической части индентора.

Касательная составляющая сопротивления вдавливанию определяется по формуле (3):

$$\tau = C + \sigma \operatorname{tg} \varphi \quad (3)$$

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

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

Аналитическое выражение для расчёта конусного индекса следующее [3], [4]:

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

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

$$m = \frac{4 \sin \varphi}{3(1 + \sin \varphi)} \quad (5)$$

Формулу (5) используем для последующих вычислений. Ранее было показано, что значение удельного веса грунта практически не влияет на результаты расчётов по формуле (5) и его можно считать постоянной величиной [3]. Тогда, дополнительно необходимы три величины: удельное сцепление, угол внутреннего трения и модуль сдвига.

**Физико-механические свойства грунтов.** В работе [6] проведён анализ справочных данных по физико-механическим свойствам различных типов грунта. В результате для приближённой оценки модуля деформации  $E$ , внутреннего сцепления  $C$  и угла внутреннего трения  $\varphi$  связных грунтов получены следующие общие формулы:

$$E = (A_{aE} + B_{aE} I_L) \cdot e^{(A_{bE} + B_{bE} I_L)} \quad (6)$$

$$C = (A_{ac} + B_{ac}I_L) \cdot e^{(A_{bc} + B_{bc}I_L)}, \quad (7)$$

$$\varphi = (A_{a\varphi} + B_{a\varphi}I_L) \cdot e^{(A_{b\varphi} + B_{b\varphi}I_L)}, \quad (8)$$

где  $A_{aE}$ ,  $B_{aE}$ ,  $A_{bE}$ ,  $B_{bE}$ ,  $A_{ac}$ ,  $B_{ac}$ ,  $A_{bc}$ ,  $B_{bc}$ ,  $A_{a\varphi}$ ,  $B_{a\varphi}$ ,  $A_{b\varphi}$ ,  $B_{b\varphi}$  — числовые коэффициенты (представлены в таблицах 1—3),  $I_L$  — показатель текучести, характеризующий консистенцию грунта,  $e$  — коэффициент пористости грунта.

**Таблица 1.** Коэффициенты для расчёта угла внутреннего трения [6]

Тип грунта	$A_{a\varphi}$	$B_{a\varphi}$	$A_{b\varphi}$	$B_{b\varphi}$
Супесь	22,496	-7,808	-0,390	-0,250
Суглинок	21,128	-11,793	-0,315	-0,722
Глина	16,887	-11,977	-0,204	-2,506

**Таблица 2.** Коэффициенты для расчёта внутреннего сцепления [6]

Тип грунта	$A_{ac}$	$B_{ac}$	$A_{bc}$	$B_{bc}$
Супесь	4,586	-3,775	-1,475	-1,118
Суглинок	19,239	-14,366	-1,204	-0,647
Глина	42,573	-19,656	-1,136	-0,220

**Таблица 3.** Коэффициенты для расчёта модуля деформации [6]

Тип грунта	$A_{aE}$	$B_{aE}$	$A_{bE}$	$B_{bE}$
Супесь	10,670	-7,273	-1,524	-0,974
Суглинок	11,366	-7,575	-1,403	-1,089
Глина	15,217	-10,679	-0,969	-1,975

Формулы (6)—(8) следует использовать при  $I_L$  и  $e$  в пределах, указанных в таблице 4.

**Таблица 4.** Пределы изменения показателя текучести и коэффициента пористости при расчёте физико-механических свойств по формулам (6)—(8) [3]

Тип грунта	$I_L$	$e$
Супесь	-1 ... 1	0,6 ... 1,4
Суглинок	-0,4 ... 1	0,6 ... 1,4
Глина	0 ... 1	0,7 ... 1,4

Модуль сдвига оценим по формуле (9):

$$G = \frac{5E}{2 \cdot (1 + \nu)}, \quad (9)$$

где  $\nu$  — коэффициент Пуассона, который для связных грунтов примем равным 0,3 [6].

Заметим, что в формуле (9) модуль деформации взят со множителем «5». Это связано с тем, что модуль сдвига рассчитывают по величине модуля упругости  $E_0$ , который, в свою очередь, приблизительно в пять раз больше по значению модуля общей деформации [3].

Два последних допущения оправданы, помимо рекомендаций литературных источников, тем, что значение конусного индекса не столь чувствительно к изменению модуля сдвига, и некоторая погрешность в его оценке представляется допустимой [4].

В лесоинженерном деле была разработана и апробирована классификация лесных грунтов [3], представленная в таблице 5.

**Таблица 5.** Классификация лесных почвогрунтов по физико-механическим свойствам [3]

Параметры	Категории лесного почвогрунта		
	III (слабый)	II (нормальный)	I (прочный)
$E$ , МПа	0,4	1	3
$G$ , МПа	0,74	1,99	6,53
$C$ , кПа	5	12	24
$\varphi$ , °	11	15	16

Таблицу 5 принято дополнять формулами, позволяющими выразить через модуль деформации прочие физико-механические свойства почвогрунта (размерности величин соответствуют указанным в таблице 5) [3]:

$$G = 1,9937E^{1,0798} \quad (10)$$

$$C = 10,774E^{0,7737} \quad (11)$$

$$\varphi = 13,669E^{0,1818} \quad (12)$$

Заметим, что трелёвочная техника работает и на слабонесущих грунтах. Общее представление о свойствах слабонесущих заболоченных грунтов дают сведения таблицы 6.

**Таблица 6.** Физико-механические свойства заболоченных грунтов [7]

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	Берёзово-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

Величины  $C$ ,  $\varphi$ ,  $G$  можно с удовлетворительной точностью выразить через модуль деформации  $E$  при помощи следующих приближённых зависимостей (размерности величин соответствуют указанным в таблице 5):

$$C = 29,529E + 2,1744 \quad (13)$$

$$\varphi = 5,8121 \ln E + 18,572 \quad (14)$$

$$G = 0,6644E + 0,2989 \quad (15)$$

Таким образом, для трёх групп грунтовых условий выбраны комплекты зависимостей для оценки физико-механических свойств.

**Результаты расчётов.** Проведём вычислительный эксперимент с использованием формул (6)—(9), (5). Подход применим следующий: в диапазонах, указанных в таблице 4, для каждого из трёх типов грунтов (супесь, суглинок, глина) сгенерировано по 1000 случайных значений коэффициента пористости и показателя консистенции. Значения распределены по закону равной плотности. Далее, для этих же значений рассчитаны  $E$ ,  $C$ ,  $\varphi$ ,  $G$ ,  $CI$  по формулам (6)—(9), (5) соответственно. После этого при помощи метода наименьших



квадратов полученные значения  $E$  выражены через расчётные значения  $CI$ . Результаты аппроксимации представлены в таблице 7.

Кроме того, по формулам (10)—(12), (5) и (13)—(15), (5) для лесного и заболоченного грунта соответственно проведены вычисления  $CI$  при варьировании  $E$  с шагом 0,25 МПа в пределах от 0 до 3 МПа для лесного почвогрунта и от 0 до 2 МПа для заболоченного грунта. Результаты расчётов также обработаны при помощи метода наименьших, получены следующие зависимости:

$$E = 12,151 + 5,240 \ln CI \quad (16)$$

(для супеси),

$$E = 8,914 + 5,019 \ln CI \quad (17)$$

(для суглинка),

$$E = 7,583 + 7,521 \ln CI \quad (18)$$

(для глины),

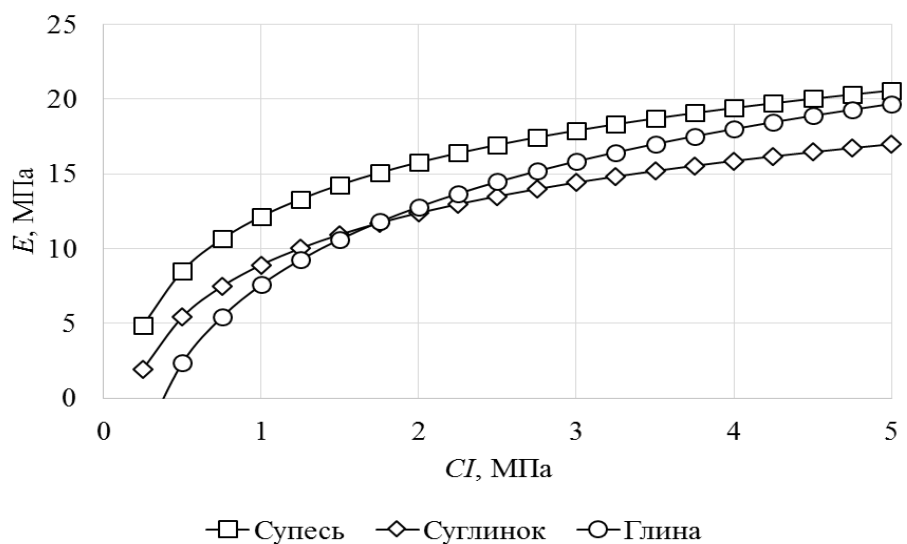
$$E = 2,4713CI \quad (19)$$

(для лесного почвогрунта),

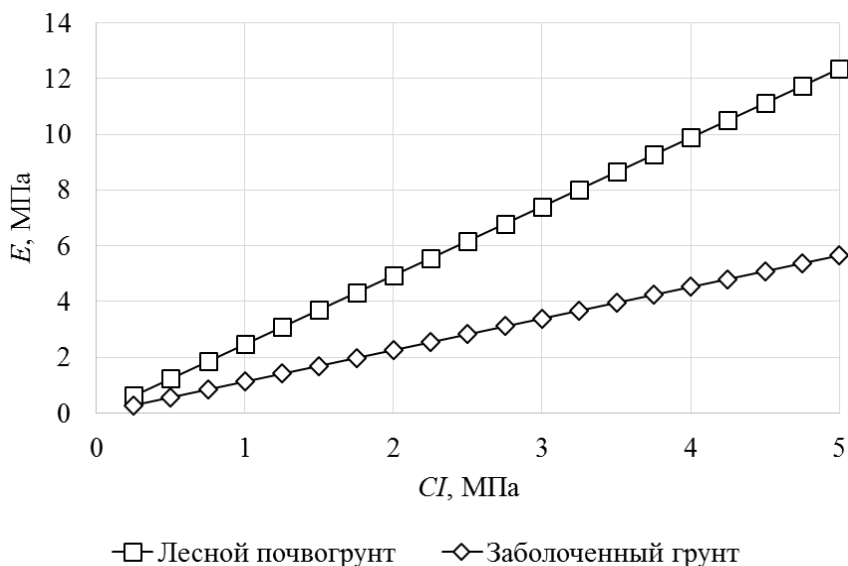
$$E = 1,1315CI \quad (20)$$

(для заболоченного грунта).

Формулы (16)—(20) проиллюстрированы графиками на рисунках 2 и 3 соответственно.



**Рисунок 2.** Зависимости модуля деформации супеси, суглинка и глины от конусного индекса.



**Рисунок 3.** Зависимости модуля деформации лесного почвогрунта и заболоченного грунта от конусного индекса

#### 4. Обсуждение и заключение

Сопоставим полученные результаты с данными, полученными предыдущими исследователями.

Предложенные зарубежными учёными зависимости для оценки компрессионного модуля деформации грунтов в общем виде могут быть представлены следующим выражением:

$$E_k = \alpha \cdot CI, \quad (21)$$

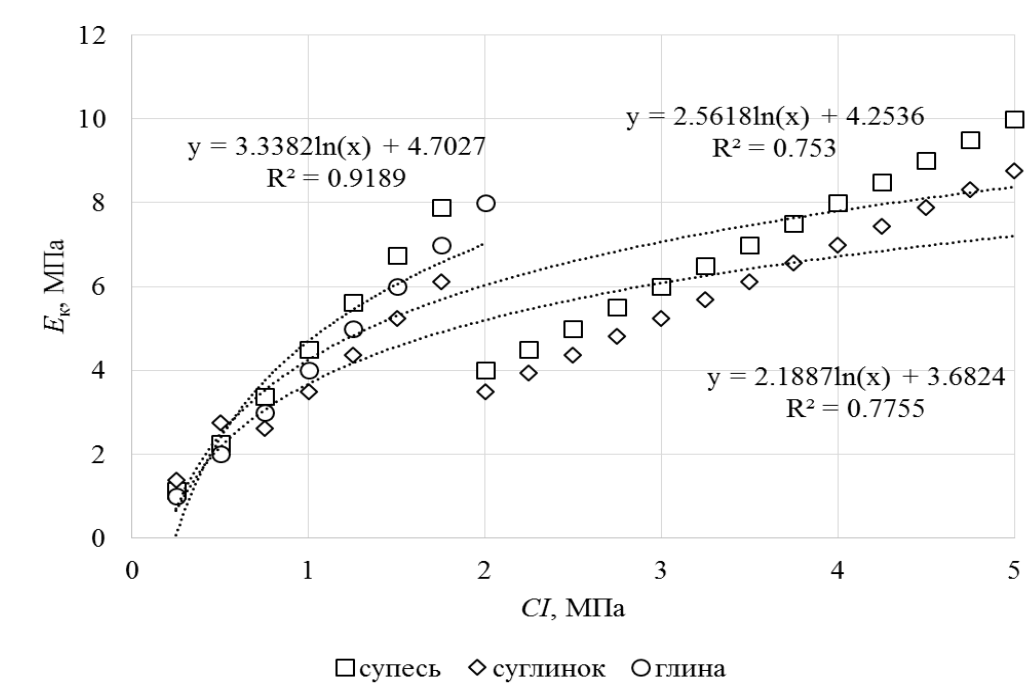
где  $\alpha$  — коэффициент пропорциональности, значения которого представлены в таблице 7 для различных типов грунтов.

**Таблица 7.** Коэффициент пропорциональности при расчёте компрессионного модуля деформации грунта по конусному индексу [8—10]

Грунты	$CI$ , МПа	Коэффициент пропорциональности $a_k$
Суглинки и глины низкой пластичности	$< 0,7$	3—8
	0,7—2	2—5
	$> 2$	1—2,5
Суглинки лёгкие, супеси	$< 2$	3—6
	$> 2$	1—3
Суглинки тяжёлые, глины высокой пластичности	$< 2$	2—6
Органоминеральные глинистые грунты	$< 1,2$	2—8
Торф и органоминеральные глинистые грунты	$50 < W < 100$	1,5—4
	$100 < W < 200$	1—1,5
	$W > 200$	0,4—1

Анализ табличных данных показывает, что коэффициент пропорциональности изменяется в широких пределах, разнится в 2—3 раза, даже для одного типа грунта. Кроме того, коэффициент пропорциональности зависит от конусного индекса (характеризующего прочность грунта).

Зададимся целью получить приближённые зависимости, более удобные для сравнения в нашем исследовании. Подход заключается в следующем: рассчитаем значения коэффициента пропорциональности как средние арифметические верхних и нижних границ интервалов его изменения в соответствии с таблицей 8 с шагом по  $CI$  0,25 МПа. Далее, по формуле (21) оценим значения компрессионного модуля  $E_k$ . Расчётные данные аппроксимируем при помощи метода наименьших квадратов. Результаты представлены на рисунке 4 (для построения ряда «супесь» на рисунке 4 использованы данные графы «Суглинки лёгкие, супеси» таблицы 4, для ряда «суглинок» — данные графы «Суглинки и глины низкой пластичности», для ряда «глина» — данные графы «Суглинки тяжёлые, глины высокой пластичности»).



**Рисунок 4.** Аппроксимация табличных данных о зависимости компрессионного модуля деформации от конусного индекса

Итак, для оценки компрессионного модуля деформации супеси, суглинка и глины получим следующие приближённые зависимости:

$$E_k = 4,2536 + 2,5618 \ln CI \quad (22)$$

$$E_k = 3,6824 + 2,1887 \ln CI \quad (23)$$

$$E_k = 4,7027 + 3,3382 \ln CI \quad (24)$$

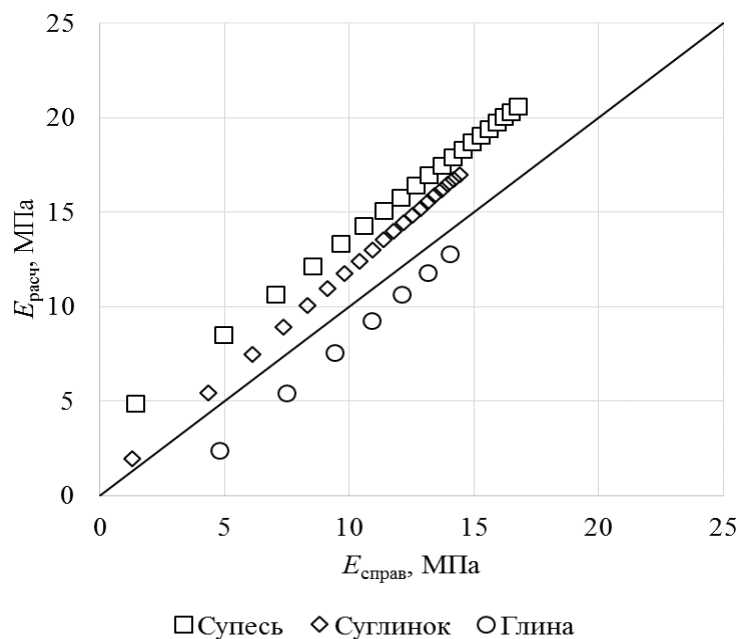
Для перевода оценок компрессионного модуля деформации в оценки штампового модуля деформации воспользуемся общей формулой:

$$E = m \cdot E_k \quad (25)$$

где  $m$  — коэффициент перевода.

В специальной литературе приводятся сведения о значениях коэффициента  $m$ , который зависит от многих факторов (типа грунта, его температуры, консистенции, параметров штампа). Примем значения коэффициента  $m$  равными 2, 4, 2 для супеси, суглинка и глины

соответственно (опираемся на сведения [11]). Тогда, воспользовавшись формулой (25), можем сопоставить результаты [8—10] с полученными нами данными (рисунок 5).



**Рисунок 5.** Сопоставление расчётных и справочных значений модуля деформации супеси, суглинка и глины

Заметим, что предлагаемые формулы (16)—(18) нелинейны. Коэффициенты в таблице 4 переменны и зависят от диапазона, в котором находится значение конусного индекса, снижаясь с возрастанием значения  $CI$ . Этот же характер связи отражают и модели (16)—(18).

Зависимости (19), (20) для лесного и заболоченного грунтов получены в виде линейных функций, в которых модуль деформации пропорционален конусному индексу, коэффициенты пропорциональности равны 2,4713 и 1,1315 соответственно. В таблице 4 приводятся значения коэффициента пропорциональности от 2 до 8 для органоминерального глинистого грунта и от 0,5 до 4 для торфа. При переводе компрессионного модуля в штамповый с коэффициентом перевода 2—3 вновь придём к заключению, что полученные оценки не противоречат табличным данным.

В отечественной литературе представлены зависимости для оценки модуля деформации (штампового), полученные по результатам пенетрационных испытаний [12—14]. Модели представлены линейными функциями, в которых коэффициент при переменной величине  $CI$  варьируется в пределах от 2 до 8, свободный член уравнений находится в диапазоне от 0 до 8. В частности, для супесчаных грунтов предложена зависимость [12—14]:

$$E = 3,1CI + 7,7 \quad (26)$$

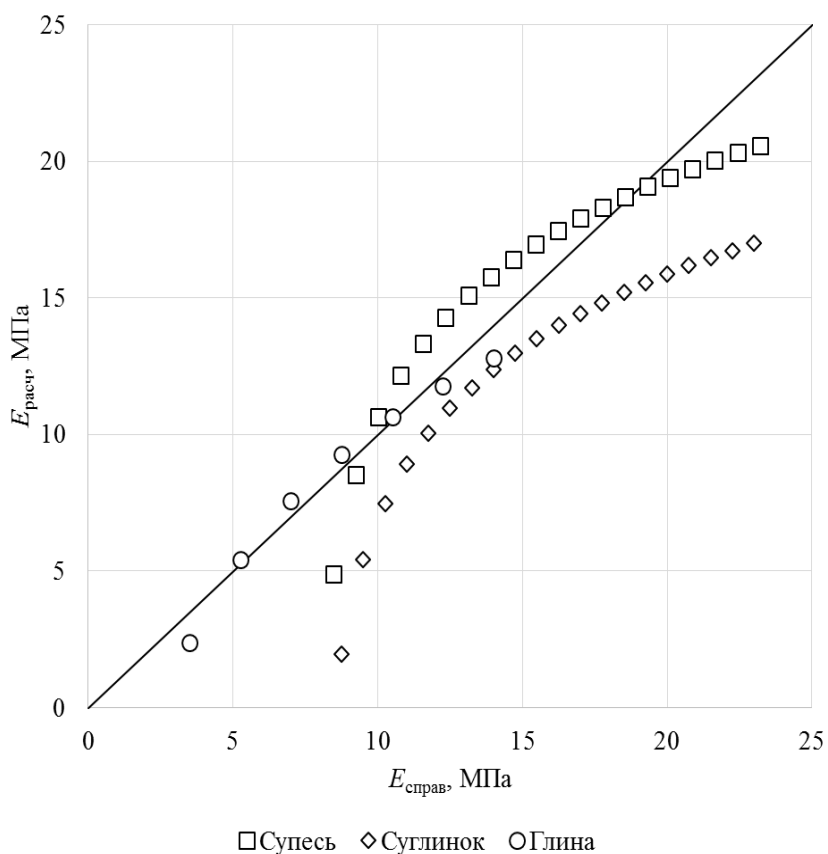
Для суглинков известна формула [12—14]:

$$E = 3CI + 8 \quad (27)$$

Для глины [12—14]:

$$E = 7CI \quad (28)$$

Результаты расчётов по формулам (26)—(28) сопоставлены с данными, полученными по предлагаемым моделям (16)—(18), на рисунке 6.



**Рисунок 6.** Сопоставление расчётных и справочных значений модуля деформации суглеси, суглинка и глины

Как и в предыдущем случае, полагаем, что оценки, рассчитанные по предлагаемым нами формулам, согласуются со справочными данными.

## Список литературы

1. *Saarilahti, M.* Development of a protocol for ecoefficient wood harvesting on sensitive sites (Ecowood). Evaluation of the WES-method in assessing the trafficability of terrain and the mobility of forest tractors / M. Saarilahti ; University of Helsinki, Department of Forest Resource Management, 2002. 28 p.
2. ISO 22476-1:2012. Geotechnical investigation and testing. — Field testing. — Part 1: Electrical cone and piezocone penetration test.
3. *Хитров, Е. Г.* Повышение эффективности трелёвки обоснованием показателей работы лесных машин при оперативном контроле свойств почвогрунта / Е. Г. Хитров, И. В. Григорьев, А. М. Хахина. — Санкт-Петербург : ЛГУ, 2015. — 146 с.
4. *Rohani, B.* Correlation of mobility cone index with fundamental engineering properties of soil / B. Rohani, G. Y. Baladi. — U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station, 1981 — 41 p.
5. *Vesic, A. S.* Expansion of Cavities in Infinite Soil Mass / A. S. Vesic // Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. — 1972. — № 98. — P. 113—123.
6. *Ларин, В. В.* Методы прогнозирования опорной проходимости многоосных колёсных машин на местности : дис. д-ра техн. наук: 05.05.03 / Ларин В. В. — Москва, 2007. — 530 с.
7. *Агейкин, Я. С.* Проходимость автомобилей / Я. С. Агейкин. — Москва : Машиностроение, 1981. — 232 с.
8. *Van Impe, W. F.* The evaluation deformation and bearing capacity parameters of foundations from static CPT-results / W. F. Van Impe // Proc. Fourth Int. Geotechnical seminar / Filed instrumentation and in-site measurements. — Singapore, 1986. — P. 51—70.
9. *Senneset, K.* Strength and de-formation parameters from cone penetration tests / K. Senneset, N. Janbu, G. Svano // Proceedings of the European Symposium on Penetration Testing. ESOPT — II. — Amsterdam. — 1982. — Vol. 2. — P. 863—870.
10. *Sandven.* Interpretation of piezocone tests in cohesive soils / Sandven, K. Senneset, N. Janbu // Penetration Testing 1988, ISOPT — 1. — Rotterdam. — P. 939—953.
11. *Бусел, И. А.* Прогнозирование строительных свойств грунтов / И. А. Бусел. — Минск : Наука и техника, 1989. — 246 с.
12. *Зиангиров, Р. С.* Оценка деформационных свойств дисперсных грунтов по данным статического зондирования / Р. С. Зиангиров, В. И. Каширский // Основания, фундаменты и механика грунтов. — 2005. — № 1. — С. 12—16.
13. МГСН 2.07-01. Основания, фундаменты и подземные сооружения. — Москва : ГУП «НИАЦ», 2002.
14. *Трофименков, Ю. Г.* Статическое зондирование грунтов в строительстве (зарубежный опыт) / Ю. Г. Трофименков. — Москва : ВНИ — ИНТПИ, 1995. — 128 с.

## References

1. *Saarilahti, M.* Development of a protocol for ecoefficient wood harvesting on sensitive sites (Ecowood). Evaluation of the WES-method in assessing the traffic capacity of terrain and the mobility of forest tractors / M. Saarilahti ; University of Helsinki, Department of Forest Resource Management, 2002. — 28 p.
2. ISO 22476-1: 2012. Geotechnical investigation and testing. — Field testing. — Part 1: Electrical cone and piezocone penetration test.

3. *Khitrov, E. G.* Improving performance of forestry machines with in situ control forest soils' properties / E. G. Khitrov, I. V. Grigor'ev, A. M. Khakhina. — Saint-Petersburg, 2015. — 146 p.
4. *Rohani, B.* Correlation of mobility / B. Rohani, G. Y. Baladi. — U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station, 1981. — 41 p.
5. *Vesic, A. S.* Expansion of Cavities in Infinite Soil Mass / A. S. Vesic // Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. — 1972. — No. 98. — P. 113—123.
6. *Larin, V. V.* Prognosis methods for cross-country flotation of multiwheeler: Technical sciences doctoral thesis: 05.05.03 / Larin V. V. — Moskva, 2007. — 530 p.
7. *Ageikin, Ya. S.* Machine cross-country ability / Ya. S. Ageikin. — Moskva : Mashinostroenie, 1972. — 184 p.
8. *Van Impe, W. F.* CPT-results / W. F. Van Impe // Proc. Fourth Int. Geotechnical seminar / Filed instrumentation and in-site measurements. — Singapine, 1986. — P. 51—70.
9. *Senneset, K.* Strength and de-formation parameters from cone penetration tests / K. Senneset, N. Janbu, G. Svano // Proceedings of the European Symposium on Penetration Testing. ESOPT — II. — Amsterdam, 1982. — Vol. 2. — P. 863—870.
10. *Sandven.* Interpretation of piezocone tests in cohesive soils / Sandven, K. Senneset, N. Janbu // Penetration Testing 1988, ISOPT — 1. — Rotterdam. — P. 939—953.
11. *Busel, I. A.* Forecasting properties of soils in construction works / I. A. Busel. — Minsk : Nauka i tekhnika, 1989. — 246 p.
12. *Ziangirov, R. S.* Evaluation of the deformation properties of disperse soils according to static sounding data / R. S. Ziangirov, V. I. Kashirsky // Grounds, foundations and mechanics of soils. — 2005. — № 1. — P. 12—16.
13. MGSN 2.07-01. Foundations and underground structures. — Moskva : GUP «NIAC», 2002.
14. *Trofimenkov, Yu. G.* Static sounding of soils in construction (foreign experience) / Yu. G. Trofimenkov. — Moskva : VNI-INTPI, 1995. — 128 p.