

Е.Г. Хитров, Е.В. Котенев, А.В. Андронов, Г.С. Тарадин, В.Е. Божбов

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СВЯЗНОГО ГРУНТА ПО КОНУСНОМУ ИНДЕКСУ И МЕХАНИЧЕСКИМ СВОЙСТВАМ

Введение. Для теоретической оценки тягово-сцепных свойств движителей и глубины колеи, образующейся под воздействием лесных машин, предложены математические модели, базирующиеся на положениях механики контактного взаимодействия [Хитров и др., 2015]. Движитель принято представлять штампом, вдавливаемым в деформируемый массив с определенными физико-механическими свойствами [Хитров и др., 2015]. Известно, что по мере увеличения давления штампа-двигателя в массиве грунта развиваются не только нормальные, но и касательные напряжения [Агейкин, 1981]. Как следствие, происходят сдвиги слоёв грунта, зависимость осадки штампа-двигателя от нагрузки приобретает ярко выраженный нелинейный характер. Это явление называют потерей несущей способности грунта. Для оценки осадки штампа с учетом потери несущей способности предложена следующая формула [Агейкин, 1981]:

$$h = h_L \frac{p_S}{p_S - p}, \quad (1)$$

где h – осадка штампа; h_L – деформация сжатия грунта; p_S – несущая способность грунта; p – давление на грунт со стороны штампа.

Величину несущей способности грунта определяют как экспериментально, так и теоретически [Агейкин, 1981; Дмитриева и др., 2017]. Для теоретического расчета несущей способности в отечественной научной школе разработан и апробирован на практике подход, позволяющий учесть параметры штампа-двигателя и физико-механические свойства грунта, характеризующие, в основном, его сопротивление сдвигу [Ларин, 2007]. Вопрос оценки несущей способности по значениям модуля деформации и сопротивления вдавливанию конического индентора (конусного индекса) изучен не в полной мере, хотя именно эти величины используются в расчете деформации сжатия грунта.

Методика исследования. Цель данного исследования – выявить взаимосвязи физико-механических свойств, конусного индекса и несущей способности различных типов грунта. Материал для исследования – справочные дан-

ные и теоретические формулы для расчета несущей способности и физико-механических свойств грунта. Методы исследования – вычислительный эксперимент, аппроксимация расчетных данных, метод наименьших квадратов.

Несущая способность связного грунта рассчитывается по уравнению [Ларин, 2007]

$$p_S = p_{S0}\alpha_Z, \quad (2)$$

где p_{S0} – несущая способность массива грунта неограниченной толщины; α_Z – коэффициент учета мощности слоя грунта.

Несущая способность массива грунта, толщина которого не ограничена, определяется по уравнению [Ларин, 2007]

$$p_{S0} = 0,5K_1B_1N_1\gamma b + N_2\gamma h + K_3B_3N_3C, \quad (3)$$

где K_1, K_3 – коэффициенты учета геометрии штампа; N_1, N_2, N_3, S – коэффициенты, учитывающие внутреннее трение грунта; C – удельное сцепление грунта; γ – объемный вес грунта; B_1, B_3 – коэффициенты, учитывающие угол приложения внешней нагрузки.

Уравнения для расчета K_1, K_3 [Ларин, 2007]:

$$K_1 = \frac{l}{l + 0,4b}, \quad (4)$$

$$K_3 = \frac{l + b}{l + 0,5b}. \quad (5)$$

Уравнения для расчета N_1, N_2, N_3, S [Ларин, 2007]:

$$N_1 = \frac{1 - S^4}{S^5}, \quad (6)$$

$$N_2 = \frac{1}{S^2}, \quad (7)$$

$$N_3 = \frac{2(1 + S^2)}{S^3}, \quad (8)$$

$$S = \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right). \quad (9)$$

Уравнения для расчета $K_{\beta 1}, K_{\beta 2}$ [Ларин, 2007]:

$$B_1 = \frac{\pi - 4\beta \operatorname{tg} \varphi}{\pi + 4\beta \operatorname{tg} \varphi}, \quad (10)$$

$$B_2 = \frac{3\pi - 2\beta}{3\pi + 2\beta}, \quad (11)$$

где β – угол, на который нагрузка отклоняется от нормали к поверхности грунта.

Коэффициент учета мощности слоя грунта находится по уравнению [Ларин, 2007]

$$\alpha_z = 1 + \frac{H^* h}{2H(H - h - 0,25H^*)}, \quad (12)$$

где H^* – вспомогательная величина,

$$H^* = \frac{\sqrt{2}}{2} \exp \left[\left(\frac{\pi}{4} + \frac{3\varphi}{4} \right) \operatorname{tg} \frac{3\varphi}{4} \right] b \cos \frac{3\varphi}{4} \operatorname{tg} \varphi. \quad (13)$$

Обратим внимание, что по формулам (2)–(13) несущая способность является функцией восьми переменных: удельного сцепления C , угла внутреннего трения φ , удельного веса γ , мощности деформируемого слоя H , ширины b и длины l штампа, осадки h и угла отклонения β . При неограниченной толщине (мощности) деформируемого слоя грунта несущая способность находится при $H \rightarrow \infty$.

Результаты исследования. Вначале исследуем влияние указанных переменных на несущую способность. Для этого проведем расчеты по формулам (2)–(13) при варьировании переменных в следующих пределах: $C \in [0,001 \text{ МПа}; 0,025 \text{ МПа}]$, $\varphi \in [1^\circ; 30^\circ]$, $\gamma \in [15 \text{ кН}; 25 \text{ кН}]$, $H \in [0,25 \text{ м}; 0,75 \text{ м}]$, $b \in [0,6 \text{ м}; 0,8 \text{ м}]$, $l \in [1 \text{ м}; 1,5 \text{ м}]$, $h \in [0,05 \text{ м}; 0,25 \text{ м}]$, $\beta \in [0^\circ; 30^\circ]$ (при расчете несущей способности грунта с неограниченной толщиной деформируемого слоя значение H принимали постоянным $H \rightarrow \infty$).

Обработка расчетных данных показывает, что несущую способность грунта p_S [МПа] с ограниченной толщиной деформируемого слоя можно выразить по следующей приближенной формуле ($R^2 = 0,9472$):

$$p_S = 4,24C^{0,987}\varphi^{0,340}\gamma^{0,103}H^{-0,146}b^{0,254}l^{0,230}h^{0,0460}\beta^{0,0491}. \quad (14)$$

Несущую способность грунта с неограниченной толщиной деформируемого слоя можно найти по приближенной зависимости ($R^2 = 0,9640$):

$$p_S = 4,46C^{0,978}\varphi^{0,287}\gamma^{0,0427}b^{0,126}l^{0,0907}h^{0,000954}\beta^{0,0575}. \quad (15)$$

После исключения переменных, влияние которых на значение несущей способности выражено слабо, приходим к более простой зависимости, рекомендуемой нами для практических расчетов ($R^2 = 0,9260$):

$$p_S = 4,2C\sqrt[3]{\varphi}. \quad (16)$$

Размерности величин в формулах (14)–(16) соответствуют указанным выше.

Далее установим взаимосвязи модуля деформации, конусного индекса и несущей способности грунта. Рассмотрим пять типов связных грунтов, на которых чаще всего работают лесные машины: лесной почвогрунт, заболоченный почвогрунт, супесь, суглинок, глина.

Для лесного почвогрунта известны следующие взаимосвязи C [кПа], φ [°], γ [кН/м³], H [м], G [МПа] и E [МПа] [Григорьев, 2006, 2008]:

$$C = 10,774E^{0,7737}, \quad (17)$$

$$\varphi = 13,669E^{0,1818}, \quad (18)$$

$$\gamma = 8,4008E^{0,1168}, \quad (19)$$

$$H = 0,4714E^{-0,479}, \quad (20)$$

$$G = 1,9937E^{1,0798}. \quad (21)$$

Для заболоченного грунта установлены следующие взаимосвязи C [кПа], φ [°], G [МПа] и E [МПа] [Дмитриева и др., 2017]:

$$C = 29,529E + 2,1744, \quad (22)$$

$$\varphi = 5,8121 \ln E + 18,572, \quad (23)$$

$$G = 0,6644 E + 0,2989. \quad (24)$$

Для супеси, суглинка и глины предложены следующие формулы, позволяющие рассчитать значения C [МПа], φ [°], G [МПа], E [МПа] по индексу консистенции I_L и коэффициенту пористости e [Ларин, 2007]:

$$E = (A_{aE} + B_{aE}I_L)e^{(A_{bE} + B_{bE}I_L)}, \quad (25)$$

$$C = (A_{aC} + B_{aC}I_L)e^{(A_{bC} + B_{bC}I_L)}, \quad (26)$$

$$\varphi = (A_{a\varphi} + B_{a\varphi}I_L)e^{(A_{b\varphi} + B_{b\varphi}I_L)}, \quad (27)$$

$$G = \frac{5E}{2(1 + \nu)}, \quad (28)$$

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 табл/ 1 по [Ларин, 2007])\$ ν – коэффициент Пуассона.

Таблица 1

Коэффициенты для расчета свойств грунта по формулам (25)–(27)
[Ларин, 2007]

Coefficients for calculating the soil properties with formulae (25)–(27)

Тип грунта	Коэффициенты ($\times 10^4$)			
	A_{aE}	B_{aE}	A_{bE}	B_{bE}
Супесь	106700	-72730	-15240	-9740
Суглинок	113660	-75750	-14030	-10890
Глина	152170	-106790	-9690	-19750
	A_{aC}	B_{aC}	A_{bC}	B_{bC}
Супесь	45,86	-37,8	-14750	-11180
Суглинок	192,39	-143,7	-12040	-6470
Глина	425,73	-196,6	-11360	-2200
	$A_{a\varphi}$	$B_{a\varphi}$	$A_{b\varphi}$	$B_{b\varphi}$
Супесь	224960	-78080	-3900	-2500
Суглинок	211280	-117930	-3150	-7220
Глина	168870	-119770	-2040	-25060

Для расчета конусного индекса всех указанных типов грунта получено и апробировано следующее аналитическое выражение [Rohani & Baladi, 1981; Vesic, 1972]:

$$CI = -C \operatorname{ctg} \varphi + \Theta \cdot \frac{24G^m (\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \varphi)(1 + \sin \varphi) \operatorname{tg} \alpha}{d^2 \gamma^2 (m-2)(m-3)(3 - \sin \varphi) \operatorname{tg}^3 \varphi}, \quad (29)$$

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

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

где L – длина конической части индентора (0,031 м) [Хитров, 2014]; Z – расстояние от поверхности грунта до начала конической части индентора ($2L$) [Хитров, 2014]; d – диаметр основания конуса (0,0357 мм) [Хитров, 2014]; α – угол при вершине конуса (30°) [Хитров, 2014].

Для лесного почвогрунта p_s рассчитаем по формулам (2)–(13), (17)–(20), CI рассчитаем по формулам (17)–(19), (21), (29). Переменными величинами будут $E \in [0,4 \text{ МПа}; 3 \text{ МПа}]$, $b \in [0,6 \text{ м}; 0,8 \text{ м}]$, $l \in [1 \text{ м}; 1,5 \text{ м}]$,

$h \in [0,05 \text{ м}; 0,25 \text{ м}]$, $\beta \in [0^\circ; 30^\circ]$. Диапазоны изменения механических свойств приняты по [Хитров, 2015].

Для заболоченного почвогрунта p_s рассчитаем по формулам (2)–(13), (22)–(24), CI найдем по формулам (22)–(24), (29). Переменными величинами будут: $E \in [0,2 \text{ МПа}, 1,2 \text{ МПа}]$, $\gamma \in [15 \text{ кН}; 25 \text{ кН}]$, $b \in [0,6 \text{ м}; 0,8 \text{ м}]$, $l \in [1 \text{ м}; 1,5 \text{ м}]$, $h \in [0,05 \text{ м}; 0,25 \text{ м}]$, $\beta \in [0^\circ; 30^\circ]$, при этом $H \rightarrow \infty$, $\gamma \approx 18 \text{ кН/м}^3$. Диапазоны изменения механических свойств приняты по [Хитров, 2015].

Для супеси, суглинка и глины p_s найдём по формулам (2)–(13), (26)–(28), CI рассчитаем по формулам (26)–(28), (29), E – по формуле (25). Переменными величинами будут: $\gamma \in [15 \text{ кН}; 25 \text{ кН}]$, $H \in [0,25 \text{ м}; 0,75 \text{ м}]$, $b \in [0,6 \text{ м}; 0,8 \text{ м}]$, $l \in [1 \text{ м}; 1,5 \text{ м}]$, $h \in [0,05 \text{ м}; 0,25 \text{ м}]$, $\beta \in [0^\circ; 25^\circ]$, $v \in [0,25; 0,45]$, а также I_L , e . Для супеси $I_L \in [-1; 1]$, $e \in [0,6; 0,85]$, для суглинка $I_L \in [-0,4; 1]$, $e \in [0,6; 1,05]$, для глины $I_L \in [0; 1]$, $e \in [0,7; 1,4]$. Диапазоны изменения механических свойств приняты по [Хитров, 2015].

Выполним расчеты для различных типов грунта при варьировании переменных в указанных диапазонах. Обработка расчетных данных позволила установить следующие общие зависимости p_s [МПа] от E [МПа] и CI [МПа]:

$$p_s = A_E E^{B_E}, \quad (30)$$

$$p_s = A_{CI} CI^{B_{CI}}, \quad (31)$$

где A_E , B_E , A_{CI} , B_{CI} – числовые коэффициенты, значения которых представлены в табл. 2 (там же представлены коэффициенты детерминации R^2 при аппроксимации расчетных данных предлагаемыми зависимостями).

Таблица 2

Коэффициенты для расчета несущей способности по формулам (30), (31)

Coefficients for calculating the bearing capacity with formulae (30), (31)

Коэффициент	Тип грунта				
	лесной	заболоченный	супесь	суглинок	глина
A_E	0,0932	0,2853	0,002	0,0078	0,0243
B_E	1	1	1,5237	1,2981	1
R^2	0,8089	0,9692	0,7816	0,8060	0,8767
A_{CI}	0,2197	0,3331	0,1006	0,1411	0,1887
B_{CI}	1	1	0,7552	0,7898	0,7872
R^2	0,8073	0,9690	0,8251	0,9230	0,9136

Заметим, что в [Sandsven et al., 1988; Senneset et al., 1982; Van Impe, 1986] приводятся эмпирические данные о связи модуля деформации и конусного индекса грунта.

Зависимости (30), (31) проиллюстрированы графиками (рис. 1, 2).

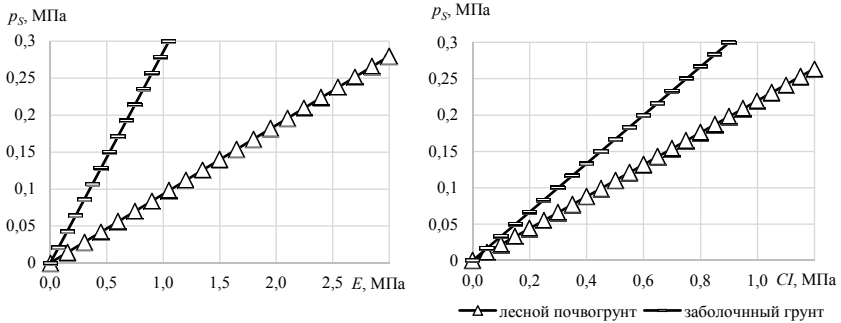


Рис. 1. Зависимости несущей способности почвогрунта:
а) от модуля деформации; б) от конусного индекса

Fig. 1. Dependence of bearing capacity of forest and marshy soil:
a) on the deformation modulus; b) on the cone index

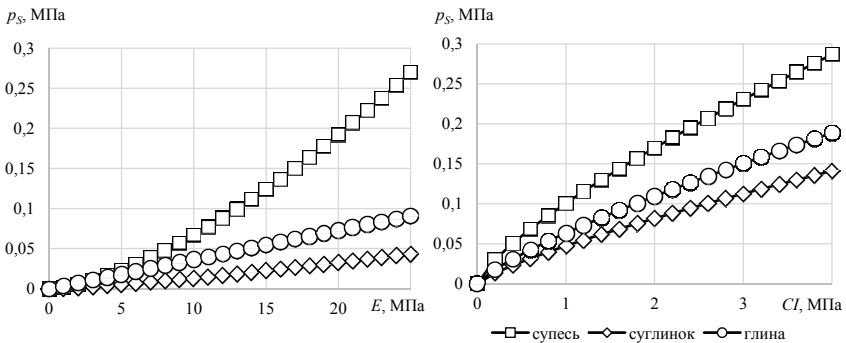


Рис. 2. Зависимости несущей способности связного грунта:
а) от модуля деформации; б) от конусного индекса

Fig. 2. Dependences of bearing capacity of sandy loam, loam and clay:
a) on the deformation modulus; b) on the cone index

При равных значениях модуля деформации, наибольшие значения несущей способности отмечаются у заболоченного грунта, далее следует лесной почвогрунт, затем супесь, глина и суглинок. Например, при модуле деформации 1 МПа несущую способность заболоченного грунта оценим в 0,3 МПа, а лесного – приблизительно в 0,1 МПа. Это обстоятельство можно объяснить следующим образом: среди перечисленных типов грунта заболоченные почвогрунты хуже всего сопротивляются сжатию и, таким образом, отличаются сравнительно низкими значениями модуля деформации, при этом дерновое покрытие таких грунтов армировано корневой системой растительности, что обуславливает способность сопротивляться сдвигу, повышая тем самым несущую способность. На практике заболоченные почвогрунты имеют значение модуля деформации – в пределах 0,5 МПа и, следовательно, расчетное значение несущей способности в пределах 0,1 МПа, в то время как модуль деформации 2 МПа и соответствующее ему расчетное значение несущей способности 0,2 МПа – не редкость для лесных почвогрунтов. Таким образом, «типичный» лесной почвогрунт прочнее заболоченного. Аналогично объясним и большее, по сравнению с минеральными грунтами, значение несущей способности у лесного почвогрунта.

Выводы.

1. Согласно результатам расчетов несущая способность связного грунта определяется удельным сцеплением и углом внутреннего трения. Эта связь выражается степенным уравнением (16) и не зависит от типа связного грунта.

2. Расчетное значение несущей способности глины, суглинка, супеси, лесного и заболоченного почвогрунтов можно получить по модулю деформации при помощи степенного уравнения (30), коэффициенты которого определяются типом связного грунта (табл. 2).

2. Расчетное значение несущей способности глины, суглинка, супеси, лесного и заболоченного почвогрунтов можно получить по конусному индексу, который определяется зондированием, при помощи степенного уравнения (31), коэффициенты которого определяются типом связного грунта (табл. 2).

Библиографический список

- Агейкин Я.С.* Проходимость автомобилей. М.: Машиностроение, 1981. 232 с.
Григорьев И.В., Жукова А.И., Григорьева О.И., Иванов А.В. Средооадающие технологии разработки лесосек в условиях Северо-Западного региона Российской Федерации. СПб.: ЛТА, 2008. 176 с.

Григорьев И.В. Снижение отрицательного воздействия на почву колесных трелевочных тракторов обоснованием режимов их движения и технологического оборудования: [науч. изд.]. СПб.: ЛТА, 2006. 236 с.

Дмитриева М.Н., Лухминский В.А., Хахина А.М. Математическая модель для расчета глубины колеи при работе малогабаритного трелевочного трактора // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2017. Вып. 219. С. 144–155.

Ларин В.В. Методы прогнозирования опорной проходимости многоосных колесных машин на местности: дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.03.-М., 2007. 530 с.

Хитров Е.Г., Григорьев Г.В., Дмитриева И.Н., Ильющенко Д.А. Расчет конусного индекса по величине модуля деформации лесного почвогрунта // Системы. Методы. Технологии. 2014. № 4(24). С. 127–131.

Хитров Е.Г., Григорьев И.В., Хахина А.М. Повышение эффективности трелевки обоснованием показателей работы лесных машин при оперативном контроле свойств почвогрунта: [науч. изд.]. СПб., 2015. 146 с.

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.

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

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

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.

Vesic A.S. Expansion of Cavities in Infinite Soil Mass // Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. 1972. No. 98. P. 113–123.

References

Agejkin Ya.S. Prokhodimost' avtomobilej (Passability of cars). M.: Mashinostroenie, 1981. 232 s. (In Russ.)

Grigor'ev I.V., Zhukova A.I., Grigor'eva O.I., Ivanov A.V. Sredoshchadyashchie tekhnologii razrabotki lesosok v usloviyakh Severo-Zapadnogo regiona Rossijskoj Federacii (Eco-friendly logging technology development in the north-western region of the Russian Federation). SPb.: LTA, 2008. 176 p. (In Russ.)

Grigor'ev I.V. Snizhenie otricatel'nogo vozdejstviya na pochvu kolesnykh trelevchnykh traktorov obosnovaniem rezhimov ikh dvizheniya i tekhnologicheskogo oborudovaniya (Reduction of the negative impact on the soil of wheeled skidders by justifying their movement modes and technological equipment). Nauchnoe izdanie. SPb.: LTA. 2006. 236 p. (In Russ.)

Dmitrieva M.N., Lukhminskij V.A., Khakhina A.M. Matematicheskaya model' dlya rascheta glubiny kolei pri rabote malogabaritnogo trelevochnogo traktora (Mathematical model for calculating rut depth when operating a small-sized skidder). *Izvestiya Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii*, 2017, is. 219, pp. 144–155. (In Russ.)

Larin V.V. Metody prognozirovaniya opornoj prokhodimosti mnogoosnykh kole-snykh mashin na mestnosti (Methods for predicting passability of multi-axle wheeled vehicles on the ground): dis. ... d-ra tekhn. nauk: 05.05.03. M., 2007. 530 p. (In Russ.)

Khitrov E.G., Grigor'ev G.V., Dmitrieva I.N., Il'yushenko D.A. Raschet konusnogo indeksa po velichine modulya deformacii lesnogo pochvogrunta (Calculation of the cone index by the modulus of deformation of forest soil). *Sistemy. Metody. Tekhnologii*, 2014, no. 4(24), pp. 127–131. (In Russ.)

Khitrov E.G., Grigor'ev I.V., Khakhina A.M. Povyshenie ehffektivnosti trelevki obosnovaniem pokazatelej raboty lesnykh mashin pri operativnom kontrole svoystv pochvogrunta (Improving the efficiency of skidding by justifying the performance of forest machines in the operational control of the soil properties). Nauchnoe izdanie. SPb., 2015. 146 p. (In Russ.)

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.

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

Senneset K., Janbu N., Svano G. Strength and deformation parameters from cone penetration tests. *Proceedings of the European Symposium on Penetration Testing. ESOPT – II, Amsterdam*, 1982, vol. 2, pp. 863–870.

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, pp. 51–70.

Vesic A.S. Expansion of Cavities in Infinite Soil Mass. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 1972, no. 98, pp. 113–123.

Материал поступил в редакцию 21.01.2019 г.

Хитров Е.Г., Котенев Е.В., Андронов А.В., Тарадин Г.С., Божбов В.Е. Теоретический расчет несущей способности связного грунта по конусному индексу и механическим свойствам // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2019. Вып. 226. С. 111–123. DOI: 10.21266/2079-4304.2019.226.111-123

Статья посвящена выявлению взаимосвязей физико-механических свойств, конусного индекса и несущей способности различных типов связных грунтов и почвогрунтов. Материалом для исследования служат справочные данные и

теоретические формулы для расчета несущей способности и физико-механических свойств грунта. Методы исследования – вычислительный эксперимент, аппроксимация расчетных данных, метод наименьших квадратов. Использована отечественная методика расчета несущей способности деформируемого массива грунта, находящегося под воздействием штампа, учитывающая мощность слоя, геометрию пятна контакта, сцепные свойства и удельный вес грунта, отклонение направления воздействия штампа от нормали к поверхности грунта. Согласно результатам расчетов несущая способность связного грунта определяется удельным сцеплением и углом внутреннего трения и выражается степенным уравнением независимо от типа связного грунта. На втором этапе исследования проведено сопоставление модуля деформации и конусного индекса связного грунта со сцепными его свойствами и несущей способностью. Значения модуля деформации, модуля сдвига, удельного сцепления и угла внутреннего трения получены расчетным путем для грунтов различной пористости и консистенции в зависимости от типа грунта. Значения конусного индекса определены по теоретическому решению задачи о вдавливании конического индентора в полупространство. Установлено, что расчетное значение несущей способности глины, суглинка, супеси, лесного и заболоченного почвогрунтов связано с модулем деформации также степенной зависимостью, коэффициенты которой зависят от типа грунта. Расчетное значение несущей способности глины, суглинка, супеси, лесного и заболоченного почвогрунтов можно получить по конусному индексу, который определяется зондированием, а также при помощи степенного уравнения, коэффициенты которого определяются типом связного грунта.

Ключевые слова: лесной почвогрунт, заболоченный грунт, связные грунты, вдавливание индентора, несущая способность, сцепные свойства, модуль деформации.

Khitrov E.G., Kotenev E.V., Andronov A.V., Taradin G.S., Bozhbov V.E. Theoretical calculation of bearing capacity of cohesive soil on the cone index and mechanical properties. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhniceskoj Akademii*, 2019, is. 226, pp. 111–123 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2019.226.111-123

The article devotes to studying the relationship of mechanical properties, cone index and bearing capacity of various types of cohesive soils. The material for the study are reference data and theoretical formulas for calculating the bearing capacity and mechanical properties of the soil. Research methods include computational experiment, approximation of the calculated data, the least squares method. The article uses domestic method of calculating the bearing capacity of a deformable soil layer under influence of a stamp, taking into account the layer thickness, geometry of the contact patch, cohesive properties and specific weight of the soil, deviation of stamp direction from the normal to the soil surface. According to the results of calculations, bearing capacity of cohesive

soils is determined by the inner cohesion and angle of internal friction and expresses by a power equation regardless of the cohesive soil type. At the second stage, the study makes comparison of the deformation modulus and the cone index of cohesive soil with its cohesive properties and bearing capacity. The values of deformation modulus, shear modulus, inner cohesion and angle of internal friction obtained for soils of different porosity and consistency, depending on the soil type. The values of the cone index are determined by theoretical solution of the problem of penetration of conical indenter into half-space. It has been established that calculated value of bearing capacity of clay, loam, sandy loam, forest and marshy soil is associated with the deformation modulus also by power dependence, the coefficients of which depend on the type of soil. The calculated value of bearing capacity of clay, loam, sandy loam, forest and marshy soil can be obtained by the cone index, which is determined by sounding, also using a power equation, the coefficients of which are determined by the type of cohesive soil.

Keywords: forest soil, marshy soil, cohesive soils, indentation, bearing capacity, cohesive properties, deformation modulus.

ХИТРОВ Егор Германович – доцент кафедры технологических процессов и машин лесного комплекса Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: yegorkhitrov@gmail.com

KHITROV Egor G. – Associate Professor of the Department of Technological Processes and Machines of the Forest Complex of St.Petersburg State Forest Technical University.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: yegorkhitrov@gmail.com

КОТЕНЕВ Евгений Викторович – соискатель кафедры технологических процессов и машин лесного комплекса Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: kotenew@bk.ru

KOTENEV Evgeny V. – Applicant of the Department of Technological Processes and Machines of the Forest Complex of St.Petersburg State Forest Technical University.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: kotenew@bk.ru

АНДРОНОВ Александр Вячеславович – доцент кафедры лесного машиностроения, сервиса и ремонта Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: andronovalexandr@gmail.com

ANDRONOV Alexander V. – Associate Professor of the Department of Forest Engineering, Service and Repair of St.Petersburg State Forest Technical University.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: andronovalexandr@gmail.com

ТАРАДИН Григорий Сергеевич – ассистент кафедры лесного машиностроения, сервиса и ремонта Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: andronovalexandr@gmail.com

TARADIN Grigory S. – Assistant of the Department of Forest Engineering, Service and Repair of St.Petersburg State Forest Technical University.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: andronovalexandr@gmail.com

БОЖБОВ Владимир Евгеньевич – доцент кафедры геодезии, землеустройства и кадастров Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: v-b@mail.ru

BOZHBOV Vladimir E. – Associate Professor of the Department of Geodesy, Land Management and Cadastres of St.Petersburg State Forest Technical University.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: v-b@mail.ru