

Расчет несущей способности лесных почвогрунтов под воздействием колесных движителей

Е.Г. Хитров^а, В.Е. Божбов^б, Д.А. Ильюшенко^с

Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, пер. Институтский 5, Санкт-Петербург, Россия

^аye.gorkhitrov@gmail.com, ^бgeo-lta@mail.ru, ^сtlzp@inbox.ru

Статья поступила 22.08.2014, принята 19.11.2014

В предлагаемой статье рассмотрены вопросы, связанные с расчетом важнейшего показателя, характеризующего сопротивление почвогрунта деформированию при воздействии колесных движителей, а именно несущей способности. На основании общих зависимостей в области теории движения колесных транспортных средств построена методика расчета несущей способности лесных почвогрунтов с учетом геометрических параметров пятна контакта движителей лесных и лесозаготовительных машин. По предложенной методике проведены расчеты (для колес с диаметром 1,6 м и шириной 0,6 м свойства почвогрунта приняты на основании анализа литературных источников) и получено приближенное уравнение, связывающее модуль деформации лесного почвогрунта с его несущей способностью при взаимодействии с колесным движителем. Полученное среднее значение несущей способности можно рассматривать как некоторый интегральный показатель при описании процесса деформирования почвогрунта лесосеки под воздействием колеса лесной машины. Полученные результаты предлагается использовать в моделях, предназначенных для расчета показателей процессов взаимодействия движителей лесных машин с почвогрунтами лесосек. В заключение освещается перспектива дальнейших исследований — интеграция моделей для оценки показателей процесса трелевки в общую канву эколого-энергетической оценки эффективности лесопользования.

Ключевые слова: пятно контакта, несущая способность, лесные почвогрунты, колесные движители.

Calculation of load-bearing capacity for forest potting soils influenced by the wheeled running gears

E.G. Nitrov^a, V.E. Bozhbov^b, D.A. Iliushenko^c

Saint Petersburg State Forest Technical University under name of S.M.Kirov; 5, Institutskiy per., Saint Petersburg, Russia

^aye.gorkhitrov@gmail.com, ^bgeo-lta@mail.ru, ^ctlzp@inbox.ru

Received 22.08.2014, accepted 19.11.2014

The article deals with the issues related to the calculation of the most important indicator of soil resistance to deformation when influenced by the wheeled running gears, so that is load-bearing capacity. Based on the general relationships in the theory of the motion of wheeled vehicles, the method for calculating the load-bearing capacity of forest potting soils has been developed with taking into account the geometric parameters for the contact patch of wheeled running gears of timber and timber logging machinery. According to the method proposed, calculations have been done (for the wheels with a diameter of 1.6 m and a width of 0.6 m, forest potting soils properties have been taken based on the analysis of literary sources) and an approximate equation has been received, relating the stress-strain modulus of the forest potting soils with their load-bearing capacity when interacting with the wheeled running gears. Average value of the load-bearing capacity can be regarded as an integral index when describing the deformation process of the forest potting soils on cutting areas influenced by a wheel of timber machinery. The results obtained are supposed to be used in models designed to calculate the rates of interaction processes between the wheeled running gears of timber machinery and forest potting soils. In conclusion, the prospect for further research is highlighted as an integration of models for estimating the logging process parameters into the overall ecological and energy assessment of forest management effectiveness.

Key words: contact patch, load-bearing capacity, forest potting soils, wheeled running gears.

Введение. Одним из важнейших показателей, характеризующих сопротивление лесных почвогрунтов деформированию, является несущая способность [1, 2]. При этом известно, что несущая способность основания определяется не только его фундаментальными физико-механическими свойствами, но и геометрическими параметрами штампа-деформатора (в частности колесного движителя) [3, 4]. В этой связи при расчете

несущей способности лесных почвогрунтов следует рассматривать процесс взаимодействия движителей лесных и лесозаготовительных машин с почвогрунтами с учетом характерных размеров колесных движителей, а также жесткости колес (поскольку этот показатель влияет на геометрические параметры пятна контакта).

Целью работы является получение зависимости для расчета несущей способности лесных почвогрунтов

под воздействием движителей колесных лесных и лесозаготовительных машин с учетом геометрических параметров пятна контакта.

Базой для исследований послужили работы в области теории движения колесных транспортных средств, а также работы, относящиеся к исследованию физико-механических свойств лесных почвогрунтов. В частности, при проведении исследований принята классификация почвогрунтов, предложенная в работах [2, 5] (табл. 1), ранее применявшаяся при проведении исследований, результаты которых изложены в [6 – 8].

Таблица 1

Классификация лесных почвогрунтов по физико-механическим свойствам

Параметры	Категории почвогрунта		
	III	II	I
E , МПа	0,4	1	3
C_0 , кПа	5	12	24
ϕ_0 , град	11	15	16
γ , кН/м ³	7,5	8,5	9,5
H , м	0,8	0,4	0,3

В табл. 1 использованы обозначения: E — модуль деформации почвогрунта; C_0 — внутреннее сцепление; ϕ_0 — угол внутреннего трения; γ — объемный вес почвогрунта естественного сложения; H — толщина деформируемого слоя (глубина распространения деформаций сжатия); ν — коэффициент Пуассона почвогрунта.

Результаты исследования. Известно [3, 4], что несущую способность грунта расчетным путем можно определить по следующей формуле:

$$p_s = p_{s0} \alpha_z, \quad (1)$$

где p_{s0} — несущая способность слоя грунта неограниченной толщины; α_z — коэффициент учета толщины деформируемого слоя грунта.

Величина p_{s0} находится по следующей формуле [4]:

$$p_{s0} = 0,5J_1N_1\gamma b + N_2\gamma h + J_2N_3C_0, \quad (2)$$

где J_1, J_2 — коэффициенты учета геометрических параметров штампа; N_1, N_2, N_3, S — вспомогательные коэффициенты, зависящие от угла внутреннего трения грунта.

Формулы для определения коэффициентов J_1, J_2 следующие [4]:

$$J_1 = l / (l + 0,4b), \quad (3)$$

$$J_2 = (l + b) / (l + 0,5b), \quad (4)$$

где l — длина штампа; b — ширина штампа.

Формулы для расчета коэффициентов N_1, N_2, N_3, S имеют вид [4]:

$$N_1 = (1 - S^4) / S^5, \quad (5)$$

$$N_2 = 1 / S^2, \quad (6)$$

$$N_3 = 2(1 + S^2) / S^3, \quad (7)$$

$$S = \tan(0,25\pi - 0,5\phi_0). \quad (8)$$

В работе [4] коэффициент учета толщины деформируемого слоя грунта найден с использованием положений работы [9] в следующем виде:

$$\alpha_z = 1 + 0,5hH^* / [H \cdot (H - h - 0,25H^*)], \quad (9)$$

где H^*, ε — вспомогательные величины, определяемые по формулам:

$$H^* = 0,707b \tan \phi_0 \cos \varepsilon \exp[(0,25\pi + \varepsilon) \tan \varepsilon], \quad (10)$$

$$\varepsilon = 0,75\phi_0. \quad (11)$$

В работе [3] предложена следующая формула для определения ширины штампа b , действие которого эквивалентно действию колеса машины:

$$b = B + \frac{10h \cdot h_z}{1 - h + H_T - h_z}, \quad (12)$$

где B — ширина колеса; H_T — высота шины ($\approx 0,75B$); h_z — радиальная деформация колеса.

Поскольку длина эквивалентного штампа равна длине площадки контакта колеса с почвогрунтом, с учетом радиальной деформации h_z можем записать:

$$l = l_1 + l_2 = 2\sqrt{Dh_z - h_z^2} + \sqrt{D \cdot (h_z + h) - (h_z - h)^2}, \quad (13)$$

где D — диаметр ненагруженного колеса.

Для радиальной деформации колеса известна формула [10]:

$$h_z = \frac{G_w}{\pi D p_w}, \quad (14)$$

где G_w — нагрузка на колесо; p_w — внутреннее давление в камере шины.

Показатели физико-механических свойств почвогрунта, представленные в табл. 1, с удовлетворительной точностью можно выразить через модуль деформации E при помощи следующих зависимостей:

$$C_0 = 10,774E^{0,7737}, \quad (15)$$

$$\phi_0 = 13,669E^{0,1818}, \quad (16)$$

$$\gamma = 8,4008E^{0,1168}, \quad (17)$$

$$H = 0,4714E^{-0,479}. \quad (18)$$

В настоящей работе для расчета примем $B = 0,6$ м, $D = 1,6$ м [2]. С учетом того, что величины C_0, ϕ_0, H выражаются через модуль деформации E , а прочие величины в формулах (1) – (14) находятся с использованием в качестве исходных данных значений p_w, G_w, h и E , можем записать:

$$p_s = f(p_w, G_w, h, E). \quad (19)$$

Рассмотрим вопрос о влиянии факторов p_w, G_w, h и E на несущую способность лесных почвогрунтов. На рис. 1 и 2 представлены графики, показывающие изме-

нение расчетного значения несущей способности почвогрунта по мере погружения штампа в пределах от 0 до $0,75H$ (в соответствии с формулой (18) величина H изменяется в зависимости от модуля деформации E) при варьировании нагрузки на колесо G_W и давления в камере шины p_W .

Анализ графиков показывает, что расчетное значение несущей способности p_S при варьировании G_W, p_W у почвогрунтов II и III категории изменяется слабо, более заметны различия при расчете p_S грунтов I категории, однако в процентном отношении эти изменения менее очевидны.

При этом по мере погружения штампа (с увеличением h) у всех трех типов почвогрунтов отмечается увеличение расчетного значения несущей способности, что связано с приближением штампа-деформатора к жесткому основанию. Увеличение несущей способности у почвогрунтов II и III категории становится заметным при приближении величины осадки h к $0,75H$, у почвогрунтов I категории абсолютное увеличение несущей способности заметно уже в начале процесса погружения штампа, однако в процентном отношении это изменение не представляется существенным.

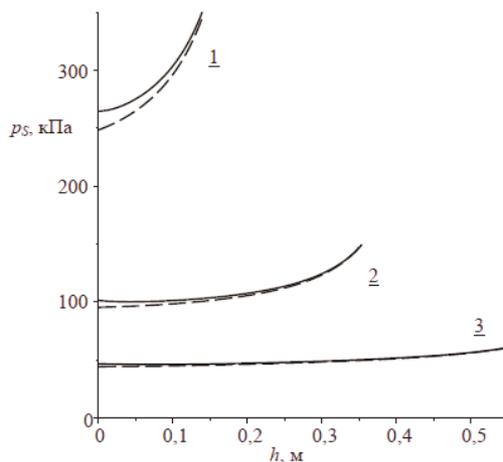


Рис. 1. Результаты расчета несущей способности почвогрунта при $G_W = 35$ кН: 1 — $E = 3$ МПа; 2 — $E = 1$ МПа; 3 — $E = 0,4$ МПа; сплошные линии — $p_W = 350$ кПа; пунктирные линии — $p_W = 150$ кПа

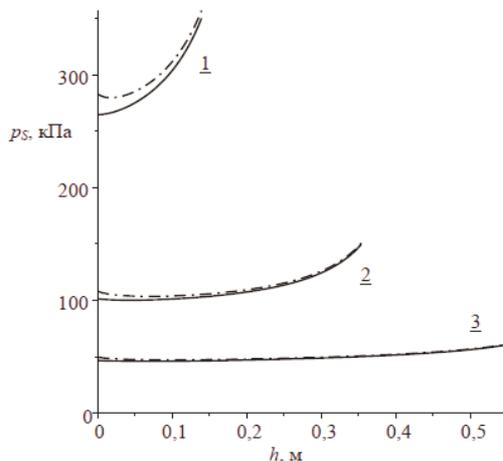


Рис. 2. Результаты расчета несущей способности почвогрунта при $p_W = 350$ кПа: 1 — $E = 3$ МПа; 2 — $E = 1$ МПа; 3 — $E = 0,4$ МПа; сплошные линии — $G_W = 35$ кН; пунктирные линии — $G_W = 15$ кН

0,4 МПа; сплошные линии — $G_W = 35$ кН; штрихпунктирные линии — $G_W = 15$ кН

В связи с изложенным предлагается пользоваться в расчетах осредненным значением несущей способности почвогрунта. Для вычисления осредненного значения несущей способности в пределах $h = 0 - 0,75H$, $G_W = 15 - 35$ кН, $p_W = 150 - 350$ кПа воспользуемся следующей формулой:

$$\overline{p_S} = \frac{1}{20 \cdot 10^3} \cdot \frac{1}{200 \cdot 10^3} \cdot \frac{1}{0,75H} \times \int_{150 \cdot 10^3}^{350 \cdot 10^3} \int_{15 \cdot 10^3}^{35 \cdot 10^3} \int_0^{0,75H} p_S(p_W, G_W, h, E) dh dG_W dp_W \quad (20)$$

Расчеты были проведены с использованием численного метода интегрирования в прикладном математическом пакете Maple. Результаты расчетов при варьировании модуля деформации в пределах от 0,4 до 3 МПа представлены в табл. 2.

Графически зависимость $\overline{p_S}(E)$ представлена на рис. 3

Таблица 2

Осредненные значения p_S в пределах изменения h от 0 до $0,75H$, G_W от 15 до 35 кН, p_W от 150 до 350 кПа при варьировании величины E

E , МПа	$\overline{p_S}$, МПа
0,4	0,0496361
0,8	0,0899733
1,2	0,1314999
1,6	0,1750163
2	0,2211028
2,4	0,2703286
2,8	0,323343
3,0	0,365372

Очевиден линейный характер связи E и p_S , зависимость можно представить в виде формулы:

$$\overline{p_S} = 0,1128E \quad (21)$$

Проведенные исследования позволяют сформулировать следующие выводы.

Осредненное значение несущей способности почвогрунта $\overline{p_S}$ по формуле (21) является линейной функцией модуля деформации почвогрунта E (при соблюдении тех же диапазонов исходных данных, которые были использованы при получении осредненной величины). Осредненное значение несущей способности можно рассматривать как некоторый интегральный показатель при описании процесса деформирования почвогрунта лесосеки под воздействием колеса лесной машины.

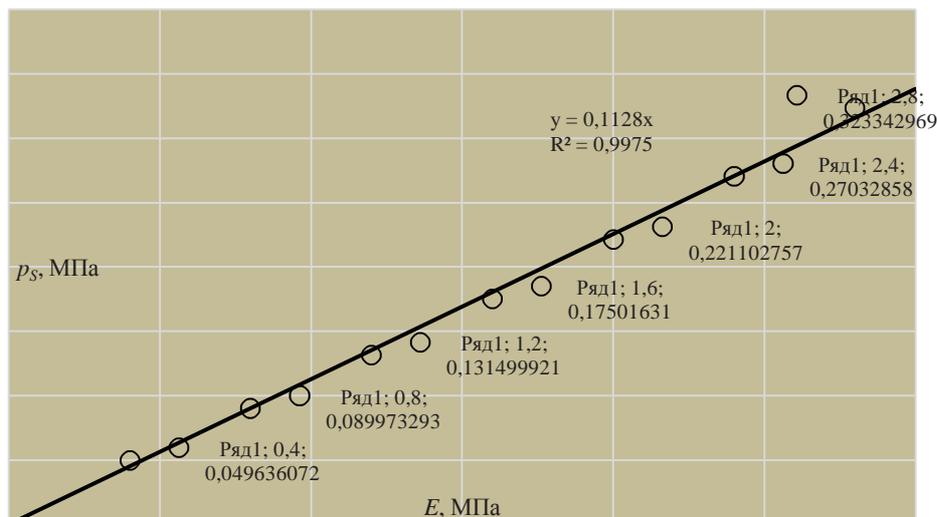


Рис. 3. Зависимость осредненного значения несущей способности почвогрунта от модуля деформации

Полученное выражение (21) далее предлагается использовать в моделях, предназначенных для расчета показателей процессов взаимодействия движителей лесных машин с почвогрунтами лесосек (рассмотрены в [2; 5]).

Отдельную перспективную область исследований представляет интеграция моделей для оценки показателей процесса трелевки в общую канву эколого-энергетической оценки эффективности лесопользования (заложенную в работах [11; 12]) по аналогии с тем, как ранее в [11] были интегрированы результаты, относящиеся к деревопереработке ([13 – 16]).

Литература

1. Григорьев И.В., Макуев В.А., Никифорова А.И., Хитров Е.Г., Устинов В.В., Калинин С.Ю. Исследование коэффициента сопротивления передвижению колесных лесных машин // Вестник Московского государственного университета леса. Лесной журнал. 2014. № 2. С. 36-41.
2. Григорьев И.В. Снижение отрицательного воздействия на почву колесных трелевочных тракторов обоснованием режимов их движения и технологического оборудования. СПб.: Изд-во ЛТА, 2006. 236 с.
3. Агейкин Я.С. Вездеходные колесные и комбинированные движители. М.: Машиностроение, 1972. 184 с.
4. Ларин В.В. Методы прогнозирования и повышения опорной проходимости многоосных колесных машин на местности: дис. ... д-ра техн. наук. М.: МГТУ им. Баумана, 2007. 607 с.
5. Григорьев И.В., Жукова А.И., Григорьева О.И., Иванов А.В. Средоадаптирующие технологии разработки лесосек в условиях Северо-Западного региона Российской Федерации. СПб.: Изд-во ЛТА, 2008. 176 с.
6. Григорьев И.В., Никифорова А.И., Пельмский А.А., Хитров Е.Г., Хахина А.М. Экспериментальное определение времени релаксации напряжений лесного грунта. Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. Естественные и технические науки. 2013. № 8 (137). С. 77-80.
7. Никифорова А.И., Хитров Е.Г., Пельмский А.А., Григорьева О.И. Определение осадки при движении лесозаготовительной машины по двуслойному основанию // Ученые

записки Петрозаводского государственного университета. Сер. Естественные и технические науки. 2014. № 2 (139). С. 87-91.

8. Калистратов А.В., Иванов В.А., Коротков Р.К., Хитров Е.Г., Григорьев Г.В. Исследование коэффициента фильтрации лесной почвы (случай дерново-подзолистой почвы) // Системы. Методы. Технологии. 2014. № 2 (22). С. 190-193.
9. Березанцев В.Г., Гуськов В.В., Велев Н.Н., Атаманов Ю.Е. Расчет оснований сооружений. Л.: Стройиздат, 1970. 207 с.
10. Гуськов В.В., Велев Н.Н., Атаманов Ю.Е. Тракторы: теория. М.: Машиностроение, 1988. 376 с.
11. Григорьев И.В., Хитров Е.Г., Никифорова А.И., Григорьева О.И., Куницкая О.А. Определение энергоемкости продуктов лесопользования в рамках методики оценки экологической эффективности лесопользования // Вестник Тамбовского университета. Сер. Естественные и технические науки. 2014. Т. 19. № 5. С. 1499-1502.
12. Григорьев И.В., Никифорова А.И., Григорьева О.И., Куницкая О.А. Обоснование методики оценки экологической эффективности лесопользования // Вестник КрасГАУ. 2012. № 6. С. 72-77.
13. Григорьев И.В., Куницкая О.А., Григорьев Г.В., Есин Г.Ю. Исследование кинетики центробежной пропитки древесины // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2013. № 2 (332). С. 156-162.
14. Григорьев Г.В., Хитров Е.Г., Есин Г.Ю., Гумерова О.М. Кинетика насыщения древесины жидкостью при центробежной пропитке // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2013. № 203. С. 108-116.
15. Гончаров Ю.А., Куницкая О.А., Григорьев Г.В., Дмитриева И.Н. Экспериментальные исследования процесса пропитки древесины сосны в поле центробежных сил с учетом соотношения зон ранней и поздней древесины [Электронный ресурс] // Инженерный вестник Дона. 2014. № 3. URL (дата обращения: 21.09.2014)
16. Григорьев И.В., Былев А.Б., Хахина А.М., Никифорова А.И. Математическая модель уплотняющего воздействия динамики поворота лесозаготовительной машины на боковые полосы трелевочного волока // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. Естественные и технические науки. 2012. Т. 1. № 8 (129). С. 72-77.

References

1. Grigor'ev I.V., Makuev V.A., Nikiforova A.I., Khitrov E.G., Ustinov V.V., Kalinin S.Yu. Study of resistance coefficient of the movement of wheeled forestry machines // *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa. Lesnoi zhurnal.* 2014. № 2. P. 36-41.
2. Grigor'ev I.V. Reduce negative impacts on soil wheeled skidders by justification modes of its motion and process equipment. SPb.: Izd-vo LTA, 2006. 236 p.
3. Ageikin Ya.S. Rough terrain wheels and combined propulsors. M.: Mashinostroenie, 1972. 184 p.
4. Larin V.V. Methods of forecasting and improving the supporting passability of the multiaxial wheeled vehicles on the terrain: dis. ... d-ra. tekhn. nauk. M.: MGTU im. Bauman, 2007. 607 p.
5. Grigor'ev I.V., Zhukova A.I., Grigor'eva O.I., Ivanov A.V. Sparing the environment technologies of the development of cutting areas in the North-West region of the Russian Federation. SPb.: Izd-vo LTA, 2008. 176 p.
6. Grigor'ev I.V., Nikiforova A.I., Pelymskii A.A., Khitrov E.G., Khakhina A.M. Experimental determination of the stress relaxation time of the forest soil. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Estestvennye i tekhnicheskie nauki.* 2013. № 8 (137). P. 77-80.
7. Nikiforova A.I., Khitrov E.G., Pelymskii A.A., Grigor'eva O.I. Determination of sinkage of the forest machine during the motion on the two-layered base // *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Estestvennye i tekhnicheskie nauki.* 2014. № 2 (139). P. 87-91.
8. Kalistratov A.V., Ivanov V.A., Korotkov R.K., Khitrov E.G., Grigor'ev G.V. Investigation of forest soil filtration coefficient (the case of sod-podzolic soil). // *Sistemy. Metody. Tekhnologii.* 2014. № 2 (22). P. 190-193.
9. Berezantsev V.G., Gus'kov V.V., Velev N.N., Atamanov Yu.E. Calculation of the structure bases. L.: Stroizdat, 1970. 207 p.
10. Gus'kov V.V., Velev N.N., Atamanov Yu.E. Tractors: theory. M.: Mashinostroenie, 1988. 376 p.
11. Grigor'ev I.V., Khitrov E.G., Nikiforova A.I., Grigor'eva O.I., Kunitskaya O.A. The definition of energy-intensive forest products within the framework of methodology assessment of eco-efficiency forest management // *Vestnik Tambovskogo universiteta. Ser. Estestvennye i tekhnicheskie nauki.* 2014. T. 19. № 5. P. 1499-1502.
12. Grigor'ev I.V., Nikiforova A.I., Grigor'eva O.I., Kunitskaya O.A. Substantiation of the assessment methodology of the ecological efficiency of forest management // *Vestnik KrasGAU.* 2012. № 6. P. 72-77.
13. Grigor'ev I.V., Kunitskaya O.A., Grigor'ev G.V., Esin G.Yu. Investigation of the kinetics of centrifugal impregnation of wood // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Lesnoi zhurnal.* 2013. № 2 (332). P. 156-162.
14. Grigor'ev G.V., Khitrov E.G., Esin G.Yu., Gumerova O.M. Kinetics of saturation liquid of timber with the centrifugal impregnation // *Izvestiya Sankt-Peterburgskoi lesotekhnicheskoi akademii.* 2013. № 203. P. 108-116.
15. Goncharov Yu.A., Kunitskaya O.A., Grigor'ev G.V., Dmitrieva I.N. Experimental studies of the impregnation of pine wood in the field of centrifugal forces taking into account the relationship between areas of early and late wood [Elektronnyi resurs] // *Inzhenernyi vestnik Dona.* 2014. № 3. URL (data obrashcheniya: 21.09.204)
16. Grigor'ev I.V., Bylev A.B., Khakhina A.M., Nikiforova A.I. A mathematical model of the dynamics of the sealing effects of rotation of the forestry machines on the sidebands of the skidding track // *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Estestvennye i tekhnicheskie nauki.* 2012. T. 1. № 8 (129). P. 72-77.