

DOI: 10.15393/j2.art.2019.4922

УДК 629.3

Статья

Анализ составляющих глубины колеи, образующейся под воздействием движителя лесной машины на почвогрунт

Хитров Егор Германович

Кандидат технических наук, Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С. М. Кирова (Российская Федерация), yegorkhitrov@gmail.com

Получена: 04 ноября 2019 / Принята: 22 декабря 2019 / Опубликовано: 31 декабря 2019

Аннотация: Цель статьи — проанализировать соотношение составляющих глубины колеи, обусловленных сжатием лесного почвогрунта, сдвигом его слоёв при вдавливании движителя и касательным напряжением, возникающим по пятну контакта по причине буксования при сохранении подвижности машины. Исследование основывается на положениях теории движения автомобильного транспорта в условиях бездорожья и механики грунтов; при расчёте осадки почвогрунта использовано решение уравнения вдавливания штампа в деформируемое полупространство; при проведении расчётов и аппроксимации данных использованы методы математического анализа и прикладной математики. Расчёты выполнены с использованием программы Maple 2017. Установлено, что отклонение результирующей нагрузки со стороны движителя от нормали к опорной поверхности, при котором начинается срез слоёв почвогрунта, составляет 12—16°. Отклонение результирующей нагрузки от нормали к опорной поверхности, вызванное буксованием движителя, приводит к снижению несущей способности лесного почвогрунта на 8,5—10,5 %. Вклад касательного напряжения, вызванного буксованием движителя, в суммарную глубину образующейся колеи на слабонесущих почвогрунтах может достигать 15 % (в среднем 37 % глубины колеи обусловлено сжатием почвогрунта, 55 % — сдвигом слоёв при вдавливании движителя, 8 % — буксованием). Касательное напряжение при буксовании движителя на почвогрунтах средней прочности обуславливает до 18 % глубины образующейся колеи (в среднем 34 % глубины колеи обусловлено сжатием почвогрунта, 51 % — сдвигом слоёв почвогрунта при вдавливании движителя и 15 % — касательным напряжением, возникающим при буксовании). Касательное напряжение при буксовании движителя на прочных почвогрунтах обуславливает до 34 % глубины образующейся колеи (в среднем 54 % глубины колеи обусловлено

сжатием почвогрунта, 28 % — сдвигом слоёв почвогрунта при вдавливании движителя и 18 % — касательным напряжением, возникающим при буксовании).

Ключевые слова: колёсный движитель, лесной почвогрунт, нормальное давление, касательное напряжение, буксование.

DOI: 10.15393/j2.art.2019.4922

Article

Analysis of soil sinkage components caused by a forestry vehicle passage

Egor Khitrov

PhD in engineering, St. Petersburg State Forest Technical University named after S. M. Kirov, (Russia Federation), yegorkhitrov@gmail.com

Received: 04 November 2019 / Accepted: 22 December 2019 / Published: 31 December 2019

Abstract: The purpose of the article is to analyze the ratio of forest soil sinkage components caused by the soil compaction under forestry vehicle normal load, the soil shear when the vehicle pressure approaches soil bearing capacity, and the shear stress arising on the contact patch due to the vehicle slip while maintaining its mobility. The study is founded on the concepts of the off-the-road locomotion theory and soil mechanics. The study evaluates the sinkage by applying the equation of a stamp indentation into a deformable half-space. Methods of mathematical analysis and applied mathematics are used to calculate and process the obtained data. The calculations were performed using Maple 2017 program. The findings show that the deviation of the resulting vehicle load from the normal to the bearing surface at which the cut of the soil layers begins is 12 - 16 °. The deviation of the resulting load caused by the slip leads to a decrease in bearing capacity of forest soil by 8.5-10.5%. The contribution of the shear stress caused by slip into the soil sinkage on weaker forest soils can reach 15% (on average 37% of the sinkage is due to compression of the soil, 55% is due to the layers shear when the normal stress approaches the bearing capacity, 8% is caused by the slip). The shear stress when the vehicle slips on bearing forest soil determines up to 18% of the rut depth (on average 34% of the sinkage is due to the soil compaction, 51% is due to the layers shear when the normal stress approaches the bearing capacity and 15% is caused by the slip). The shear stress due to the slip on strong forest soil causes up to 34% of the sinkage (on average 54% of the sinkage is caused by compaction of the soil, 28% is due to the layers shear when the normal stress approaches the bearing capacity and 18% due to the shear stress that occurs when the vehicle is slipping).

Keywords: wheeled vehicle, forest soil, normal pressure, shear stress, slipping.

1. Введение

Образование колеи, образующейся под воздействием движителя машины, обусловлено несколькими составляющими [1]—[4]: 1) воздействием нормального давления (приводит к сжатию почвогрунта, условно обратимому и необратимому), 2) касательной нагрузкой в массиве почвогрунта, возникающей при вдавливании движителя в почвогрунт (приводит к сдвигу и срезу его слоёв, в особенности при потере почвогрунтом несущей способности) и 3) касательной нагрузкой по пятну контакта, возникающей по причине буксования движителя (при сохранении подвижности машины увеличивается результирующая нагрузка на почвогрунт, при застревании движителя происходит фрезерование грунта). Практически все математические модели взаимодействия движителя с опорной поверхностью, предложенные ранее, учитывают сжатие и возможную потерю почвогрунтом несущей способности [4], [5]. Также было установлено, что касательное напряжение по пятну контакта увеличивает результирующую нагрузку на опорную поверхность и снижает несущую способность грунта, при этом увеличивая толщину его деформируемого слоя по направлению суммарного внешнего воздействия [4], [5]. К сожалению, до настоящего времени вопросы расчёта колееобразования с учётом нормальной и касательной нагрузки проработаны не в полной мере; известны соотношения, позволяющие качественно учесть влияние возрастающей результирующей нагрузки, но расчёт её значения проводится методом итераций (подбирается угол отклонения результирующей нагрузки от нормали к опорной поверхности) либо графоаналитически [5], [6], что усложняет реализацию и развитие подходов к моделированию взаимодействия движителей лесных машин с опорными поверхностями. Цель работы — проанализировать соотношение составляющих глубины колеи, обусловленных сжатием лесного почвогрунта, сдвигом его слоёв при вдавливании колёсного движителя и касательным напряжением, возникающим по пятну контакта вплоть до сохранения подвижности машины.

2. Материалы и методы

Исследование основывается на положениях теории движения автомобильного транспорта в условиях бездорожья и механики грунтов; при расчёте осадки почвогрунта использовано решение уравнения вдавливания штампа в деформируемое полупространство, в качестве реологической модели которого использована модель Максвелла — Томпсона; при проведении расчётов и аппроксимации данных использованы методы математического анализа и прикладной математики. Расчёты выполнены с использованием программы Maple 2017.

3. Результаты исследования и их обсуждение

Напряжение сдвига, распределённое по пятну контакта, определим по формуле [6]

$$\tau_x = \frac{1}{\frac{1}{\tau_m} + \frac{t_g}{Gj}}, \quad (1)$$

где t_g — шаг грунтозацепов движителя лесной машины, j — деформация сдвига почвогрунта, τ_m — максимальное сопротивление почвогрунта сдвигу, t_g — шаг грунтозацепов, G — модуль сдвига почвогрунта.

Максимальное сопротивление почвогрунта сдвигу найдём по формуле [6]

$$\tau_m = q \operatorname{tg} \varphi + C \xi, \quad (2)$$

где q — среднее нормальное давление по пятну контакта движителя с опорной поверхностью, C , φ — соответственно удельное сцепление и угол внутреннего трения частиц почвогрунта, ξ — параметр, учитывающий снижение сопротивления сдвигу при срезе почвогрунта [6]:

$$\xi = \left(1 - \frac{j}{t_g}\right) \operatorname{Heaviside}\left(\frac{j_0 - j}{t_g}\right), \quad (3)$$

где $\operatorname{Heaviside}(\dots)$ — единичная функция Хевисайда, j_0 — деформация сдвига, при которой возникает срез почвогрунта [6]:

$$j_0 = \frac{\tau_{m0} t_g}{G} \left(\sqrt{\frac{G}{C}} - 1 \right), \quad (4)$$

где τ_{m0} — сопротивление сдвигу без учёта возможного среза почвогрунта [6], [7]:

$$\tau_{m0} = q \operatorname{tg} \varphi + C. \quad (5)$$

Деформацию сдвига принято определять с учётом горизонтальной координаты x , отсчитываемой от начала пятна контакта по его длине [4]:

$$j = Sx, \quad (6)$$

где S — коэффициент буксования.

Среднее значение касательного напряжения, распределённого по длине контакта, найдём как интеграл [4], [5], [7]

$$\tau = \frac{1}{l} \int_0^l \tau_x dx. \quad (7)$$

Результирующую нагрузку на почвогрунт p и угол её отклонения от нормали к опорной поверхности β найдём по формулам [1], [4], [5]:

$$p = \sqrt{q^2 + \tau^2}, \quad (8)$$

$$\beta = \arctg \frac{\tau}{q}. \quad (9)$$

На рисунке 1 представлены результаты расчёта среднего касательного напряжения по формуле (7) для трёх категорий лесного почвогрунта при параметрах движителя: $q = 0,05E$ (приблизённо соответствует половине несущей способности лесного почвогрунта p_s [4]), $d = 1,333$ м, $l = d/2$ (ориентировочные значения для колёсного движителя [8]). Для прочного лесного почвогрунта (I) $E = 3$ МПа, для почвогрунта средней прочности (II) $E = 1$ МПа, для слабонесущего почвогрунта (III) $E = 0,4$ МПа [9], [10]. Физико-механические свойства почвогрунта здесь и далее оценим по формулам [9], [10]:

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

$$\varphi = 13,669E^{0,1818}, \quad (11)$$

$$G = 0,244E^{0,117}. \quad (12)$$

На рисунке 2 представлены результаты расчёта угла отклонения результирующей нагрузки от нормали к опорной поверхности.

На рисунке 3 проиллюстрировано соотношение среднего касательного напряжения и нормального давления по пятну контакта движителя с почвогрунтом.

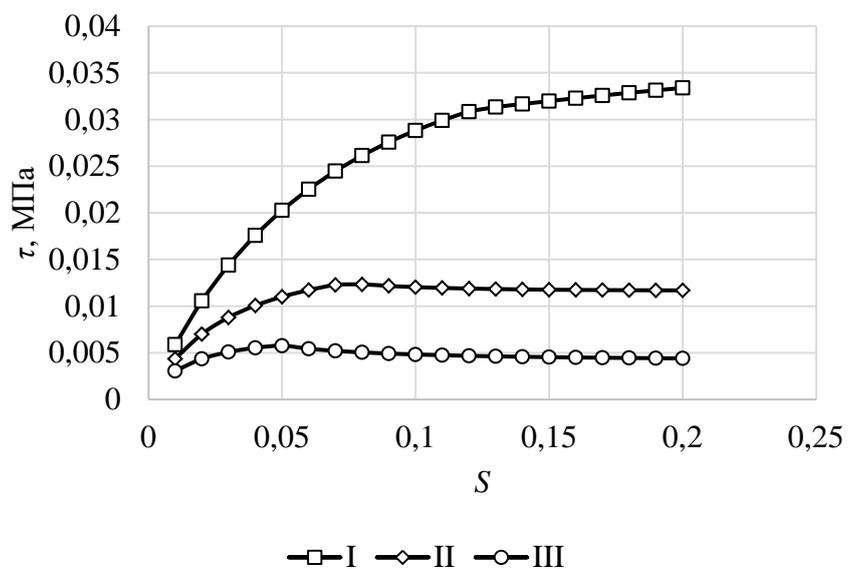


Рисунок 1. Среднее касательное напряжение по пятну контакта колёсного движителя с лесным почвогрунтом

Figure 1. Average shear stress on the contact patch depending on the slip

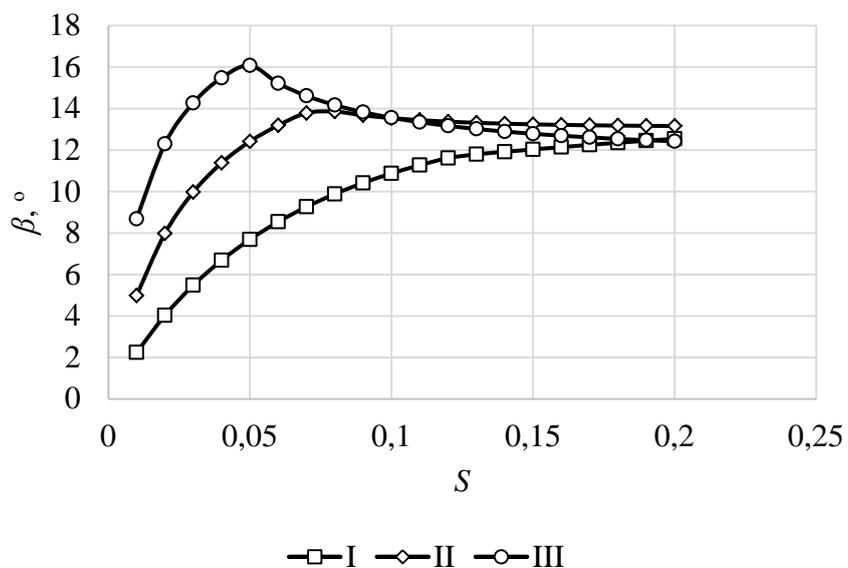


Рисунок 2. Результаты расчёта угла отклонения результирующей нагрузки со стороны колёсного движителя от нормали к опорной поверхности

Figure 2. Deviation of the resulting load from the normal to the bearing surface depending on the slip ratio

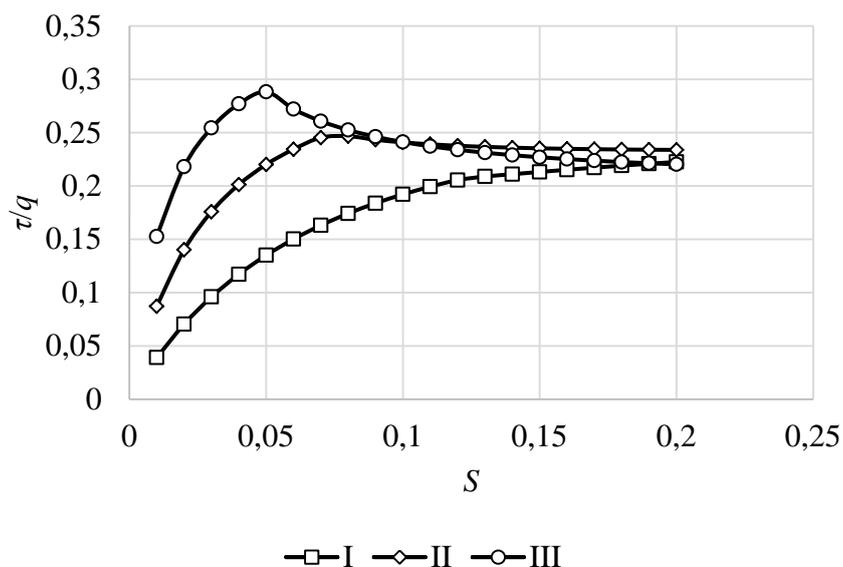


Рисунок 3. Соотношение среднего касательного напряжения и нормального давления по пятну контакта движителя с почвогрунтом

Figure 3. The ratio of average shear stress and normal pressure on the soil caused by wheeled forestry vehicle

Выразим коэффициент буксования, соответствующий началу снижения сопротивления сдвигу за счёт возникновения среза почвогрунта, по формулам (3)—(6), тогда

$$S = \frac{1}{l} \cdot \frac{t_g (q \operatorname{tg} \varphi + C)}{G} \left(\sqrt{\frac{G}{C}} - 1 \right). \quad (13)$$

Отметим, что коэффициент буксования по формуле (13) на слабонесущем почвогрунте и почвогрунте средней прочности соответствует потере движителем опорной проходимости, поскольку сопротивление сдвигу начинает снижаться. Согласно расчётам, на прочных почвогрунтах после начала среза сопротивление сдвигу изменяется незначительно.

При S , ограниченном формулой (13), интеграл (7) получим в следующем виде:

$$\tau = \frac{G}{2t_g (G - C)^2} (SlC^2 - CGlS + 2Gqt_g \operatorname{tg} \varphi + 2CGt_g) - \frac{G^2 t_g}{Sl(G - C)^3} \left(C^2 - 2Cq \operatorname{tg} \varphi - q^2 + \frac{q^2}{\cos^2 \varphi} \right) \ln \left(1 + Sl \frac{G - C}{t_g q \operatorname{tg} \varphi + Ct_g} \right). \quad (14)$$

Подставив выражение (13) в формулу (14), получим выражение касательного напряжения, соответствующего началу среза слоёв почвогрунта по причине буксования движителя:

$$\tau = (q \operatorname{tg} \varphi + C) \zeta, \quad (15)$$

где ζ — безразмерный параметр, определяющийся сдвиговыми свойствами почвогрунта:

$$\zeta = \frac{-G^3 \ln \left(\frac{C}{G} + \sqrt{\frac{G}{C}} - \sqrt{\frac{C}{G}} \right) - (G-C) \left((C^2 - CG - G^2) \sqrt{\frac{G}{C}} - \frac{C^2}{2} + \frac{3G^2}{2} \right)}{(G-C)^3 \left(\sqrt{\frac{G}{C}} - 1 \right)}. \quad (16)$$

На основании формулы (9), учитывая (15), (16), получим выражение для угла отклонения результирующей нагрузки со стороны колёсного движителя от нормали к опорной поверхности при начале среза почвогрунта:

$$\beta = \operatorname{arctg} \left(\left(\operatorname{tg} \varphi + \frac{C}{q} \right) \zeta \right). \quad (17)$$

Отметим, что формулы (15)—(17) универсальны по отношению к геометрическим параметрам движителя и пятна контакта. При этом следует учитывать, что значение коэффициента буксования, соответствующего началу среза почвогрунта, зависит от длины пятна контакта l и шага грунтозацепов t_g — формула (13).

Результаты расчётов по формуле (16) представлены на рисунке 4.

С учётом выражений (10)—(12) для лесного почвогрунта безразмерный параметр в функции угла отклонения результирующей нагрузки, определяющийся сдвиговыми свойствами почвогрунта, практически точно определяется по значению модуля общей деформации E :

$$\zeta = 0,54E^{-0,17}. \quad (18)$$

Оценка угла отклонения при начале среза слоёв почвогрунта проиллюстрирована на рисунке 5 (расчёт выполнен при $q = 0,05E$).

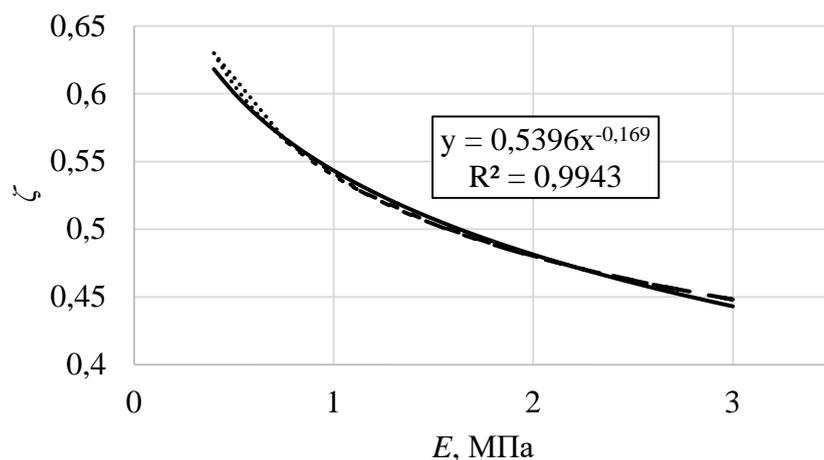


Рисунок 4. Параметр ζ в уравнении (15) для расчёта среднего касательного напряжения, соответствующего началу среза слоёв почвогрунта

Figure 4. Parameter ζ in the equation (15) for calculating the average shear stress

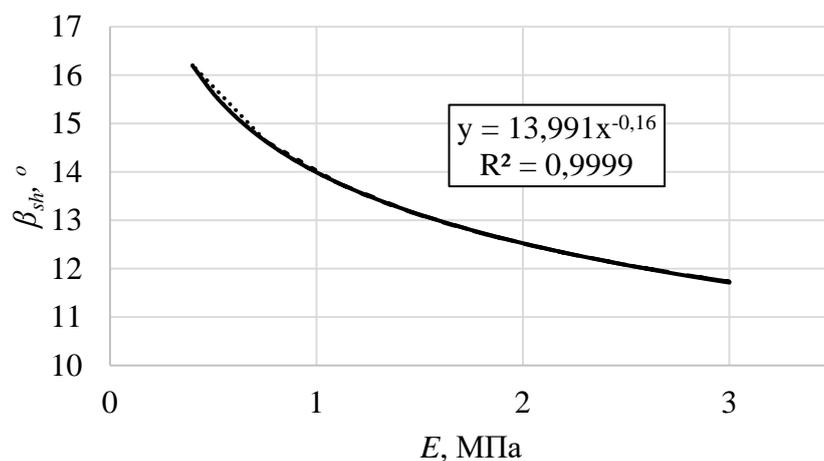


Рисунок 5. Угол отклонения результирующей нагрузки со стороны колёсного движителя от нормали к опорной поверхности при начале среза почвогрунта

Figure 5. Deviation of the resulting load from the normal to the bearing surface when the soil cut occurs

Как показывает график, отклонение результирующей нагрузки от нормали к опорной поверхности, при которой начинается срез слоёв почвогрунта, составляет 12—16°. Этот диапазон можно считать пределом, поскольку при большем коэффициенте буксования

сопротивление сдвигу слабонесущего почвогрунта и почвогрунта средней прочности снижается, сопротивление прочного почвогрунта изменяется незначительно (рисунок 1).

Оценим влияние отклонения результирующей нагрузки от нормали к опорной поверхности на несущую способность почвогрунта. Несущую способность рассчитаем по формулам [5]:

$$\left\{ \begin{array}{l} p_s = p_{s0} \alpha_z \\ p_{s0} = 0,5 K_1 K_{\beta 1} N_1 \gamma b + N_2 \gamma h + K_3 K_{\beta 3} N_3 C \\ K_1 = \frac{l}{l + 0,4b}; K_3 = \frac{l + b}{l + 0,5b} \\ K_{\beta 1} = \frac{\pi - 4\beta \operatorname{tg} \varphi}{\pi + 4\beta \operatorname{tg} \varphi}; K_{\beta 3} = \frac{3\pi - 2\beta}{3\pi + 2\beta} \\ N_1 = \frac{1 - S^4}{S^5}; N_2 = \frac{1}{S^2}; N_3 = \frac{2(1 + S^2)}{S^3}; S = \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) \\ \alpha_z = 1 + \frac{H_\varphi h}{2 \frac{H}{\cos \beta} \cdot \left(\frac{H}{\cos \beta} - h - 0,25 H_\varphi \right)}; H_\varphi = \frac{\sqrt{2}}{2} \exp \left[\left(\frac{\pi}{4} + \frac{3\varphi}{4} \right) \tan \frac{3\varphi}{4} \right] b \cos \frac{3\varphi}{4} \operatorname{tg} \varphi \end{array} \right. , \quad (19)$$

где p_{s0} — несущая способность почвогрунта с неограниченной толщиной деформируемого слоя, α_z — коэффициент, учитывающий толщину деформируемого слоя почвогрунта, $K_{\beta 1}$, $K_{\beta 3}$ — коэффициенты, учитывающие угол отклонения результирующей нагрузки от нормали к опорной поверхности, K_1 , K_3 — коэффициенты, учитывающие соотношение сторон пятна контакта, N_1 , N_2 , N_3 — коэффициенты, учитывающие внутреннее трение частиц почвогрунта, S , H_φ — вспомогательные обозначения, H — толщина деформируемого слоя почвогрунта, γ — удельный вес почвогрунта [9], [10]:

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

$$\gamma = 0,0084 E^{0,1168} . \quad (21)$$

Результаты расчёта по формулам (19) при β по выражению (17) и при $\beta = 0$ представлены на рисунке 6 (расчёты проведены при $h = 0,5H$).

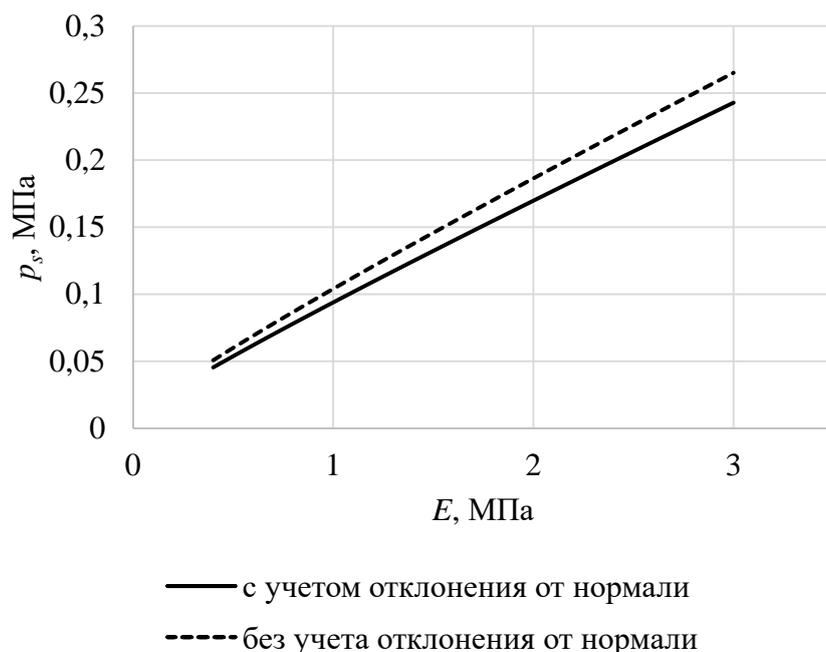


Рисунок 6. Несущая способность лесного почвогрунта под воздействием колёсного движителя

Figure 6. Bearing capacity of forest soil under a wheeled forestry vehicle

Анализ результатов расчётов показывает, что отклонение результирующей нагрузки от нормали к опорной поверхности, вызванное буксованием движителя, приводит к снижению несущей способности лесного почвогрунта на 8,5—10,5 %.

Изучим вклад составляющих воздействия движителя в глубину образующейся колеи, для этого проанализируем численное решение уравнения осадки почвогрунта при реологической модели почвогрунта Максвелла — Томпсона [11], [12]:

$$h = \frac{p_s}{p_s - p} \cdot \frac{abJpK}{\sqrt{1 - JpK}} \operatorname{arctg} \frac{H - h}{ab \cdot (1 - JpK)}, \quad (22)$$

где J — параметр, учитывающий соотношение ширины b и длины l пятна контакта, a — параметр, учитывающий толщину деформируемого слоя почвогрунта, K — жёсткость почвогрунта, K_{ps} — коэффициент, учитывающий потерю несущей способности почвогрунта [5], [11], [12]:

$$J = \frac{0,03b + l}{0,6b + 0,43l}, \quad (23)$$

$$a = 0,64 \left(1 + \frac{b}{H} \right), \quad (24)$$

$$K = \frac{1}{E} + \frac{1}{E_\delta} \left(1 - \exp \left(-\frac{E_\delta}{\eta} t \right) \right), \quad (25)$$

$$K_{ps} = \frac{P_s}{p_s - p}, \quad (26)$$

где t — время воздействия, η — вязкость почвогрунта по [12], E_δ — длительный модуль деформации, для лесных почвогрунтов $E_\delta \approx E$ [12]:

$$\eta = (0,78 \pm 0,06) E^{1,92 \pm 0,024}, \quad (27)$$

$$t = n \frac{l}{v}, \quad (28)$$

где n — число проходов движителя по следу, v — скорость машины.

Результирующую нагрузку на почвогрунт найдём по уравнению (8) с учётом (15), (16), при этом нормальное давление определим по формуле [13]

$$q = \frac{G_w}{bl}. \quad (29)$$

Для более точного расчёта примем длину пятна контакта по формуле [5]

$$l = \sqrt{dh_z - h_z^2} + \sqrt{d(h + h_z) - (h_z + h)^2}, \quad (30)$$

где d — диаметр колеса, h_z — радиальная деформация колеса [13]:

$$h_z = 0,0645 \sqrt[3]{\frac{BG_w^2}{h^{0,75} dp_w^2}}, \quad (31)$$

где B — ширина колеса, $b \approx B$, p_w — давление в шине [МПа].

Сжатие почвогрунта определим, решив уравнение (22) численно при $K_{ps} = 1$, осадку почвогрунта с учётом сжатия и сдвига слоёв почвогрунта при вдавливании движителя найдём из численного решения при K_{ps} по формуле (26) при $\beta = 0$, осадку почвогрунта с учётом сжатия, сдвига и увеличения суммарной нагрузки при буксовании движителя найдём также из решения уравнения (22) при β по формуле (17). Расчёт выполнен в программе Maple 2017 при исходных данных: $d = 1,333$ м, $p_w = 0,35$ МПа, $B = 0,7$ м, $n = 4$, $v = 1,4$ м/с. Свойства почвогрунта выражены через E по формулам (10)—(12), (20), (21). Результаты расчётов для трёх категорий почвогрунта представлены на рисунках 7—9.

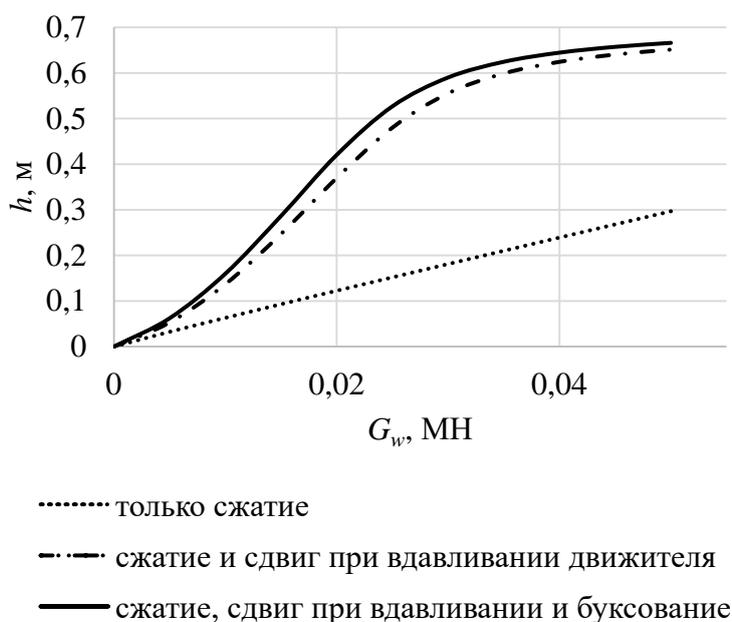


Рисунок 7. Составляющие расчётного значения глубины колеи, образующейся под воздействием колёсного движителя на слабонесущем почвогрунте (III категория)

Figure 7. Components of the calculated sinkage of loose forest soil (category III)

Обработка расчётных данных показывает, что вклад касательного напряжения, вызванного буксованием движителя, в общую глубину колеи на слабонесущих почвогрунтах может достигать 15 %; в среднем 37 % глубины колеи обусловлено сжатием почвогрунта, 55 % — сдвигом слоёв при вдавливании движителя, 8 % — буксованием.

Согласно выполненным расчётам, касательное напряжение при буксовании движителя на почвогрунтах средней прочности обуславливает до 18 % глубины образующейся колеи; в среднем 34 % глубины колеи обусловлено сжатием почвогрунта, 51 % — сдвигом слоёв почвогрунта при вдавливании движителя и 15 % — касательным напряжением, возникающим при буксовании.

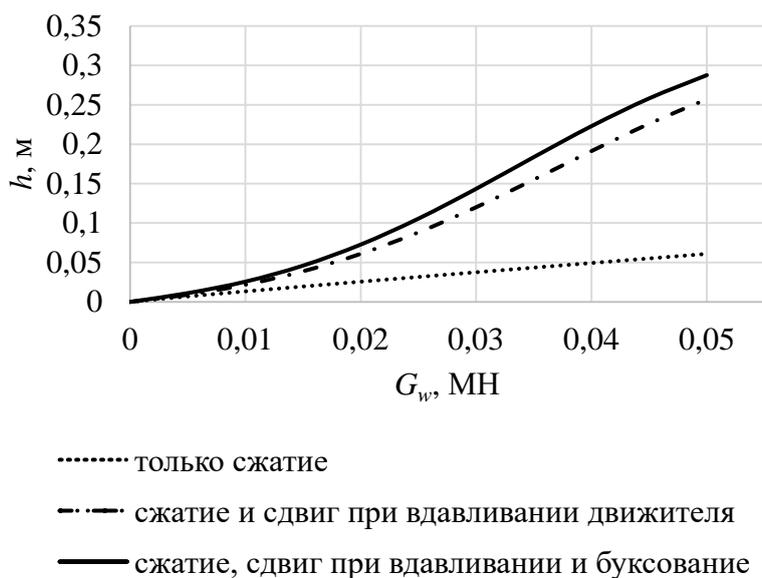


Рисунок 8. Составляющие расчётного значения глубины колеи, образующейся под воздействием колёсного движителя на почвогрунте средней прочности (II категория)

Figure 8. Components of the calculated sinkage of bearing forest soil (category II)

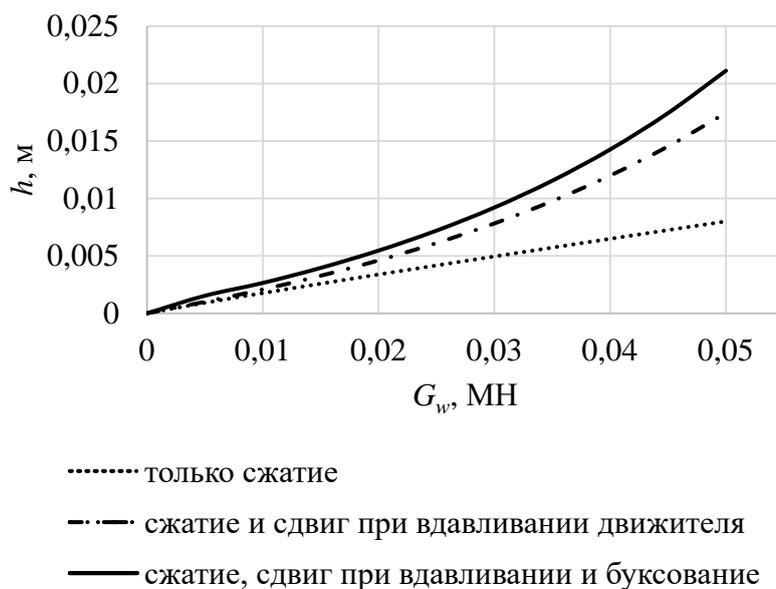


Рисунок 9. Составляющие расчётного значения глубины колеи, образующейся под воздействием колёсного движителя на прочном почвогрунте (I категория)

Figure 9. Components of the calculated sinkage of strong forest soil (category I)

По результатам расчёта установлено, что касательное напряжение при буксовании движителя на прочных почвогрунтах обуславливает до 34 % глубины образующейся колеи; в среднем 54 % глубины колеи обусловлено сжатием почвогрунта, 28 % — сдвигом слоёв почвогрунта при вдавливании движителя и 18 % — касательным напряжением, возникающим при буксовании.

4. Заключение

Анализ результатов расчётов показателей взаимодействия колёсного движителя с лесным почвогрунтом до начала среза слоёв почвогрунта, последующей потери колёсным движителем опорной проходимости с фрезерованием опорной поверхности грунтозацепами позволил сделать следующие выводы:

- Отклонение результирующей нагрузки со стороны движителя от нормали к опорной поверхности, при которой начинается срез слоёв почвогрунта, составляет 12—16°. Этот диапазон можно считать пределом, поскольку при большем коэффициенте буксования сопротивление сдвигу слабонесущего почвогрунта и почвогрунта средней прочности снижается, сопротивление прочного почвогрунта изменяется незначительно (рисунок 1).
- Отклонение результирующей нагрузки от нормали к опорной поверхности, вызванное буксованием движителя, приводит к снижению несущей способности лесного почвогрунта на 8,5—10,5 %.
- Вклад касательного напряжения, вызванного буксованием движителя на слабонесущих почвогрунтах, в глубину образующейся колеи может достигать 15 %; в среднем 37 % глубины колеи обусловлено сжатием почвогрунта, 55 % — сдвигом слоёв при вдавливании движителя, 8 % — буксованием.
- Касательное напряжение при буксовании движителя на почвогрунтах средней прочности обуславливает до 18 % глубины образующейся колеи; в среднем 34 % глубины колеи обусловлено сжатием почвогрунта, 51 % — сдвигом слоёв почвогрунта при вдавливании движителя и 15 % — касательным напряжением, возникающим при буксовании.
- Касательное напряжение при буксовании движителя на прочных почвогрунтах обуславливает до 34 % глубины образующейся колеи; в среднем 54 % глубины колеи обусловлено сжатием почвогрунта, 28 % — сдвигом слоёв почвогрунта при вдавливании движителя и 18 % — касательным напряжением, возникающим при буксовании.

Список литературы

1. Божбов, В. Е. Повышение эффективности процесса трелёвки путём обоснования рейсовой нагрузки форвардеров: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.21.01. Архангельск: САФУ, 2015. 20 с.
2. Porsinsky T., Pentek T., Bosner A., Stankic I. Ecoefficient timber forwarding on lowland soft soils // In Global Perspectives on Sustainable Forest Management. Okia C. A., Ed. InTech: Rijeka, Croatia, 2012. P. 69—79.

3. *Jarkko L.* Design parameter analysis of the bogie track surface pressure in peatland forest operations. Master of Science Thesis. Tampere, 2013. 73 p.
4. *Хахина А. М.* Методы прогнозирования и повышения проходимости колёсных лесных машин: Дис... д-ра техн. наук: 05.21.01. Архангельск: С(А)ФУ, 2018. 318 с.
5. *Ларин В. В.* Методы прогнозирования и повышения опорной проходимости многоосных колёсных машин на местности: Дис. д-ра ... техн. наук: 05.05.03. М., 2007. 530 с.
6. *Агейкин Я. С.* Проходимость автомобилей. М.: Машиностроение, 1981. 232 с.
7. *Khitrov E., Andronov A., Iliushenko D., Kotenev E.* Comparing approaches of calculating soil pressure of forestry machines // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 19. 2019. Vol. 19, Issue 3.2. P. 649—655.
8. *Saarilahti M.* Modelling of the wheel and tyre. Tyre and soil contact — Survey on tyre contact area and ground pressure models for studying the mobility of forest tractors. Helsinki, 2002, Soil interaction model, Appendix Report No. 5. P. 1—43.
9. *Григорьев И. В.* Снижение отрицательного воздействия на почву колёсных трелёвочных тракторов обоснованием режимов их движения и технологического оборудования. СПб.: СПбГЛТА, 2006.
10. *Khitrov E. G., Andronov A. V., Martynov B. G., Spiridonov S. V.* Interrelations of various soil types mechanical properties // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1177. 2019. 012032. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1177/1/012032>.
11. *Kochnev A., Khitrov E.* Theoretical models for rut depth evaluation after a forestry machine's wheel passover // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 18. 2018. P. 1005—1012.
12. *Песков В. Б.* Совершенствование моделей для оценки колеобразования и уплотнения почвогрунтов под воздействием движителей колёсных лесных машин: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.21.01. Архангельск: С(А)ФУ, 2018. 20 с.
13. *Ivanov V., Stepanishcheva M., Khitrov E., Iliushenko D.* Theoretical model for evaluation of tractive performance of forestry machine's wheel // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 18. 2018. P. 997—1004.

References

1. *Bozhbov V. E.* Povyshenie effektivnosti processa trelevki putem obosnovaniya rejsovoj nagruzki forvarderov: Avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.21.01 [Increasing skidding process efficiency by justifying wheeled forwarders' workload]. Arhangel'sk: SAFU, 2015. 20 p. (In Russ.)
2. *Porsinsky T., Pentek T., Bosner A., Stankic I.* Ecoefficient timber forwarding on lowland soft soils // In Global Perspectives on Sustainable Forest Management. Okia C. A., Ed. InTech: Rijeka, Croatia, 2012. P. 69—79.
3. *Jarkko L.* Design parameter analysis of the bogie track surface pressure in peatland forest operations. Master of Science Thesis. Tampere, 2013. 73 p.
4. *Kkakhina A. M.* Metody prognozirovaniya i povysheniya prohodimosti kolesnyh lesnyh mashin: Dis... d-ra tekhn. nauk: 05.21.01 [Methods for predicting and increasing passability of wheeled forestry machines]. Arhangel'sk: S(A)FU, 2018. 318 s. (In Russ.)

5. *Larin V. V.* Metody prognozirovaniya i povysheniya opornoj prohodimosti mnogoosnyh kolesnyh mashin na mestnosti: Dis. d-ra ... tekhn. nauk: 05.05.03 [Methods for predicting and increasing the passability of multi-axle wheeled vehicles on the ground]. Moscow, 2007. 530 p. (In Russ.)
6. *Agejkin Ya. S.* Prohodimost' avtomobilej [Passability of vehicles]. Moscow: Mashinostroenie, 1981. 232 p. (In Russ.)
7. *Khitrov E., Andronov A., Iliushenko D., Kotenev E.* Comparing approaches of calculating soil pressure of forestry machines // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 19. 2019. Vol. 19, Issue 3.2. P. 649—655.
8. *Saarilahti M.* Modelling of the wheel and tyre. Tyre and soil contact — Survey on tyre contact area and ground pressure models for studying the mobility of forest tractors. Helsinki, 2002, Soil interaction model, Appendix Report No. 5. P. 1—43.
9. *Grigor'ev I. V.* Snizhenie otricatel'nogo vozdejstviya na pochvu kolesnyh trelevochnykh traktorov obosnovaniem rezhimov ih dvizheniya i tekhnologicheskogo oborudovaniya [Reducing the negative impact on the soil of wheeled skidders by substantiating their movement modes and technological equipment]. Sankt-Peterburg: SPbGLTA, 2006. (In Russ.)
10. *Khitrov E. G., Andronov A. V., Martynov B. G., Spiridonov S. V.* Interrelations of various soil types mechanical properties // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1177. 2019. 012032. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1177/1/012032>.
11. *Kochnev A., Khitrov E.* Theoretical models for rut depth evaluation after a forestry machine's wheel passover // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 18. 2018. P. 1005—1012.
12. *Peskov V. B.* Sovershenstvovanie modelej dlya ocenki koleeobrazovaniya i uplotneniya pochvogruntov pod vozdejstviem dvizhitelej kolesnyh lesnyh mashin: Avtoreferat dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.21.01 [Improving the models for assessing rutting and compaction of soil under the influence of movers of wheeled forestry machines]. Arhangel'sk: S(A)FU, 2018. 20 p. (In Russ.)
13. *Ivanov V., Stepanishcheva M., Khitrov E., Iliushenko D.* Theoretical model for evaluation of tractive performance of forestry machine's wheel // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 18. 2018. P. 997—1004.