

2. ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ЛЕСОЗАГОТОВОК

УДК 630*37

**М.М. Иготти, А.В. Андронов, Е.Г. Хитров, Н.Д. Горюнов,
Н.И. Трифонов**

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПНЕВМОКАТКОВОГО ДВИЖИТЕЛЯ С ПОЧВОГРУНТОМ

Введение. Колесная техника широко распространена на лесозаготовках и в лесном хозяйстве. По сравнению с гусеничной техникой, колесные лесные машины более маневренны и отличаются меньшей металлоемкостью, однако при их работе на почвогрунтах отмечается повышенное колеобразование, срез, уплотнение и иные виды повреждения опорной поверхности.

Многие ученые внесли вклад в изучение вопросов моделирования воздействия и снижения негативного влияния колесных машин на лесные почвогрунты, однако до настоящего времени не в полной мере проработаны математические модели и положения теории, раскрывающие характер взаимодействия перспективных средооащадящих движителей колесных лесных машин повышенной проходимости с почвогрунтами. В частности, практически не исследованы вопросы проходимости движителей-пневмокатков пониженного давления и повреждаемости почвогрунта под их воздействием.

На практике отсутствие законченного научного описания осложняет обоснование параметров и режимов работы движителей машин, оснащенных пневмокатками, совместимых с почвенно-грунтовыми условиями, что затрудняет подбор проходимой лесной техники. При этом спектр операций, для которых использование машин, оснащенных пневмокатковыми движителями, позволит повысить эффективность их выполнения, широк и не ограничивается только лесозаготовительными операциями в условиях почвогрунтов со сниженной несущей способностью. В качестве

проблемной области можем отметить, например, прокладку трасс линейных объектов, когда зачастую работы ведутся в условиях переувлажненных и заболоченных почвогрунтов с ограниченной возможностью маневра при прокладке трассы, что дополнительно подчеркивает важность тщательного обоснования параметров движителей техники, работающей на местности.

Цель исследования – сформулировать и реализовать математическую модель взаимодействия пневмокатковых движителей лесных машин с почвенно-грунтовыми опорными поверхностями и проанализировать функции колееобразования и тягово-сцепных свойств от параметров движителей и свойств почвогрунтов.

Методы исследования. Методической основой исследования послужили положения, доказанные в рамках научной школы «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства» [Хитров, 2020] и в работах ведущих отечественных ученых в области лесного хозяйства и лесозаготовительного производства. При разработке и реализации модели использованы методы математического моделирования, численные методы, проведен вычислительный эксперимент.

Постановка задачи. В качестве основы математической модели примем классическое уравнение для определения глубины колеи h , учитывающее в качестве механических характеристик почвогрунта модуль общей деформации E и несущую способность p_s , а в качестве характеристики воздействия – среднее давление p по площади контакта [Агейкин, 1981; Хитров, 2020]:

$$h = \frac{p_s}{p_s - p} \frac{Jp}{E\sqrt{(1 - Jp/E)ax_2}} \arctg \frac{(H - h)ax_2}{\sqrt{(1 - Jp/E)ax_2}}. \quad (1)$$

Уравнение (1) дополняется формулами для расчета коэффициента формы пятна контакта J и коэффициента a для учета мощности слоя почвогрунта H [Агейкин, 1981]:

$$J = \frac{0,03 + x_1 / x_2}{0,6 + 0,43x_1 / x_2}, \quad (2)$$

$$a = 0,64(1 + x_2 / H),$$

а также системой формул для расчета несущей способности деформируемого лесного почвогрунта p_s [Ларин, 2007]:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_s = P_{s0} \alpha_z, \\ P_{s,0} = 0,5 J_1 B_1 N_1 x_2 \gamma + N_2 \gamma h + J_3 B_3 N_3 C, \\ J_1 = \frac{x_1}{x_1 + 0,4 x_2}, \quad J_3 = \frac{x_1 + x_2}{x_1 + 0,5 x_2}, \\ B_1 = \frac{\pi - 4\beta \operatorname{tg} \varphi}{\pi + 4\beta \operatorname{tg} \varphi}, \quad B_3 = \frac{3\pi - 2\beta}{3\pi + 2\beta}, \\ N_1 = \frac{1 - \Pi^4}{\Pi^5}, \quad N_2 = \frac{1}{\Pi^2}, \quad N_3 = \frac{2 \cdot (1 + \Pi^2)}{\Pi^3}, \quad \Pi = \operatorname{tg} \frac{\pi - 2\varphi}{4}, \\ \frac{\sqrt{2}}{2} x_2 \operatorname{tg} \varphi \cos \frac{3\varphi}{4} \exp \left[\left(\frac{\pi}{4} + \frac{3\varphi}{4} \right) \operatorname{tg} \frac{3\varphi}{4} \right], \\ \alpha_z = 1 + h \cdot \frac{\frac{\sqrt{2}}{2} x_2 \operatorname{tg} \varphi \cos \frac{3\varphi}{4} \exp \left[\left(\frac{\pi}{4} + \frac{3\varphi}{4} \right) \operatorname{tg} \frac{3\varphi}{4} \right]}{2 \frac{H}{\cos \beta} \cdot \left(\frac{H}{\cos \beta} - h - 0,25 \frac{\sqrt{2}}{2} x_2 \operatorname{tg} \varphi \cos \frac{3\varphi}{4} \exp \left[\left(\frac{\pi}{4} + \frac{3\varphi}{4} \right) \operatorname{tg} \frac{3\varphi}{4} \right] \right)}, \end{array} \right. \quad (4)$$

где β – уклон поверхности почвогрунта, C , φ , γ – удельное сцепление, угол внутреннего трения и объемный вес почвогрунта соответственно, x_1 , x_2 – параметры пятна контакта, соответствующие большему и меньшему измерению, что важно учитывать при расчете параметров контакта J , J_1 , J_2 ввиду повышенной, по сравнению со стандартной шиной, шириной пневмокаткового движителя.

$$x_1 = \max \{b; l\}, \quad x_2 = \min \{b; l\}, \quad (5)$$

где b – ширина пятна контакта (измерение в поперечном направлении по отношению к направлению движения машины), l – длина пятна контакта (измерение в продольном направлении).

Ширина пятна контакта b принимается как:

$$b = B, \quad (6)$$

где B – ширина пневмокатка.

В формулах (2)–(6) и, как следствие, уравнении (1) используется величина длины пятна контакта l , причем с операцией выбора (5), определение которой для эластичного колесного движителя представляет собой нетри-

виальную вычислительную задачу: в уравнении для l присутствуют иско-
мое значение глубины колеи h и прогиб шины h_z :

$$l = \sqrt{D \cdot h_z - h_z^2} + \sqrt{D \cdot (h + h_z) - (h + h_z)^2}, \quad (7)$$

где D – диаметр колеса, h_z – прогиб шины.

Прогиб шины h_z находится по формуле [Гуськов и др., 2019]:

$$h_z = \frac{w}{2\pi p_w \sqrt{r_0 r_c}}, \quad (8)$$

где w – вес движителя, p_w – внутреннее давление в шине, r_0 – радиус коле-
са, r_c – статический радиус шины. Две последние величины определяют по
формулам:

$$r_0 = D/2, \quad (9)$$

$$r_c = \sqrt{BH_T / \pi}, \quad (10)$$

где H_T – высота шины.

Существенным отличием математической модели, реализуемой в иссле-
довании, от рассмотренных ранее является учет повышенной податливости
пневмокатка сверхнизкого давления (по сравнению со стандартной). Для это-
го принимается во внимание не только высота H_T и внутреннее давление p_w ,
но и распределение давления p по пятну контакта [Гуськов и др., 2019]:

$$p = \frac{K_2}{K_1} \cdot \frac{w}{F_k}, \quad (11)$$

где F_k – площадь пятна контакта:

$$F_k = \pi / 4 bl, \quad (12)$$

K_2 – коэффициент продольной неравномерности распределения давления,
 $K_2 = 1,5$, K_1 – коэффициент, зависящий от диаметра шины, выражение ко-
торого получено в результате приближения данных [Гуськов и др., 2019]:

$$K_1 = 1,261D^{-0,328}. \quad (13)$$

При помощи аппроксимации справочных данных [Андронов и др.,
2013] получим приближенное выражение для внутреннего давления:

$$p_w = -0,00149 + 4,2432[w]. \quad (14)$$

Анализ формул (1)–(14) показывает, что при заданных механических
параметрах почвогрунта E , C , φ , γ , H и движителя D , B , H_T , w , p_w либо

$p_w(w)$ по (14), K_2 уравнение (1) разрешимо численно относительно глубины колеи h ; таким образом, при ограничении глубины колеи [Хитров, 2020]:

$$h \leq h_{\text{lim}} = 0,2 \text{ м}, \quad (15)$$

математическая модель позволяет прогнозировать экологичность пневмокаткового движителя сверхнизкого давления в заданных почвенно-грунтовых условиях.

Более того, численное решение (1) относительно h , с учетом результатов промежуточных вычислений при реализации модели, позволяет установить функцию среднего давления $p(h)$, которая используется при расчете силы сопротивления деформируемого почвогрунта движению машины F_R и коэффициента сопротивления движению φ_R [Агейкин, 1981; Хитров, 2020]:

$$\varphi_R = \frac{F_R}{w} = \frac{b}{w} \int_0^h p(h) dh. \quad (16)$$

Для завершения оценки опорной проходимости пневмокаткового движителя потребуется вычислить силу $F_{\text{сн}}$ и коэффициент сцепления μ_T с поверхностью почвогрунта [Агейкин, 1981; Хитров, 2020]:

$$\mu_T = \frac{F_{\text{сн}}}{w} = \frac{1}{w} b \int_0^l \tau(x) dx, \quad (17)$$

где $\tau(x)$ – функция касательного напряжения, распределенного вдоль поверхности контакта. С учетом механических свойств почвогрунта функция вводится следующим образом [Агейкин, 1981; Хитров, 2020]:

$$\tau(x) = \frac{1}{\frac{1}{p \operatorname{tg} \varphi + \xi C \mathbf{I}(\xi)} + \frac{t_{\text{тр}}}{Gj(x)}}. \quad (18)$$

где G – модуль сдвига почвогрунта, $j(x)$ – сдвиговая деформация почвогрунта вдоль пятна контакта:

$$j(x) = Sx, \quad (19)$$

где S – коэффициент буксования движителя (для колесных лесных машин допустимо принять как входной параметр $S = 0,20$).

В формуле (18) используется индикаторная функция:

$$\mathbf{I}(\xi) = \begin{cases} 1, & \xi > 0, \\ 0, & \xi \leq 0, \end{cases} \quad (20)$$

физический смысл использования которой в данном случае заключается в учете ослабления почвогрунта на сдвиг при развивающемся срезе. Выражение для аргумента функции ξ [Агейкин, 1981; Хитров, 2020]:

$$\xi = 1 - \frac{j(x) - j_0}{t_{zp}} \mathbf{I}(j(x) - j_0), \quad (21)$$

где t_{zp} – шаг грунтозацепов (определяется конструкцией движителя, входной параметр математической модели), j_0 – допустимое значение сдвиговой деформации почвогрунта, заключенного между грунтозацепами, не приводящее к развитию среза [Агейкин, 1981; Хитров, 2020]:

$$j_0 = (p \operatorname{tg} \varphi + C) \frac{t_{zp}}{G} \sqrt{\frac{G}{C}} - 1. \quad (22)$$

Согласно формулам (17)–(22), до определенного момента сцепление движителя с почвогрунтом μ_T обусловлено как связностью C , так и фрикционными свойствами частиц φ , после – только внутренним трением частиц почвогрунта с параметром φ .

При вычисленных значениях коэффициентов сопротивления и сцепления φ_R , μ_T критерием опорной проходимости является значение коэффициента тяги φ_P [Агейкин, 1981; Хитров, 2020]:

$$\varphi_P = \mu_T - \varphi_R > \varphi_{P,\lim}, \quad (23)$$

где $\varphi_{P,\lim}$ – пороговое значение, определяемое уклоном почвогрунта, возможностью преодоления обособленных препятствий, требуемой силой тяги и пр.

Будем рассматривать два случая. Для лесного почвогрунта в целом, когда нет необходимости учитывать наличие дернового слоя (например, когда его мощность существенно меньше прогнозируемой глубины колеи (слой слишком тонок), либо слой отличается сравнительно невысокой прочностью), на основе обработки данных [Хитров, 2020] запишем:

$$C = 0,011E^{0,703}, \quad (24)$$

$$\varphi = 13,559E^{0,169}, \quad (25)$$

$$H = 0,462E^{-0,571}, \quad (26)$$

$$G = 0,518E^{0,385}, \quad (27)$$

$$\gamma = 0,018E^{0,053}, \quad (28)$$

$$\rho = 1,842E^{0,053}. \quad (29)$$

Во втором случае почвогрунт отличается наличием мощного дернового слоя. На основе обработки данных [Агейкин, 1981] для дернового слоя лесного почвогрунта получим:

$$C = 0,031E^{0,873}, \quad (30)$$

$$\varphi = 17,948E^{0,248}, \quad (31)$$

$$H = 0,390E^{0,384}, \quad (32)$$

$$G = 0,970E^{0,537}, \quad (33)$$

$$\gamma = 0,016E^{0,016}, \quad (34)$$

$$\rho = 1,623E^{0,016}, \quad (35)$$

Для удобства практического использования результатов приведем их относительно сопротивления почвогрунта вдавливанию стандартного конического зонда q_c – характеристики прочности почвогрунта, которую возможно измерить непосредственно в полевых условиях. Согласно [Rohani, Baladi, 1981], выражение для q_c следующее:

$$q_c = -\frac{C}{\operatorname{tg} \varphi} + \Theta \frac{24G^m (\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \varphi)(1 + \sin \varphi) \operatorname{tg} \alpha}{d^2 \gamma^2 (m-2)(m-3)(3 - \sin \varphi) \operatorname{tg}^3 \varphi}, \quad (36)$$

где обозначено:

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

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

где α – угол заточки конуса (60°), L – высота конической части зонда (31 мм), d – диаметр основания конуса зонда (35,7 мм), Z – глубина вдавливания зонда (0,2 м), γ – удельный вес почвогрунта. После подстановки выражений для механических свойств почвогрунта и мощного дернового слоя в формулу (36) получены расчетные данные, практически точно приближаемые линейными функциями модуля деформации E :

$$q_c^* = 0,290 + 2,373E, \quad (37)$$

$$q_c = 0,158 + 4,527E. \quad (38)$$

Обратим внимание, что выражения для сопротивления зондированию (37)–(38) на практике позволяют оперативно интерпретировать результаты

моделирования, поскольку затраты времени и трудоемкость испытания почвогрунта зондированием существенно ниже, чем при определении прочих механических параметров, что критически важно в полевых условиях.

Параметры движителя-пневмокатка Firestone 55x50-26 в нашем исследовании приняты по [Андронов и др., 2013].

Результаты исследования. Трудоемкость реализации составленной математической модели состоит в необходимости многократного численного решения уравнения (1) относительно глубины колеи h при определении функции давления $p(h)$, требующейся для оценки ключевого показателя при прогнозе проходимости движителя – коэффициента сопротивления движению φ_R по (16). В связи с этим для проведения вычислительного эксперимента по обоснованию допустимых параметров пневмокаткового движителя сверхнизкого давления была специально разработана программа, имплементирующая математическую модель в виде класса на языке программирования Python. Выбор языка и среды разработки связан с открытой лицензией на использование в образовательных и научных целях, а также наличием развитой базы библиотек для численного разрешения возникающих математических задач.

Реализация математической модели выполнена при варьировании модуля общей деформации почвогрунта E в пределах от 0,1 до 1,1 МПа, что охватывает сложные (слабонесущий почвогрунт III категории) и особо сложные (лесной почвогрунт IV категории) условия работы техники. Расчеты проведены для двух случаев:

- лесной почвогрунт без учета возможного наличия мощного дернового покрова (на графиках «Почвогрунт*»), что традиционно для реализации математических моделей взаимодействия движителей техники с опорными поверхностями в рамках научной специальности; механические свойства лесного почвогрунта приближены функциями от модуля общей деформации (24)–(29);
- лесной почвогрунт при наличии мощного дернового покрова, существенно влияющего на показатели проходимости и колееобразования (на графиках «Слой дерна + грунт»), что при теоретических исследованиях учитывается сравнительно реже ввиду неполноты справочной информации по свойствам дерна и сложностей вычислительного характера; в нашей работе справочные данные дополнены приближенными зависимостями механических свойств слоя дерна от модуля общей деформации (30)–(35).

В свою очередь, выполнение вычислений в требуемом объеме и с учетом сложности структуры математической модели в обоих случаях обеспечено за счет использования современных высокопроизводительных инструментов при программной реализации модели в виде класса Python.

Результаты расчетов показывают, что для пневмокатковых движителей на лесных почвогрунтах III категории («классические» слабонесущие лесные почвогрунты) фактором, ограничивающим вес движителя, является грузоподъемность шины при внутреннем давлении по (14). Для движителя со стандартными параметрами ограничение веса по грузоподъемности отмечается при параметрах почвогрунта, близких ко II категории (лесные почвогрунты средней прочности). Результаты расчетов проиллюстрированы на рис. 1, 2 (на рисунках здесь и далее «Станд.» обозначена стандартная шина лесных машин 700/45, «Сверхн.» обозначена шина сверхнизкого давления на примере Firestone 55x50-26, символ «*» относится к лесному почвогрунту без мощного верхнего дернового слоя).

Как и в случае оценки экологичности движителя, отмечается, что, начиная с определенных оценок механических свойств почвогрунта, ограничение веса по грузоподъемности шины наступает раньше, чем ограничение по опорной проходимости.

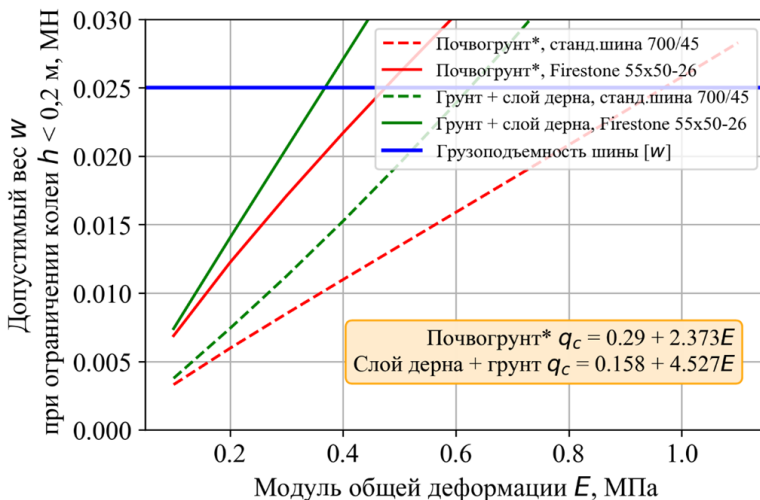


Рис. 1. Допустимый вес движителя, ограниченный глубиной колеи (0,2 м)

Fig. 1. Vehicle weight limited by the track depth (0.2 m)

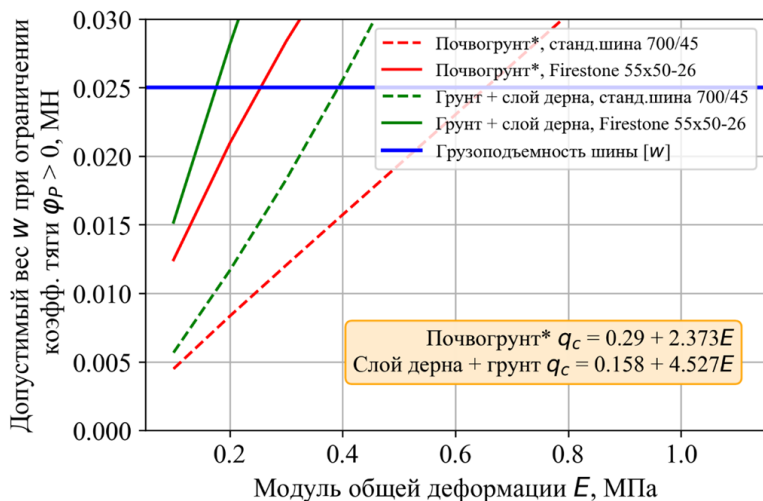


Рис. 2. Допустимый вес движителя, ограниченный оценкой опорной проходимости (положительный коэффициент тяги)

Fig. 2. Vehicle weight limited by the estimated cross-country ability (positive drawbar-pull coefficient value)

В результате обработки расчетных данных получены следующие формулы для практической оценки допустимого веса движителя, ограниченного глубиной колеи $[w]_h$ и критерием опорной проходимости $[w]_p$. Для шины со стандартными параметрами вес движителя, работающего на лесных почвогрунтах, без учета влияния дернового покрова, следует ограничить с учетом механических свойств опорной поверхности:

$$\begin{cases} [w]_h = 0,0010 + 0,0248E, \\ [w]_p = 0,0011 + 0,0364E. \end{cases} \quad (39)$$

Ограничение (39) действует для почвогрунтов с модулем общей деформации до 0,97 МПа (II категория прочности), далее вес ограничен грузоподъемностью шины. При тех же параметрах шины, но при наличии мощного дернового слоя, укрепляющего поверхность движения, вес ограничен значениями по формулам:

$$\begin{cases} [w]_h = 0,0040 + 0,0429E, \\ [w]_p = 0,0148 + 0,0436E. \end{cases} \quad (40)$$

Ограничение (40) действует для почвогрунтов с модулем общей деформации менее 0,49 МПа (III категория прочности), на более прочных почвогрунтах вес ограничен грузоподъемностью шины.

Для пневмокаткового движителя установлено, что вес, при котором соблюдается ограничение по глубине колеи и выполнен критерий опорной проходимости, ограничен значениями по формулам:

$$\begin{cases} [w]_h = -0,0022 + 0,0450E, \\ [w]_p = 0,0030 + 0,0561E. \end{cases} \quad (41)$$

Ограничение (41) действительно для лесных почвогрунтов с модулем общей деформации менее 0,60 МПа (ориентировочно соответствует III категории прочности). В случае, если лесной почвогрунт «укреплен» слоем дерна, ограничение имеет вид:

$$\begin{cases} [w]_h = 0,0007 + 0,0660E, \\ [w]_p = 0,0249 + 0,0407E \end{cases} \quad (42)$$

и должно соблюдаться для почвогрунтов с модулем общей деформации до 0,27 МПа (IV категория прочности). При больших оценках прочности и механических свойств вес движителя сверхнизкого давления ограничивается грузоподъемностью шины.

Во всех рассмотренных случаях допустимое значение веса w в первую очередь связано с глубиной образующейся колеи h . При этом движитель обладает определенным «запасом» оценки коэффициента тяги φ_p . С технологической точки зрения это обстоятельство представляется благоприятным, поскольку на пути движения машины вероятно наличие обособленных препятствий, преодоление которых возможно при соблюдении условия (23) при $\varphi_{p,\text{lim}} \neq 0$. На рис. 3–5 проиллюстрированы сводные данные по рассчитанным коэффициентам для каждого из исследованных случаев.

В результате обработки расчетных данных установлены функции тягово-сцепных свойств движителя при весе w , ограниченном глубиной колеи 0,2 м либо, для более прочных опорных поверхностей, грузоподъемностью шины.

Для стандартных шин лесных машин коэффициент сопротивления движению φ_R и коэффициент сцепления μ_T связаны с модулем общей деформации E лесного почвогрунта без прочного дернового слоя:

$$\begin{cases} \varphi_R = 0,2185 + 0,083E - 0,0836E^2, \\ \mu_T = 0,3322 + 0,0677E - 0,0154E^2, \end{cases} \quad (43)$$

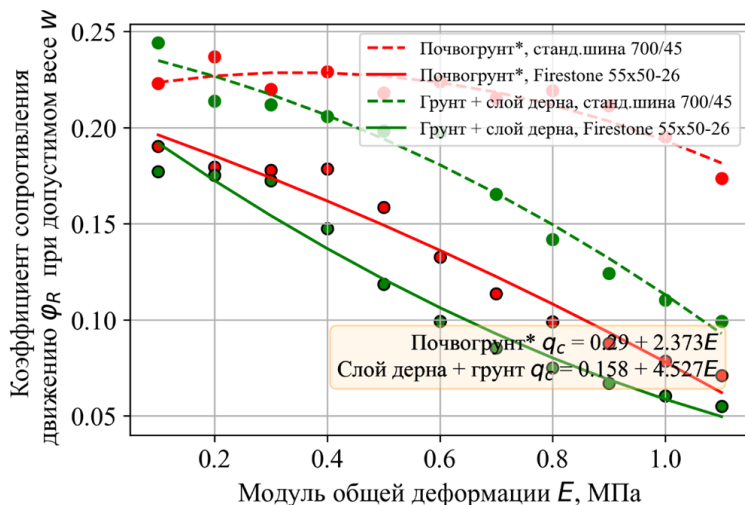


Рис. 3. Коэффициент сопротивления движению при весе движителя, ограниченном глубиной колеи (0,2 м)

Fig. 3. Rolling resistance coefficient for the vehicle weight limited by the rut depth (0.2 m)

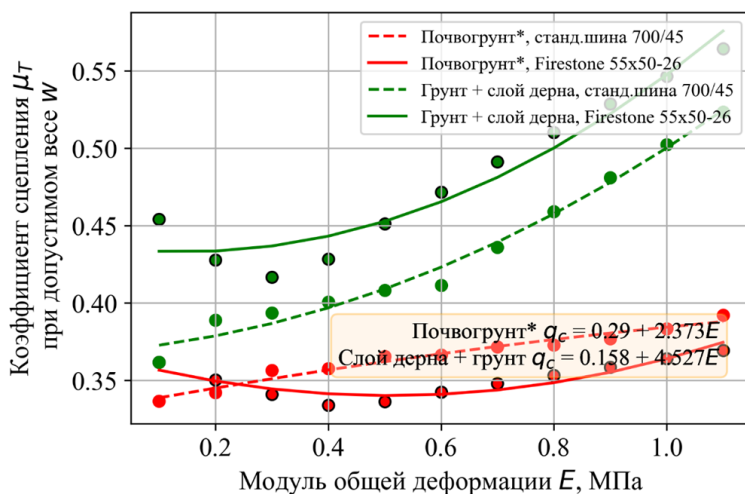


Рис. 4. Коэффициент сцепления при весе движителя, ограниченном глубиной колеи (0,2 м)

Fig. 4. Net thrust coefficient for the vehicle weight limited by the rut depth (0.2 m)

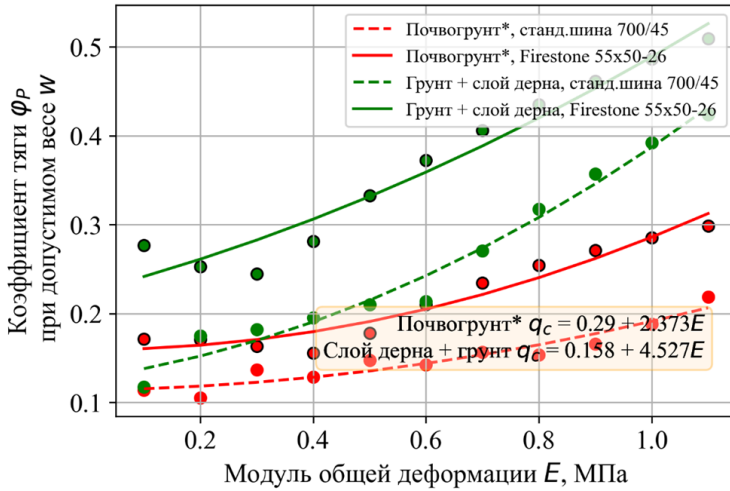


Рис. 5. Коэффициент тяги при весе движителя, ограниченном глубиной колеи (0,2 м)

Fig. 5. Drawbar-pull coefficient for the vehicle weight limited by the rut depth (0.2 m)

при этом коэффициент тяги:

$$\varphi_p = 0,1137 + 0,0093E + 0,0682E^2. \quad (44)$$

Те же величины, но при наличии мощного дернового слоя, связаны с модулем общей деформации E :

$$\begin{cases} \varphi_R = 0,2065 - 0,1005E - 0,0279E^2, \\ \mu_T = 0,3657 - 0,1002E + 0,0985E^2, \end{cases} \quad (45)$$

$$\varphi_p = 0,1592 + 0,0003E + 0,1264E^2. \quad (46)$$

Коэффициенты сопротивления движению φ_R и коэффициент сцепления μ_T , рассчитанные для случая работы пневмокаткового движителя сверхнизкого давления, вес которого ограничен расчетным значением глубины колеи $h = 0,2$ м либо грузоподъемностью шины, связаны с модулем общей деформации E лесного почвогрунта без прочного дернового слоя формулами:

$$\begin{cases} \varphi_R = 0,2416 - 0,0614E - 0,0672E^2, \\ \mu_T = 0,3688 + 0,0294E + 0,1019E^2 \end{cases} \quad (47)$$

при этом коэффициент тяги:

$$\Phi_p = 0,1272 + 0,0908E + 0,1691E^2. \quad (48)$$

Те же величины, но рассчитанные с учетом наличия прочного дернового слоя, определяются формулами:

$$\begin{cases} \Phi_R = 0,2124 - 0,2114E + 0,0577E^2, \\ \mu_T = 0,4364 - 0,0458E + 0,1567E^2, \end{cases} \quad (49)$$

$$\Phi_p = 0,2241 + 0,1656E + 0,0990E^2. \quad (50)$$

Сравнение результатов вычислительного эксперимента при реализации математической модели для стандартных шин и для пневмокатковых шин сверхнизкого давления показывает, что при допустимом весе движителя сцепление пневмокаткового движителя с почвогрунтом сопоставимо со сцеплением стандартного движителя, при этом коэффициент сопротивления движению в среднем снижается на 39%, а коэффициент тяги в среднем повышается на 43%.

Заключение.

1. Сформулирована и реализована математическая модель, прогнозирующая глубину колеи и опорную проходимость пневмокаткового движителя на лесном почвогрунте, учитывающая механические свойства и возможное наличие мощного слоя дерна, габариты и грузоподъемность движителя, а также специфику его конструкции, определяющую эластичность и параметры пятна контакта при расчете целевых показателей – колеобразования и опорной проходимости;

2. Результаты расчетов показали, что для пневмокатковых движителей на лесных почвогрунтах III категории («классические» слабонесущие лесные почвогрунты), а также более прочных поверхностях фактором, ограничивающим вес движителя, является грузоподъемность шины при внутреннем давлении по (14). Для движителя со стандартными параметрами ограничение веса по грузоподъемности отмечается при параметрах почвогрунта, близких ко II категории (лесные почвогрунты средней прочности) либо выше. Для менее прочных опорных поверхностей вес ограничивается значениями по формулам (39)–(42);

3. При соблюдении ограничений по глубине колеи и грузоподъемности движитель обладает «запасом» оценки коэффициента тяги; установлено, что его оценка является квадратичной функцией модуля общей деформации. С технологической точки зрения это обстоятельство

представляется благоприятным, поскольку на пути движения машины вероятно наличие обособленных препятствий, преодоление которых возможно при соблюдении условия (23). Для практики представлены формулы (43)–(50) для расчета коэффициента сопротивления движению, коэффициента сцепления и коэффициента тяги при указанных ограничениях веса движителя;

4. Сравнение результатов вычислительного эксперимента при реализации математической модели для стандартных шин и для пневмокатковых шин сверхнизкого давления показывает, что при допустимом весе движителя сцепление пневмокаткового движителя с почвогрунтом сопоставимо со сцеплением стандартного движителя, при этом коэффициент сопротивления движению в среднем снижается на 39%, а коэффициент тяги в среднем повышается на 43%.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Агейкин Я.С. Проходимость автомобилей. М.: Машиностроение, 1981. 232 с.
Андронов А.В., Валяжонков В.Д., Коваленко А.А., Ву Х.К. Эффективность применения пневмокатков на лесных трелевочных машинах // Вестник КрасГАУ. 2013. № 12 (87). С. 214-219.

Гуськов В.В., Поварехо А.С., Сушнев А.А., Шимукович В.И., Шишко П.А., Гапанович В.Н., Лысанович П.В. Исследование тягово-сцепных свойств колесного трактора при работе на переувлажненных землях // Агропанорама. 2019. № 5 (135). С. 8-12.

Ларин В.В. Методы прогнозирования и повышения опорной проходимости многоосных колесных машин на местности: дис. ... д-ра техн. наук. М., 2007. 608 с.

Хитров Е.Г. Комплексное обоснование параметров и режимов работы движителей лесных машин: дис. ... д-ра техн. наук. Архангельск, 2020. 319 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.

References

Ageykin Ya.S. Vehicle Cross-Country Performance. Moscow: Mashinostroenie, 1981. 232 p. (In Russ.)

Andronov A.V., Valyazhonkov V.D., Kovalenko A.A., Wu H.K. Efficiency of Using Pneumatic Rollers on Forest Skidding Machines. *Vestnik KrasSAU*, 2013, no. 12 (87), pp. 214-219. (In Russ.)

Guskov V.V., Povarekho A.S., Sushnev A.A., Shimukovich V.I., Shishko P.A., Gapanovich V.N., Lysanovich P.V. Study of the Traction and Adhesion Properties of a

Wheeled Tractor When Working on Waterlogged Lands. *Agropanorama*, 2019, no. 5 (135), pp. 8-12. (In Russ.)

Larin V.V. Methods for Predicting and Improving the Cross-Country Support Capability of Multi-Axle Wheeled Vehicles on Terrain. Diss. ... Dr. Tech. Sci. Moscow, 2007. 608 p. (In Russ.)

Khitrov E.G. Comprehensive Substantiation of the Parameters and Operating Modes of Forestry Machine Propellers. Diss. ... Dr. Tech. Sci. Arkhangelsk, 2020. 319 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.

Материал поступил в редакцию 03.03.2025

Игotti М.М., Андронов А.В., Хитров Е.Г., Горюнов Н.Д., Трифионов Н.И. Разработка и исследование математической модели взаимодействия пневмокаткового движителя с почвогрунтом // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2026. Вып. 257. С. 255–273. DOI: 10.21266/2079-4304.2026.257.255-273

Исследование направлено на изучение взаимодействия пневмокатковых движителей лесных машин с почвенно-грунтовыми опорными поверхностями со сниженной несущей способностью. При реализации составленной математической модели использованы методы математического моделирования, численные методы, проведен вычислительный эксперимент. Исследование показало, что для пневмокатковых движителей на лесных почвогрунтах III категории («классические» слабонесущие лесные почвогрунты), а также более прочных поверхностях фактором, ограничивающим вес движителя, является грузоподъемность шины. Для движителя со стандартными параметрами ограничение веса по грузоподъемности отмечается при параметрах почвогрунта, близких ко II категории (лесные почвогрунты средней прочности) либо выше. В результате обработки расчетных данных установлен линейный характер функций тягово-сцепных свойств движителя при весе, ограниченном глубиной колеи 0,2 м либо, для более прочных опорных поверхностей, грузоподъемностью шины. Установлено, что при соблюдении ограничений по глубине колеи и грузоподъемности движитель обладает запасом оценки коэффициента тяги; его оценка является квадратичной функцией модуля общей деформации грунта. С технологической точки зрения это обстоятельство благоприятно, поскольку на пути движения машины вероятно наличие обособленных препятствий. Для практики представлены формулы для расчета коэффициента сопротивления движению, коэффициента сцепления и коэффициента тяги при указанных ограничениях веса движителя. Сравнение

результатов вычислительного эксперимента при реализации математической модели для стандартных шин и для пневмокатковых шин сверхнизкого давления показало, что при допустимом весе движителя сцепление пневмокаткового движителя с почвогрунтом сопоставимо со сцеплением стандартного движителя, при этом коэффициент сопротивления движению в среднем снижается на 39%, а коэффициент тяги в среднем повышается на 43%.

Ключевые слова: коэффициент тяги, коэффициент сопротивления движению, глубина колеи, дерновый слой, лесные машины, колесный движитель.

Igotti M.M., Andronov A.V., Khitrov E.G., Goryunov N.D., Trifonov N.I. Development and study of mathematical model of pneumatic vehicle of a lower pressure and soil interaction. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2026, iss. 257, pp. 255–273 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2026.257.255-273

This study examines the interaction of pneumatic vehicles of a lower pressure of forestry machines with soil surfaces with reduced bearing capacity. Mathematical modeling and numerical methods were used to implement the developed mathematical model, and a computational experiment was conducted. The study showed that for pneumatic vehicles of a lower pressure on Category III forest soils (“classic” weak forest soils), as well as on more concrete surfaces, the tire bearing capacity is the limiting factor for the vehicle weight. For a standard-size tractor wheel, the bearing capacity weight limitation is observed for soil conditions close to Category II (medium-strength forest soils) or higher. Processing the calculated data revealed a linear function for the tractor's traction and thrust properties at a weight limited by a rut depth of 0.2 m or, for more durable soil surfaces, by the tire's bearing capacity. It was established that, while adhering to the rut depth and bearing capacity limitations, the tractor possesses drawbar-pull coefficient estimate that is a quadratic function of the soil deformation modulus. This is advantageous from a technological perspective, as the presence of isolated obstacles is likely along the vehicle's path. Formulae for calculating the rolling resistance coefficient, net thrust coefficient, and drawbar-pull coefficient for the specified tractor weight limitations are presented for practical purposes. Comparison of the results of the computational experiment implementing the model for standard forestry tires and low-pressure pneumatic tires showed that, with an acceptable vehicle weight, the drawbar-pull of the pneumatic vehicle on the soil is comparable to that of a standard one, while the rolling resistance coefficient decreases by an average of 39%, and the drawbar-pull coefficient increases by an average of 43%.

Key words: rolling resistance coefficient, drawbar-pull coefficient, rut depth, turf layer, forestry machines, wheeled vehicles.

ИГОТТИ Марта Михайловна – аспирант кафедры автоматизации, метрологии и управления в технических системах Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова.

194021, Институтский пер., д. 5, лит. У, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: m.igotti@mail.ru

IGOTTI Marta M. – PhD student, Department of Automation, Metrology and Management in Technical Systems, St.Petersburg State Forest Technical University.

194021. Institute per. 5. Let. U. St. Petersburg. Russia. E-mail: m.igotti@mail.ru

АНДРОНОВ Александр Вячеславович – доцент кафедры лесного машиностроения, сервиса и ремонта Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, доктор технических наук. SPIN-код: 8345-3722. ORCID: 0000-0002-1035-9231.

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

ANDRONOV Aleksandr V. – DSc (Technical), Associate Professor, Department of Forestry Machinery, Service and Repair, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 8345-3722. ORCID: 0000-0002-1035-9231.

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

ХИТРОВ Егор Германович – доцент Высшей школы программной инженерии Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, доктор технических наук. SPIN-код: 4663-5944. ORCID: 0000-0003-4569-9508.

195251, ул. Политехническая, д. 29, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: hitrov_eg@spbstu.ru

KHITROV Egor G. – DSc (Technical), Associate Professor, Higher School of Software Engineering, Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University. SPIN-code: 4663-5944. ORCID: 0000-0003-4569-9508.

195251. Politekhnikeskaya str. 29. St. Petersburg. Russia. E-mail: hitrov_eg@spbstu.ru

ГОРЮНОВ Никита Дмитриевич – студент Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова. SPIN-код: 7752-2049.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия.

GORYUNOV Nikita D. – student, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 7752-2049.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia.

ТРИФОНОВ Никита Игоревич – студент Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова. SPIN-код: 6203-4329.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия.

TRIFONOV Nikita I. – student, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 6203-4329.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia.