

Научная статья

УДК 630*372/375

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-6-147-159

Моделирование процесса сцепления движителя с почвогрунтом с учетом шага грунтозацепов

Е.Г. Хитров¹, д-р техн. наук, доц.; ResearcherID: [R-8199-2016](https://orcid.org/0000-0003-4569-9508),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4569-9508>

И.С. Должиков², канд. техн. наук; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2738-0483>

О.А. Куницкая³, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [AAC-9568-2020](https://orcid.org/0000-0001-8542-9380),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>

В.П. Друзьянова⁴, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [AAG-2463-2019](https://orcid.org/0000-0001-5409-3837),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5409-3837>

Д.В. Болотин⁵, аспирант; ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4015-9661>

А.В. Андронов⁵, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [AAE-1491-2019](https://orcid.org/0000-0002-1035-9231),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1035-9231>

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, ул. Политехническая, д. 29, Санкт-Петербург, Россия, 195251; hitrov_eg@spbstu.ru

²Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, ул. 2-я Красноармейская, д. 4, Санкт-Петербург, Россия, 190005; idolzhikov222@mail.ru

³Арктический государственный агротехнологический университет, ш. Сергеляхское, 3-й км, д. 3, г. Якутск, Россия, 677007; ola.ola07@mail.ru

⁴Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, ул. Белинского, д. 58, г. Якутск, Россия, 677000; druzvar@mail.ru

⁵Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия, 191014; bolotin97@internet.ru, andronovalexandr@gmail.com

Поступила в редакцию 26.01.24 / Одобрена после рецензирования 19.04.24 / Принята к печати 22.04.24

Аннотация. Для эксплуатационных и защитных лесных массивов Российской Федерации характерно очень большое разнообразие природно-производственных условий, включая рельефные и почвенно-грунтовые. Эффективность работы лесных машин в различных природно-производственных условиях во многом зависит от их проходимости, которая является одним из важнейших эксплуатационных показателей. Прогнозированию опорной проходимости лесных машин под воздействием условий эксплуатации посвящено значительное количество теоретических и экспериментальных исследований, выполненных отечественными и зарубежными учеными. Анализ работ предшественников позволяет утверждать, что известные прогнозные модели либо не учитывают такой важный показатель движителей лесных машин, как шаг грунтозацепов, либо не раскрывают его влияние на сцепление движителя с почвогрунтом. Настоящая работа посвящена теоретическому решению данного вопроса. Предложены уточ-

© Хитров Е.Г., Должиков И.С., Куницкая О.А., Друзьянова В.П., Болотин Д.В., Андронов А.В., 2024

Статья опубликована в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии CC BY 4.0

нения к оценке коэффициента сцепления движителя лесной машины с почвогрунтом. Описан механизм затухания касательных напряжений, вызванных воздействием движителя лесной машины, причем затухание описывается нелинейными зависимостями. Рассмотрена оценка коэффициента сцепления, получаемая с учетом и без учета затухания сдвиговых деформаций вдоль пятна контакта. Расчеты показали, что оба этих варианта числовой оценки коэффициента сцепления согласуются и их относительные различия невелики. Важным нюансом является то, что по мере увеличения шага грунтозацепа оценки сцепления без учета затухания монотонно возрастают. Таким образом, для шага грунтозацепа последовала бы противоречивая рекомендация о его максимально возможном увеличении. Результаты, полученные с использованием предлагаемых формул, учитывающих затухание сдвиговых деформаций в почвогрунте, позволяют выделить диапазоны изменения шага, в которых отмечаются максимальные расчетные значения сцепления. Например, при коэффициенте буксования 0,05 максимум наблюдается при шаге в пределах 0,15–0,25 м. Таким образом, введение в математическую модель выражения, учитывающего затухание, дает возможность выявить качественно иной характер функции сцепления от шага и отметить оптимальную область его значений.

Ключевые слова: лесные машины, опорная проходимость, сдвиговые деформации, затухание деформаций, грунтозацепы, коэффициент сцепления движителя, буксование
Благодарности: Работа выполнена в рамках научной школы «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства» Арктического государственного агротехнологического университета, за счет гранта РНФ № 23-16-00092, <https://rscf.ru/project/23-16-00092/>.

Для цитирования: Хитров Е.Г., Должиков И.С., Куницкая О.А., Друзьянова В.П., Болотин Д.В., Андронов А.В. Моделирование процесса сцепления движителя с почвогрунтом с учетом шага грунтозацепов // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 6. С. 147–159. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-6-147-159>

Original article

Modeling the Process of Adhesion of the Propeller to the Soil Taking into Account the Pitch of the Grousers

*Egor G. Khitrov*¹, Doctor of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [R-8199-2016](https://orcid.org/0000-0003-4569-9508),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4569-9508>

Ilya S. Dolzhikov^{2✉}, Candidate of Engineering; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2738-0483>

*Olga A. Kunitskaya*³, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [AAC-9568-2020](https://orcid.org/0000-0001-8542-9380),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>

*Varvara P. Druzyanova*⁴, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [AAG-2463-2019](https://orcid.org/0000-0001-5409-3837),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5409-3837>

*Daniil V. Bolotin*⁵, Postgraduate Student; ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4015-9661>

*Aleksandr V. Andronov*⁵, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [AAE-1491-2019](https://orcid.org/0000-0002-1035-9231), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1035-9231>

¹Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, ul. Polytechnicheskaya, 29, St. Petersburg, 195251, Russian Federation; hitrov_eg@spbstu.ru

²Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, ul. 2-ya Krasnoarmeyskaya, 4, St. Petersburg, 190005, Russian Federation; idolzhikov222@mail.ru✉



³Arctic State Agrotechnological University, sh. Sergelyakhskoe, 3rd km, 3, Yakutsk, 677007, Russian Federation; ola.ola07@mail.ru

⁴M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, ul. Belinskogo, 58, Yakutsk, 677000, Russian Federation; druzvar@mail.ru

⁵Saint Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov, Institutskiy per., 5, St. Petersburg, 191014, Russian Federation; bolotin97@internet.ru, andronovalexandr@gmail.com

Received on January 26, 2024 / Approved after reviewing on April 19, 2024 / Accepted on April 22, 2024

Abstract. The operational and protective forests of the Russian Federation are characterized by a very wide variety of natural and industrial conditions, including relief and soil ones. The efficiency of forestry machines in various natural and industrial conditions largely depends on their cross-country ability, which is one of the most important performance indicators. A significant amount of theoretical and experimental research by Russian and foreign scientists has been devoted to forecasting the flotation of forestry machines under various operating conditions. An analysis of the work of the predecessors suggests that the known forecast models either do not take into account such an important indicator of forestry machine propellers as the pitch of the grousers, or do not reveal its influence on the propeller adherence to the soil. This work is devoted to the theoretical solution of this issue. Clarifications have been proposed to the estimation of the coefficient of adhesion of the forestry machine propeller to the soil. The mechanism of attenuation of tangential stresses caused by the action of the forestry machine propeller has been described, where attenuation has been described by nonlinear dependencies. An estimate of the coefficient of adhesion obtained with and without taking into account the attenuation of shear deformations along the contact patch has been considered. Calculations have shown that both of these options for numerical estimation of the coefficient of adhesion are consistent and their relative differences are small. An important detail is that as the pitch of the grousers increases, the adhesion estimates without taking into account damping increase monotonically. Thus, for the pitch of the grousers there would be a contradictory recommendation about its maximum possible increase. The results obtained using the proposed formulas, taking into account the attenuation of shear deformations in the soil, make it possible to identify the ranges of pitch variation in which the maximum calculated values of adhesion are noted. For example, with a slip coefficient of 0.05, the maximum is observed at a pitch within 0.15–0.25 m. Thus, the introduction of an expression into the mathematical model that takes into account attenuation makes it possible to reveal a qualitatively different nature of the adhesion function from the pitch of the grousers and mark the optimal range of its values.

Keywords: forestry machines, flotation, shear deformations, attenuation of deformations, grousers, coefficient of adhesion of the propeller, slip

Acknowledgements: The work was carried out within the framework of the scientific school “Innovative Developments in the Field of Logging Industry and Forestry” of the Arctic State Agrotechnological University, at the expense of the Russian Science Foundation grant no. 23-16-00092, <https://rscf.ru/project/23-16-00092/>.

For citation: Khitrov E.G., Dolzhikov I.S., Kunitskaya O.A., Druzyanova V.P., Bolotin D.V., Andronov A.V. Modeling the Process of Adhesion of the Propeller to the Soil Taking into Account the Pitch of the Grousers. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2024, no. 6, pp. 147–159. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-6-147-159>

Введение

Опорная проходимость является важнейшим критерием эффективности работы машины. Для лесных машин, в подавляющем большинстве случаев функционирующих в сложных условиях эксплуатации, проходимость напрямую влияет на производительность, расход топлива и возможность выполнения поставленной технологической задачи [6–9, 12].

Проходимость лесных машин также напрямую связана с их экологической эффективностью – степенью повреждения движителями лесных почвогрунтов и состоянием лесной экосистемы после воздействия лесных машин, включая способность к естественному лесовосстановлению [2, 10, 11, 13].

Исходя из того, что почво-грунтовые и рельефные условия могут существенно различаться даже в пределах одной лесосеки, с точки зрения оценки возможной проходимости лесных машин на практике осуществляют предварительное трассирование сети трелевочных волоков и технологических коридоров, как при сплошных рубках спелых и перестойных насаждений, так и при выборочных рубках, включая рубки ухода [4, 14, 15, 24].

Оценка опорной проходимости выполняется по коэффициенту тяги, представляющему собой разность коэффициентов сцепления и сопротивления движению. Положительное значение коэффициента тяги означает, что проходимость машины обеспечена. Известны различные модели, полученные как теоретически, так и экспериментально, описывающие свойства почвогрунта и позволяющие прогнозировать сцепление движителя машины с почвогрунтом [3, 16, 18, 19, 23, 25, 26]. При этом почти не представлены модели, дающие возможность проанализировать влияние такого параметра движителя, как шаг грунтозацепов, на сцепление.

Целью данной работы является уточнение теоретического описания сцепных свойств движителей лесных машин и изучение влияния шага грунтозацепов на коэффициент сцепления движителя с почвогрунтом.

Объектом данного теоретического исследования является модель взаимодействия движителей грунтозацепов с различным шагом с лесным почвогрунтом. Применялись численные методы решения уравнений и аппроксимации данных.

Результаты исследования и их обсуждение

С практической точки зрения хорошо зарекомендовали себя математические модели, прогнозирующие коэффициент сцепления движителя с почвогрунтом, полученные интегрированием выражения для касательного напряжения, вызванного сдвигом почвогрунта при поступательном движении машины [17, 21, 22].

Модели строятся следующим образом. По сцепным свойствам почвогрунта и среднему давлению движителя по пятну контакта определяют сопротивление сдвигу без учета ослабления почвогрунта, вызванного срезом [20, 25]:

$$\tau_0 = p \operatorname{tg} \varphi + C,$$

где p – среднее давление движителя по пятну контакта; φ – угол внутреннего трения грунта; C – удельное сцепление частиц грунта.

С учетом полученного значения τ_0 определяют деформацию сдвига, соответствующую началу среза почвогрунта [1]:

$$j_0 = \frac{\tau_0 t_{\text{гр}}}{E_1} \sqrt{\frac{E_1}{C}} - 1,$$

где $t_{\text{гр}}$ – шаг грунтозацепов; E_1 – модуль сдвига почвогрунта.

В зависимости от соотношения сдвиговой деформации j и j_0 рассчитывается коэффициент ослабления сцепных свойств почвогрунта [3, 19]:

$$\xi = 1 - \frac{j - j_0}{t_{\text{гр}}} \text{Heaviside}(j - j_0),$$

где Heaviside – единичная функция Хевисайда, доопределенная в нуле,

$$\text{Heaviside}(k) = \begin{cases} 1, & k \geq 0 \\ 0, & k < 0 \end{cases},$$

k – аргумент единичной функции.

В итоге с учетом ослабления грунта при развивающемся срезе определяется сопротивление почвогрунта сдвигу [1]:

$$\tau_1 = p \text{tg}\varphi + \xi C \text{Heaviside}\xi.$$

Распределение касательного напряжения вдоль пятна контакта задается формулой [1, 5]

$$\tau = \frac{1}{\frac{1}{\tau_1} + \frac{t_{\text{гр}}}{E_1 j}}.$$

Коэффициент сцепления по определению представляет собой отношение сопротивления почвогрунта сдвигу и нагрузки, приведенной к единичному движителю. При этом сопротивление находится интегрированием функции касательного напряжения вдоль пятна контакта [1, 4]:

$$\mu = \frac{F}{w} = \frac{1}{w} b \int_0^l \tau dx, \quad (1)$$

где F – сила сцепления; w – вес машины, приходящийся на единичный движитель; b – ширина пятна контакта; l – длина пятна контакта; x – горизонтальная координата.

В этом уравнении $\tau = \tau(x)$, причем для решения задачи необходимо принять функцию сдвиговой деформации вдоль пятна контакта. Считается, что деформация сдвига линейно зависит от координаты x и коэффициента буксования S [1, 16]:

$$j = Sx. \quad (2)$$

В данном случае интегрирование (1) при варьировании $t_{\text{гр}}$ приводит к получению зависимостей $\mu(t_{\text{гр}})$, монотонно возрастающих при увеличении $t_{\text{гр}}$. Таким образом, из результатов теоретического моделирования следует, что чем больше $t_{\text{гр}}$, тем выше оценка проходимости машины. В экспериментальных исследованиях изучить влияние $t_{\text{гр}}$ на μ сложно, поскольку, как правило, управлять его значением на практике не представляется возможным.

Предложим некоторые уточнения к теоретической оценке коэффициента сцепления μ .

Известно, что напряжения в массиве почвогрунта затухают, причем затухание описывается нелинейными зависимостями. Это обстоятельство учтено, например, при расчете глубины колеи, образующейся под воздействием движителя, введением поправочного коэффициента на затухание нормального напряжения по глубине массива почвогрунта [1, 20]:

$$J = \frac{1}{1 + \left(\frac{z}{ab}\right)^2},$$

где z – вертикальная координата; a – коэффициент, учитывающий геометрические параметры пятна контакта и толщину деформируемого слоя почвогрунта [1],

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

H – мощность деформируемого слоя почвогрунта.

В рассматриваемом случае воспользуемся следующими соображениями. Пусть деформация сдвига, вызванного воздействием i -го грунтозацепа, определяется по формуле

$$j_i = S \zeta_i (x - it_{\text{гр}}) \text{Heaviside}(x - it_{\text{гр}}),$$

где ζ_i – коэффициент затухания; i – индекс, соответствующий порядковому номеру грунтозацепа, участвующего в контакте движителя с почвогрунтом, и отсчитываемый вдоль пятна контакта, $i = 0 \dots N - 1$ ($i = 0$ для 1-го грунтозацепа, $i = N - 1$ для последнего), N – число грунтозацепов, участвующих в контакте движителя с грунтом, целая часть отношения:

$$N = \left[\frac{t_{\text{гр}}}{l} \right].$$

Введем коэффициент затухания для касательного напряжения по аналогии со случаем, рассмотренным при изучении глубины образующейся колеи:

$$\zeta_i = \frac{1}{1 + \left(\frac{x - it_{\text{гр}}}{ab}\right)^2}.$$

Для i -го грунтозацепа запишем:

$$j_i = S \frac{x - it_{\text{гр}}}{1 + \left(\frac{x - it_{\text{гр}}}{ab}\right)^2} \text{Heaviside}(x - it_{\text{гр}}). \quad (3)$$

Для гусеничного движителя можем принять $H \gg b$, тогда:

$$\zeta_i = \frac{1}{1 + \left(\frac{x - it_{\text{гр}}}{0,64b}\right)^2};$$

$$j_i = S \frac{x - it_{гр}}{1 + \left(\frac{x - it_{гр}}{0,64b}\right)^2} \text{Heaviside}(x - it_{гр}). \quad (4)$$

В формулах (3), (4) единичная функция Хевисайда учитывает координату i -го грунтозацепа вдоль пятна контакта, т. е. координату, соответствующую началу воздействия i -го грунтозацепа на почвогрунт.

Функцию сдвиговой деформации найдем как сумму деформаций, вызванных каждым из грунтозацепов, с учетом затухания:

$$j = \sum_{i=0}^{N-1} j_i. \quad (5)$$

Проиллюстрируем формулы (4), (5) графиками. На рис. 1 показано изменение сдвиговой деформации, вызванной воздействием i -го грунтозацепа движителя, по координате x вдоль пятна контакта. Пример рассчитан при $t_{гр} = 0,2032$ м, $b = 0,61$ м, $l = 3,81$ м (такие параметры соответствуют гусеничному движителю машины John Deere 959M), $S = 0,2$. При тех же исходных данных сравним результаты расчета сдвиговой деформации по модели (4), (5) и по линейной модели (2) (рис. 2).

Рис. 1. Деформация сдвига, вызванная i -м грунтозацепом, вдоль пятна контакта, $i = \{0; 1; 3; 7\}$

Fig. 1. The shear deformation caused by the i -th grouser along the contact patch, $i = \{0; 1; 3; 7\}$

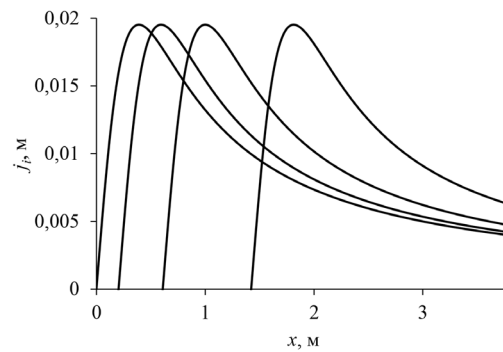
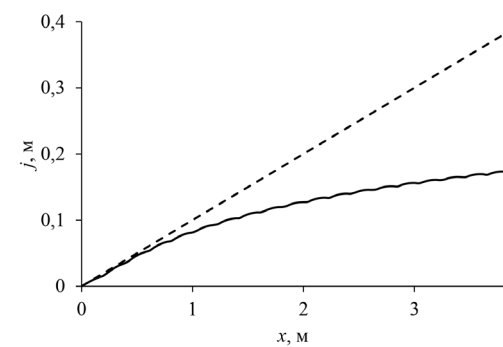


Рис. 2. Деформация сдвига, рассчитанная с учетом и без учета затухания вдоль пятна контакта (здесь и на рис. 3, 4: пунктирная линия – линейная функция (2); сплошная линия – функция с затуханием (4), (5))

Fig. 2. The shear deformation calculated with and without attenuation along the contact patch (here and in Fig. 3, 4: the dotted line is the linear function (2); the solid line is the function with attenuation (4), (5))



Рассмотрим влияние шага грунтозацепов $t_{гр}$ на сцепление движителя с почвогрунтом. Сравним оценки коэффициента сцепления μ , получаемые с учетом и без учета затухания сдвиговых деформаций j вдоль пятна контакта. Примем для иллюстрации среднее давление $p = 0,0724$ МПа, а также механические свойства грунта G, C, φ по таблице.

Сдвиговые свойства лесного почвогрунта по категориям прочности
The shear properties of forest soil by strength categories

Категория	C , МПа	φ , ...°	G , МПа
I (прочный)	0,0252	16,7	2,77
II (средней прочности)	0,0108	13,7	2,44
III (слабонесущий)	0,0053	11,6	2,19

На рис. 3 приведены результаты расчета коэффициента сцепления μ при варьировании шага $t_{гр}$ и различном коэффициенте буксования S .

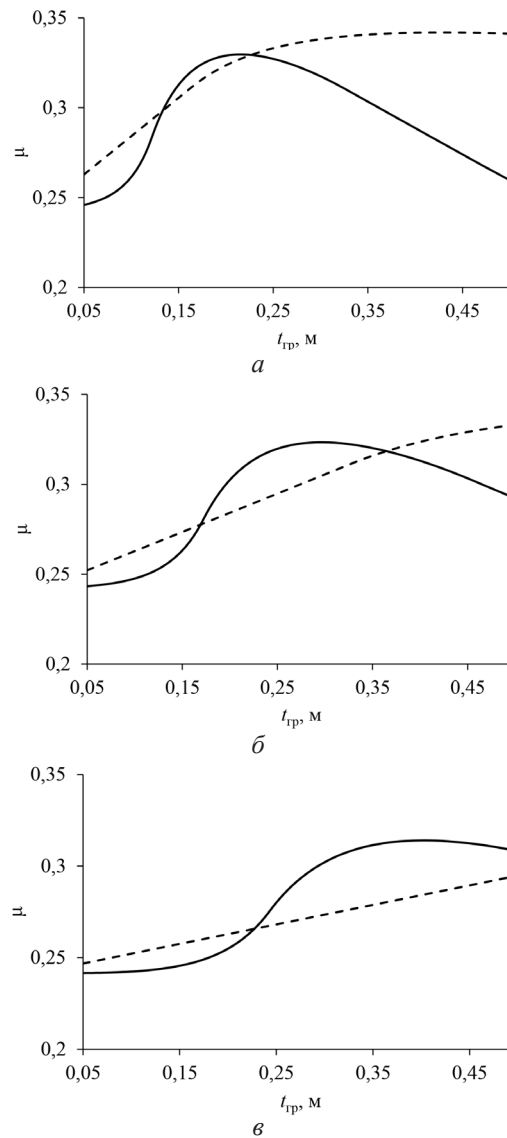


Рис. 3. Коэффициент сцепления в зависимости от шага грунтозацепов при коэффициенте буксования: $a - 0,05$; $\bar{b} - 0,10$; $\bar{в} - 0,20$

Fig. 3. The coefficient of adhesion, depending on the pitch of the grousers, at the slip coefficient equal to: $a - 0.05$; $\bar{b} - 0.10$; $\bar{в} - 0.20$

Расчеты показывают, что числовые оценки коэффициента сцепления μ с учетом и без учета затухания сдвиговой деформации в целом согласуются и их относительные различия невелики. Значения, полученные при различных предположениях к определению сдвиговых деформаций, вполне сопоставимы. Важ-

ным различием является то, что по мере увеличения $t_{гр}$ оценки μ , полученные без учета затухания – с использованием формулы (2), монотонно возрастают. Таким образом, для параметра $t_{гр}$ последовала бы рекомендация о максимально возможном увеличении.

Результаты, полученные с использованием формул (4), (5), учитывающих затухание сдвиговых деформаций в почвогрунте, позволяют выделить диапазоны изменения $t_{гр}$, в которых отмечаются максимальные расчетные значения μ . Например, при коэффициенте буксования $S = 0,05$ максимум μ наблюдается при $t_{гр}$ в пределах 0,15–0,25 м (рис. 3, а). При $S = 0,10$ – находится в области $t_{гр} = 0,20$ –0,30 м (рис. 3, б). Отметим, что эти результаты согласуются с шагом $t_{гр}$ гусениц, которыми производители оснащают технику. При $S = 0,20$ максимуму μ соответствует шаг $t_{гр}$ в пределах 0,30–0,40 м (рис. 3, в), хотя с практической точки зрения столь большой коэффициент буксования для гусеничной машины едва ли возможен, поскольку при таком значении ожидаема потеря опорной проходимости. Таким образом, введение в математическую модель выражения, учитывающего затухание, позволяет выявить качественно иной характер функции $\mu(t_{гр})$ и отметить оптимальную область значений $t_{гр}$.

До сих пор коэффициент S принимался как входной параметр модели. Однако на практике он не является управляемым параметром. Рассмотрим физическую суть коэффициента. По определению,

$$v = (1 - S)v_0,$$

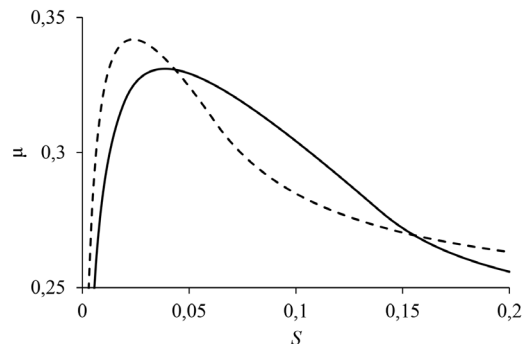
где v – фактическая скорость поступательного движения машины с учетом пробуксовки; v_0 – скорость машины, движущейся поступательно без буксования.

Таким образом, коэффициент буксования S представляет собой долю потери скорости машины.

С другой стороны, результаты расчетов показывают, что коэффициенты S и μ связаны. Рассчитаем μ при варьировании S с постоянным шагом $t_{гр} = 0,2032$ м. Значения остальных параметров гусеничного движителя и грунта (лесной почвогрунт II категории прочности) прежние (рис. 4).

Рис. 4. Коэффициент сцепления при различном коэффициенте буксования

Fig. 4. The coefficient of adhesion at different slip coefficients



В рассчитанном примере при $S = 0$ обе оценки $\mu = 0$ (на рис. 4 область $S < 0,01$ не показана). Максимальные μ отмечаются при $S = 0,024$ ($\mu = 0,342$) в случае использования линейной модели сдвиговой деформации (2) и при $S = 0,038$ ($\mu = 0,331$) в случае применения формул (4), (5).

Как было отмечено, критерием опорной проходимости является положительное значение коэффициента тяги φ_p :

$$\varphi_p = \mu - \varphi_r > 0,$$

где φ_r – коэффициент сопротивления поступательному движению машины.

Тогда в приведенном примере опорная проходимость гусеничной машины обеспечена вплоть до $\varphi_r < 0,331$. При большем сопротивлении движению произойдет срез почвогрунта, а глубина колеи увеличится за счет буксования машины на месте. При меньшем сопротивлении движению, например при $\varphi_r = 0,3$, проходимость обеспечивается при $\mu > 0,3$. Таким образом, коэффициент буксования составит $S \approx 0,014$. Коэффициент буксования S можно рассматривать как «меру ответной реакции» почвогрунта на касательное напряжение, вызванное двигателем, преодолевающим сопротивление движению.

Заключение

Выполненные расчеты показали, что числовые оценки коэффициента сцепления, полученные с учетом и без учета затухания сдвиговой деформации, согласуются и их относительные различия невелики. Однако важно отметить, что по мере увеличения шага грунтозацепа оценки сцепления без учета затухания монотонно возрастают. Таким образом, для шага грунтозацепа последовала бы рекомендация о его максимально возможном увеличении, что сомнительно с точки зрения физики процесса.

Результаты, полученные с использованием предлагаемых формул, принимающих во внимание затухание сдвиговых деформаций в почвогрунте, позволяют выделить диапазоны изменения шага, в которых отмечаются максимальные расчетные значения сцепления. Например, при коэффициенте буксования 0,05 максимум наблюдается при шаге в пределах 0,15–0,25 м. Таким образом, введение в математическую модель выражения, учитывающего затухание, позволяет выявить качественно иной характер функции сцепления от шага и отметить оптимальную область его значений.

В результате исследования сцепления с учетом буксования движителя можно заключить, что для уточнения оценки опорной проходимости лесных машин потребуются дальнейшие разработки. Следует развить модели, учитывающие как сопротивление почвогрунта образованию колеи, так и составляющую сопротивления движению, связанную с липкостью грунта. Это особенно важно для гусеничных машин – площадь пятна контакта гусеницы с почвогрунтом заметно больше, чем колеса.

При наличии верифицированных моделей, прогнозирующих сопротивление движению, станет возможным проведение дальнейших вычислительных экспериментов в области оптимизации параметров движителей лесных машин с учетом такого фактора, как шаг грунтозацепов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Агейкин Я.С. Проходимость автомобилей. М.: Машиностроение, 1981. 231 с.
Agejkin Ya.S. *Vehicle Cross-Country Ability*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981. 231 p. (In Russ.).

2. Базаров С.М., Григорьев И.В., Киселев Д.С., Никифорова А.И., Иванов А.В. Влияние деформации движителей колесно-гусеничных машин на их проходимость по лесосеке // Системы. Методы. Технологии. 2012. № 4(16). С. 36–40.

Bazarov S.M., Grigor'yev I.V., Kiselyov D.S., Nikiforova A.I., Ivanov A.V. Effect of Deformation of Wheel Caterpillar Vehicles Propelling Devices on Their Passability through Logging Area. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* = Systems. Methods. Technologies, 2012, no. 4(16), pp. 36–40. (In Russ.).

3. Герц Э.Ф., Куницкая О.А., Макуев В.А., Дмитриев А.С., Тихонов Е.А., Григорьева О.И. Средоадаптирующие технологии разработки лесосек в условиях Свердловской области // Деревообраб. пром-сть. 2023. № 1. С. 52–63.

Hertz E.F., Kunitskaya O.A., Makuev V.A., Dmitriev A.S., Tikhonov E.A., Grigoreva O.I. Environmental Technologies for the Development of Cutting Areas in the Sverdlovsk Region. *Derevoobrabatival'naya Promishlennost'* = Woodworking Industry, 2023, no. 1, pp. 52–63. (In Russ.).

4. Григорьев И.В. Снижение отрицательного воздействия на почву колесных трелевочных тракторов обоснованием режимов их движения и технологического оборудования. СПб.: СПбГЛТА, 2006. 235 с.

Grigor'yev I.V. *Reducing the Negative Impact of Wheeled Skidding Tractors on the Soil by Substantiating Their Movement Modes and Technological Equipment*. St. Petersburg, St. Petersburg Forestry Engineering Academy, 2006. 235 p. (In Russ.).

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.: ЛТА, 2008. 174 с.

Grigor'yev I.V., Zhukova A.I., Grigor'yeva O.I., Ivanov A.V. *Environmentally Friendly Technologies for Logging Development in the Conditions of the North-Western Region of the Russian Federation*. St. Petersburg, St. Petersburg Forestry Engineering Academy, 2008. 174 p. (In Russ.).

6. Луценко Е.В., Рябухин П.Б. К определению применимости систем лесосечных машин // Актуал. проблемы лесн. комплекса. 2006. № 16. С. 23–26.

Lutsenko E.V., Ryabukhin P.B. To Determining the Applicability of Logging Machine Systems. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa*, 2006, no. 16, pp. 23–26. (In Russ.).

7. Луценко Е.В., Рябухин П.Б. Динамика эффективности систем лесосечных машин в условиях Дальнего Востока // Актуал. проблемы лесн. комплекса. 2006. № 16. С. 26–28.

Lutsenko E.V., Ryabukhin P.B. Dynamics of Efficiency of Logging Machine Systems in the Conditions of the Far East. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa*, 2006, no. 16, pp. 26–28. (In Russ.).

8. Луценко Е.В., Рябухин П.Б. К определению путей перемещения трелевочных тракторов, работающих в комплексе с валочно-пакетирующей машиной // Актуал. проблемы лесн. комплекса. 2006. № 16. С. 28–31.

Lutsenko E.V., Ryabukhin P.B. To Determining the Ways of Movement of Skidding Tractors Operating in Combination with a Feller-Buncher Machine. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa*, 2006, no. 16, pp. 28–31. (In Russ.).

9. Луценко Е.В., Рябухин П.Б., Абраменко А.С. К решению вопроса повышения эффективности работы современных лесосечных машин // Вестн. ТОГУ. 2008. № 1(8). С. 183–188.

Lutsenko E.V., Ryabukhin P.B., Abramenko A.S. Towards Solving the Issue of Improving the Efficiency of Modern Logging Machines. *Vestnik Tikhookeanskogo gosudarstvennogo universiteta* = Bulletin of the Pacific National University, 2008, no. 1(8), pp. 183–188. (In Russ.).

10. Майорова Л.П., Рябухин П.Б. Оценка ущерба от загрязнения атмосферного воздуха при лесозаготовках // Лесн. хоз-во. 2007. № 3. С. 33–34.

Majorova L.P., Ryabukhin P.B. Assessment of Damage from Atmospheric Air Pollution during Logging. *Lesnoe khozyajstvo*, 2007, no. 3, pp. 33–34. (In Russ.).

11. Майорова Л.П., Рябухин П.Б., Мелешко М.А. Оценка загрязнения атмосферного воздуха в процессе лесозаготовок // Вестн. КрасГАУ. 2007. № 4. С. 86–91.

Majorova L.P., Ryabukhin P.B., Meleshko M.A. Assessment of Atmospheric Air Pollution during Logging. *Vestnik KrasGAU = The Bulletin of KrasGAU*, 2007, no. 4, pp. 86–91. (In Russ.).

12. Рябухин П.Б. Обоснование выбора основных показателей качества функционирования систем лесозаготовительных машин в условиях Дальнего Востока // Вестн. МГУЛ – Лесн. вестн. 2007. № 1. С. 129–131.

Ryabukhin P.B. Substantiation of the Choice of the Main Performance Indicators of Forestry Machine Systems in the Conditions of the Far East. *Lesnoy vestnik = Forestry Bulletin*, 2007, no. 1, pp. 129–131. (In Russ.).

13. Рябухин П.Б., Казаков Н.В. Комплексная модель для решения задачи структурно-параметрического синтеза систем лесозаготовительных машин // Системы. Методы. Технологии. 2009. № 2(2). С. 42–44.

Ryabukhin P.B., Kazakov N.V. Complex Model for Solving the Task of Structural-Parametric Synthesis of Logging Machinery. *Sistemy. Metody. Tekhnologii = Systems. Methods. Technologies*, 2009, no. 2(2), pp. 42–44. (In Russ.).

14. Рябухин П.Б., Казаков Н.В., Бурлов А.Н. Метод лесопромышленной типизации лесосек по природно-производственным условиям на примере ельников Дальневосточного федерального округа // Системы. Методы. Технологии. 2010. № 2(6). С. 52–57.

Ryabukhin P.B., Kazakov N.V., Burlov A.N. Method of Timber Industry Typification of Cutting Areas According to Natural and Industrial Conditions (Spruce Forest of Far East Federal District as an Example. *Sistemy. Metody. Tekhnologii = Systems. Methods. Technologies*, 2010, no. 2(6), pp. 52–57. (In Russ.).

15. Рябухин П.Б., Ковалев А.П. Лесохозяйственная оценка лесосечных машин по критерию сохранности подроста // Вестн. КрасГАУ. 2008. № 1. С. 216–222.

Ryabukhin P.B., Kovalev A.P. Forestry Assessment of Logging Machines According to the Criterion of Undergrowth Preservation. *Vestnik KrasGAU = The Bulletin of KrasGAU*, 2008, no. 1, pp. 216–222. (In Russ.).

16. Шапиро В.Я. Инвариантность принципов механики контактного разрушения при математическом моделировании процессов лесопромышленного комплекса // Наукосфера. 2022. № 2-1. С. 121–124.

Shapiro V.Ya. Invariance of Principles of Contact Fault Mechanics during Mathematical Modeling of Forestry Complex Processes. *Naukosfera*, 2022, no. 2-1, pp. 121–124. (In Russ.).

17. Шапиро В.Я. Влияние анизотропии свойств оттаивающего почвогрунта на устойчивость трелевочного волока на склоне // Актуал. проблемы лесн. комплекса. 2023. № 63. С. 339–342.

Shapiro V.Ya. The Influence of Anisotropy of Thawing Soil Properties on the Stability of a Skidding Track on the Slope. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa*, 2023, no. 63, pp. 339–342. (In Russ.).

18. Шапиро В.Я. Влияние анизотропии свойств массива грунта на особенности разрушения его краевой части от нагрузки трелевочной системы // Актуал. проблемы лесн. комплекса. 2023. № 64. С. 285–290.

Shapiro V.Ya. The Influence of Anisotropy of Soil Mass Properties on the Features of Destruction of its Marginal Part from the Load of the Skidding System. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa*, 2023, no. 64, pp. 285–290. (In Russ.).

19. Cuong D.M., Zhu S., Ngoc N.T. Study on the Variation Characteristics of Vertical Equivalent Damping Ratio of Tire–Soil System Using Semi-Empirical Model. *Journal of Terramechanics*, 2014, vol. 51, pp. 67–80. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2013.10.002>
20. Ding L., Yang H., Gao H., Li N., Deng Z., Guo J., Li N. Terramechanics-Based Modeling of Sinkage and Moment for in-situ Steering Wheels of Mobile Robots on Deformable Terrain. *Mechanism and Machine Theory*, 2017, vol. 116, pp. 14–33. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2017.05.011>
21. Grigorev I., Kunickaya O., Burgonutdinov A., Burmistrova O., Druzyanova V., Dolmatov N., Voronova A., Kotov A. Assessment the Effect of Skidding Techniques on the Ecological Efficiency of the Skidding Tractor. *Diagnostyka*, 2020, vol. 21, no. 3, pp. 67–75. <https://doi.org/10.29354/diag/125311>
22. Grigorev I., Kunickaya O., Burgonutdinov A., Ivanov V., Shuvalova S., Shvetsova V., Stepanishcheva M., Tikhonov E. Theoretical Studies of Dynamic Soil Compaction by Wheeled Forestry Machines. *Diagnostyka*, 2020, vol. 2, no. 4, pp. 3–13. <https://doi.org/10.29354/diag/127650>
23. Khakhina A., Grigorev I., Dolmatov N., Makuev V., Kruchinin I., Storodubtseva T., Burgonutdinov A., Markov O. Predicting the Passability of Wheeled Tractors. *Mathematical Modelling of Engineering Problems*, 2022, vol. 9, no. 5, pp. 1233–1242. <https://doi.org/10.18280/mmep.090510>
24. Rego G.E., Grigoreva O.I., Voronov R.V. Algorithms for Calculating Schemes of Transport Routes in a Felling Area. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 806, art. no. 012025. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/806/1/012025>
25. Rudov S.E., Voronova A.M., Chemshikova J.M., Teterleva E.V., Kruchinin I.N., Dondokov Yu.Zh., Khaldeeva M.N., Burtseva I.A., Danilov V.V., Grigorev I.V. Theoretical Approaches to Logging Trail Network Planning: Increasing Efficiency of Forest Machines and Reducing Their Negative Impact on Soil and Terrain. *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*, 2019, vol. 16, iss. 4, pp. 61–75. <https://doi.org/10.3233/AJW190049>
26. Rudov S., Kunickaya O., Grigorev I., Burgonutdinov A., Kruchinin I., Prosuzhikh A., Dolmatov N., Dmitrieva N. The Mathematical Model of Forestry Machines Impact on Cryolitozone Forest Soils. *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*, 2020, vol. 17, iss. 4, pp. 89–95. <https://doi.org/10.3233/AJW200055>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest