

Теоретическая связь номинального давления и сопротивления движению колесного движителя лесной машины

Л.М. Михайлова^{1a}, В.А. Макуев^{2b}, А.Ю. Мануковский^{3c}, В.Е. Божбов^{4d}, А.В. Калистратов^{4e}, М.В. Степанищева^{5f}, А.М. Юдилевич^{5g}

¹ Арктический государственный агротехнологический университет, Сергеляхское шоссе, 3, Якутск, Республика Саха (Якутия)

² Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), ул. 1-я Институтская, 1, Мытищи, Россия

³ Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, ул. Тимирязева, 8, Воронеж, Россия

⁴ Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, пер. Институтский, 5, Санкт-Петербург, Россия

⁵ Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, Братск, Россия

^alyutsiya.losotova@mail.ru, ^bmakuev@mgul.ac.ru, ^cmayu1964@mail.ru, ^dv-b@mail.ru, ^eshurik77@mail.ru,

^fmarina01031977@inbox.ru, ^gkafedra388@mail.ru

^a<https://orcid.org/0009-0004-9868-8997>, ^b<https://orcid.org/0000-0000-5905-8923>, ^c<https://orcid.org/0000-0003-4289-6581>,

^d<https://orcid.org/0000-0003-0881-2911>, ^e<https://orcid.org/0009-0007-8344-8781>, ^f<https://orcid.org/0000-0003-4867-3901>

Статья поступила 27.04.2023, принята 05.05.2023

Целью работы является изучение теоретической связи номинального давления колесного движителя на лесной почвогрунт и сопротивления движению машины, а также определение практических зависимостей для расчета коэффициента сопротивления движению по соотношению номинального давления и несущей способности почвогрунта. Исследование основывается на численном решении уравнения вдавливания штампа-движителя в деформируемую среду — лесной почвогрунт. Решение уравнения выполнено в среде MathCAD Prime 3.1. Расчеты проведены для колесного движителя с диаметром 1,333 м и шириной шины 0,7 м при двух значениях давления в шине (0,15 и 0,35 МПа). Результаты получены для трех категорий лесного почвогрунта (слабонесущий III категории, среднепрочный II категории, прочный I категории). Выполненные расчеты и их обработка показали, что коэффициент сопротивления движению колесного движителя можно с высокой точностью выразить через соотношение двух постоянных величин — номинального давления движителя и справочного значения несущей способности почвогрунта. Полученные зависимости позволяют на практике оценить сопротивление движению машины, не прибегая к сложным расчетам, необходимым для реализации теоретической модели взаимодействия движителя с почвогрунтом, основанной на решении уравнения вдавливания штампа-движителя в деформируемое полупространство. Оценка коэффициента сопротивления движению, полученная при расчете для внутреннего давления в шине 0,15 МПа, ниже оценки при давлении 0,35 МПа на 15–25 %. Таким образом, регулировка внутреннего давления в шине является возможным способом повышения проходимости машины.

Ключевые слова: лесной почвогрунт; несущая способность; модуль деформации; давление в шине; сопротивление движению.

Theoretical relationship between nominal ground pressure and rolling resistance of wheeled forestry vehicle

L.M. Mikhailova^{1a}, V.A. Makuev^{2b}, A.Yu. Manukovskii^{3c}, V.E. Bozhbov^{4d}, A.V. Kalistratov^{4e}, M.V. Stepanishcheva^{5f}, A.M. Yudilevich^{5g}

¹ Arctic State Agrotechnological University; 3, Sergelyakhskoe Shosse, Yakutsk, Republic of Sakha (Yakutia)

² Bauman Moscow State Technical University (Mytishchi Branch); 1, 1st Institutskaya St., Mytishchi, Russia

³ Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov; 8, Timiryazev St., Voronezh, Russia

⁴ St. Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov; 5, Institutsky Ave., St. Petersburg, Russia

⁵ Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia

^alyutsiya.losotova@mail.ru, ^bmakuev@mgul.ac.ru, ^cmayu1964@mail.ru, ^dv-b@mail.ru, ^eshurik77@mail.ru,

^fmarina01031977@inbox.ru, ^gkafedra388@mail.ru

^a<https://orcid.org/0009-0004-9868-8997>, ^b<https://orcid.org/0000-0000-5905-8923>, ^c<https://orcid.org/0000-0003-4289-6581>,

^d<https://orcid.org/0000-0003-0881-2911>, ^e<https://orcid.org/0009-0007-8344-8781>, ^f<https://orcid.org/0000-0003-4867-3901>

Received 27.04.2023, accepted 05.05.2023

The aim of the work is to study theoretical relationship between the nominal ground pressure and rolling resistance of wheeled forestry vehicle, as well as determining practical dependencies for estimation the rolling resistance coefficient by the ratio of nominal ground pressure and the soil bearing capacity. The study bases on numerical solution of the equation of indentation of a stamp into a deformable medium. Solution of the equation is obtained in MathCAD Prime 3.1 software package. The calculations are carried out for a wheeled mover with a diameter of 1.333 m and a tire width of 0.7 m at two values of the tire inner pressure (0.15 MPa and 0.35 MPa). The results are obtained for three categories of forest soil (weak-bearing, medium-strength and firm forest soil), the characteristic of the physical and mechanical properties of which is the reference value of deformation modulus. Performed calculations and their processing show that the coefficient of rolling resistance can be expressed with high accuracy through the ratio of two constant values which are the nominal ground pressure and the reference value of the bearing capacity of the soil. The obtained dependences allow practically estimate the rolling resistance without resorting to complex calculations necessary to implement the theoretical model of the interaction of the mover with the soil. The assessment of the coefficient of rolling resistance, obtained when calculating for inner pressure in the tire of 0.15 MPa, is lower than the assessment at a pressure of 0.35 MPa by 15-25%. Thus, adjusting the inner pressure is a possible way to increase passability of a vehicle.

Keywords: forest soil; bearing capacity; deformation modulus; tire pressure; rolling resistance.

Введение. Математическое моделирование взаимодействия движителей лесных машин с почвогрунтами позволяет решать актуальные задачи в области лесоинженерного дела [1–12]. Например, выполнена теоретическая оценка колесобразования при работе машин на грунтах, позволившая обосновать допустимые параметры воздействия движителя на грунт, при которых обеспечиваются приемлемые показатели экологичности машин [2; 3; 7; 8; 13–15]. Проведены исследования в области изучения тягово-сцепных свойств движителей, позволившие получить выводы о проходимости лесных машин с учетом типа и параметров движителя и природно-производственных условий [16–19]. Предложены математические модели, устанавливающие показатели взаимодействия машин с почвогрунтами с учетом динамики и поворота машины [11; 20; 21]. В основном, модели основываются на решении уравнения погружения штампа в деформируемое полупространство, введенного в работах проф. Я.С. Агейкина. Но для получения практических рекомендаций необходимы трудоемкие расчеты, поскольку уравнение не имеет аналитического решения. Кроме того, в выкладках используется такая характеристика, как среднее давление движителя машины по пятну контакта. Параметры пятна контакта, такие как его длина и ширина, переменны в процессе взаимодействия и зависят как от жесткости движителя, так и от физико-механических свойств почвогрунта [4; 14; 15]. С другой стороны, известна характеристика воздействия движителя на почвогрунт, получившая в научной литературе название «номинальное давление движителя на грунт» [8; 20]. Удобство ее использования заключается в том, что она является постоянной величиной для выбранного типа движителя (колесный либо гусеничный). Были получены оценки глубины колеи, основанные на соотношении номинального давления и несущей способности почвогрунта [14; 15; 20]. В меньшей степени исследованы тягово-сцепные свойства движителя с использованием данной величины.

Цель исследования — изучение теоретической связи номинального давления колесного движителя на лесной почвогрунт и сопротивления движению машины, а также определение практических зависимостей для расчета коэффициента сопротивления движению по

соотношению номинального давления и несущей способности почвогрунта.

Материалы и методы исследования. Работа основывается на численном решении уравнения вдавливания штампа-движителя в деформируемую среду — лесной почвогрунт. Решение уравнения проводится в среде *MathCAD Prime 3.1*, далее для расчетных данных выполняется аппроксимация с целью получить практические зависимости. Критерием точности аппроксимации являлся коэффициент детерминации, для приближенных полученных зависимостей $R^2 \gg 0,9$. Расчеты проведены для колесного движителя с диаметром 1,333 м и шириной шины 0,7 м при двух значениях давления в шине (0,15 и 0,35 МПа). Результаты получены для трех категорий лесного почвогрунта (слабонесущий III категории, среднечерный II категории, прочный I категории), характеристикой физико-механических свойств которого является справочное значение модуля общей деформации.

Теоретическая основа исследования. Приведем базовые уравнения, решение которых дает оценку сопротивления движению колесного движителя машины, работающей на деформируемом лесном почвогрунте. Глубина колеи определяется как решение уравнения [4]:

$$h = \frac{p_s}{p_s - p} \cdot \frac{Jpab}{E} \arctg \left(\frac{H - h}{ab \sqrt{1 - \frac{Jp}{E}}} \right), \quad (1)$$

где p — фактическое среднее давление движителя по пятну контакта (переменная величина в процессе взаимодействия):

$$p = \frac{G_w}{bl}, \quad (2)$$

H — толщина деформируемого слоя; b — ширина пятна контакта [4]:

$$b = B; \quad H = 2b, \quad (3)$$

E — модуль деформации лесного почвогрунта; J, a — вспомогательные параметры, учитывающие соотношение сторон пятна контакта:

$$J = \frac{0,03b + l}{0,6b + 0,43l}, \quad a = 0,64 \frac{b + H}{H}, \quad (4)$$

где l — длина пятна контакта [4]:

$$l = \sqrt{dh_z - h_z^2} + \sqrt{d \cdot (h_z + h) - (h_z + h)^2}, \quad (5)$$

где h_z — радиальная деформация колесного движителя; d — диаметр колесного движителя [22]:

$$h_z = 0,069 B^{0,38} G_w^{0,66} d^{-0,40} H_T^{-0,061} p_w^{-0,64} h^{-0,21}, \quad (6)$$

где H_T — высота шины; p_w — давление в шине; B — ширина шины; G_w — нагрузка на движитель.

Несущая способность почвогрунта определяется по формулам проф. В.В. Ларина [4]:

$$\left\{ \begin{array}{l} p_S = p_{S0} \alpha_Z \\ p_{S0} = 0,5 K_1 N_1 \gamma b + N_2 \gamma h + K_3 N_3 C \\ K_1 = \frac{l}{l + 0,4b}; K_3 = \frac{l + b}{l + 0,5b} \\ N_1 = \frac{1 - S_\varphi^4}{S_\varphi^5}; N_2 = \frac{1}{S_\varphi^2}; N_3 = \frac{2(1 + S_\varphi^2)}{S_\varphi^3} \\ S_\varphi = \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) \\ \alpha_Z = 1 + \frac{\frac{h}{H} \frac{\sqrt{2}}{4} \exp \left[\left(\frac{\pi}{4} + \frac{3\varphi}{4} \right) \operatorname{tg} \frac{3\varphi}{4} \right] b \cos \frac{3\varphi}{4} \operatorname{tg} \varphi}{H - h - 0,25 \frac{\sqrt{2}}{2} \exp \left[\left(\frac{\pi}{4} + \frac{3\varphi}{4} \right) \operatorname{tg} \frac{3\varphi}{4} \right] b \cos \frac{3\varphi}{4} \operatorname{tg} \varphi} \end{array} \right. \quad (7)$$

где C — удельное сцепление; φ — угол внутреннего трения; γ — удельный вес почвогрунта [4; 14; 15]:

$$\begin{aligned} C &= 10^{-3} \cdot 10,774 E^{0,7737}; \varphi = 13,669 E^{0,1818}; \\ \gamma &= 10^{-3} \cdot 10,774 E^{0,1168}. \end{aligned} \quad (8)$$

В результате решения уравнения (1) при заданных значениях E , B , d , p_w , H_T и G_w определяется значение h , далее можно рассчитать среднее давление p . Силу сопротивления движению определяют по формуле [4]:

$$F_R = b \int_0^h p dh. \quad (9)$$

По значению силы F_R рассчитывается коэффициент сопротивления движению [4]:

$$\varphi_R = \frac{F_R}{G_w}. \quad (10)$$

При этом, по заданному значению G_w и B , d легко найти номинальное давление движителя на почвогрунт [4]:

$$NGP = \frac{G_w}{0,5 B d}. \quad (11)$$

Кроме того, при заданном значении модуля деформации E можно рассчитать дополнительно приближенное значение несущей способности почвогрунта (без учета глубины образующейся колеи и параметров пятна контакта) [23]:

$$q_S = 0,0964 E. \quad (12)$$

Результаты расчетов. На рис. 1 представлен пример результатов расчета, полученных для среднечного лесного почвогрунта II категории (при решении уравнения (1) задавали значения G_w таким образом,

чтобы получить NGP в пределах от 0,1 до 1,0 q_S). График получен при $p_w = 0,35$ МПа.

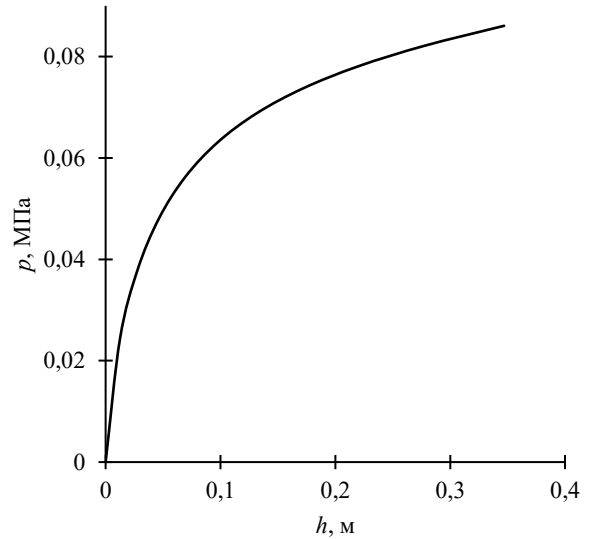


Рис. 1. Взаимосвязь глубины колеи и среднего давления колесного движителя по пятну контакта (среднечный почвогрунт II категории, давление в шине 0,35 МПа)

Сравним номинальное давление NGP и полученную оценку среднего давления движителя по пятну контакта, результаты расчетов приведены в виде графика на рис. 2.

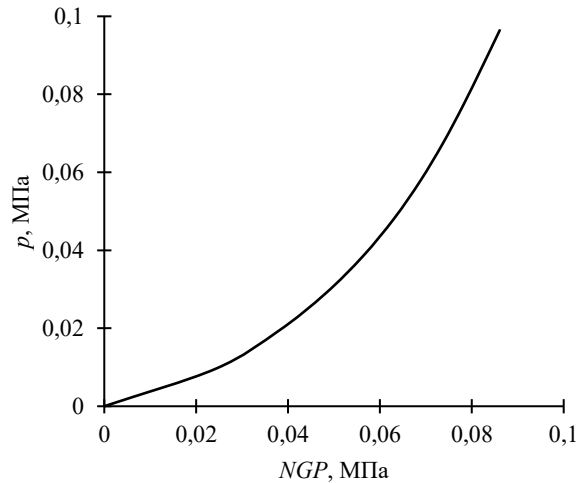


Рис. 2. Взаимосвязь среднего по пятну контакта и номинального давления колесного движителя (среднечный почвогрунт II категории, давление в шине 0,35 МПа)

Результаты подтверждают вывод, сделанный ранее, о нелинейной связи среднего и номинального давления движителя колесной лесной машины на почвогрунт.

На рис. 3 представлены результаты оценки коэффициента сопротивления движению для трех категорий лесного почвогрунта, полученные при давлении в шине 0,35 МПа.

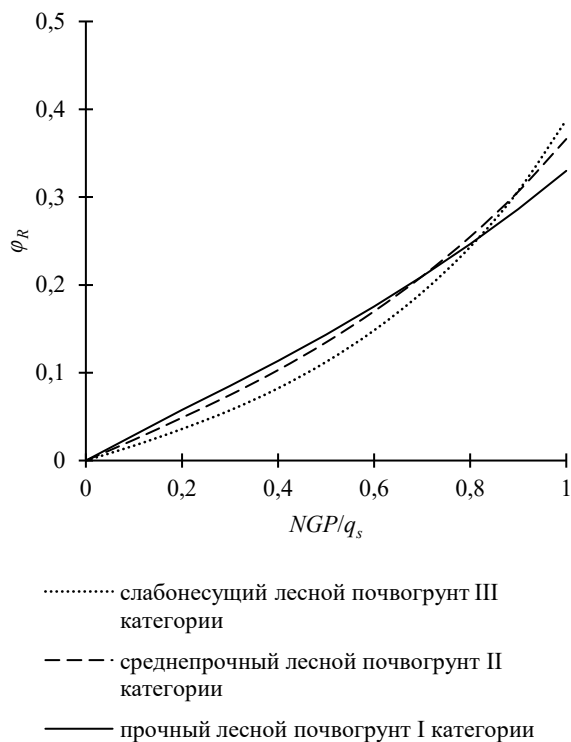


Рис. 3. Оценка коэффициента сопротивления движению для трех категорий лесного почвогрунта (давление в шине 0,35 МПа)

На рис. 4 представлены результаты оценки коэффициента сопротивления движению для трех категорий лесного почвогрунта, полученные при давлении в шине 0,15 МПа.

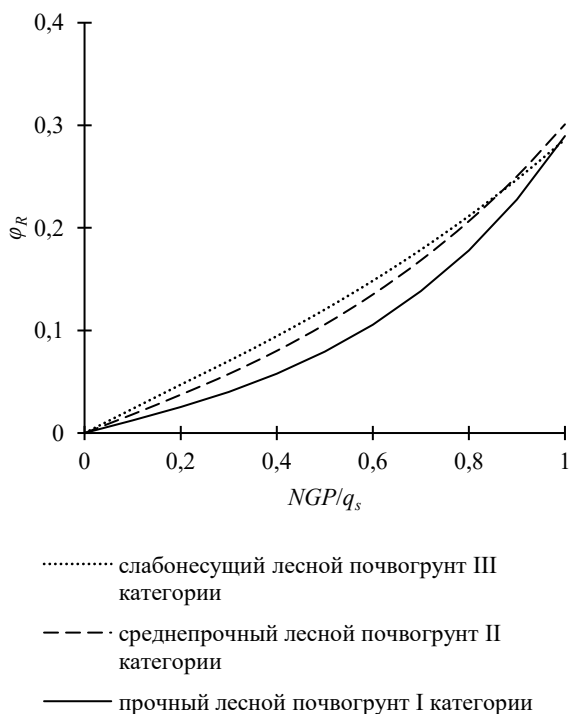


Рис. 4. Оценка коэффициента сопротивления движению для трех категорий лесного почвогрунта (давление в шине 0,15 МПа)

Отметим, что оценки коэффициента сопротивления движению для различных категорий почвогрунта близ-

ки. На рис. 5 приведены результаты аппроксимации полученных значений коэффициента при различном давлении в шине.

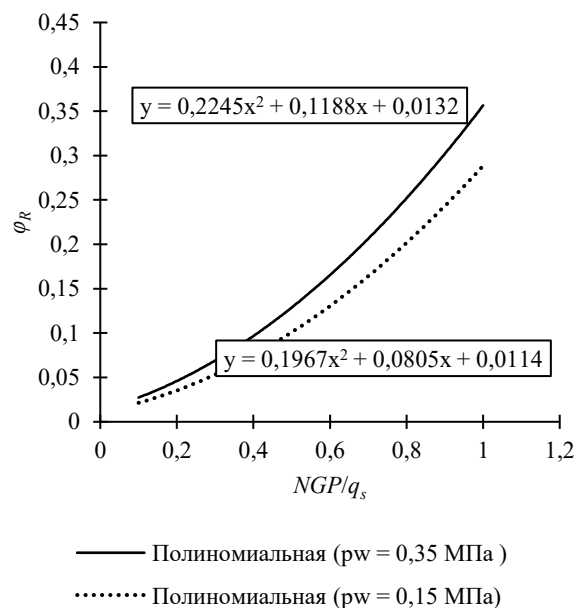


Рис. 5. Оценка коэффициента сопротивления движению при различном давлении в шине

В результате аппроксимации расчетных значений получим следующие формулы, позволяющие на практике рассчитать коэффициент сопротивления на основе постоянных характеристик колесного движителя и почвогрунта:

– при давлении в шине 0,35 МПа:

$$\varphi_R = 0,2245 \left(\frac{NGP}{q_s} \right)^2 + 0,1188 \frac{NGP}{q_s} + 0,0132 ; \quad (13)$$

– при давлении в шине 0,15 МПа:

$$\varphi_R = 0,1967 \left(\frac{NGP}{q_s} \right)^2 + 0,0805 \frac{NGP}{q_s} + 0,0114 . \quad (14)$$

Заключение. Выполненные расчеты и их обработка показали, что коэффициент сопротивления движению колесного движителя можно с высокой точностью выразить через соотношение двух постоянных величин — номинального давления движителя и справочного значения несущей способности почвогрунта. Полученные зависимости позволяют на практике оценить сопротивление движению машины, не прибегая к сложным расчетам, необходимым для реализации теоретической модели взаимодействия движителя с почвогрунтом, основанной на решении уравнения вдавливания штампа-движителя в деформируемое полупространство.

При этом оценка коэффициента сопротивления движению, полученная при расчете для внутреннего давления в шине 0,15 МПа, ниже оценки при давлении 0,35 МПа на 15–25 %. Таким образом, регулировка внутреннего давления в шине является возможным способом повышения проходимости машины.

С точки зрения перспективных направлений дальнейших исследований, стоит отметить проведение расчетов и теоретическую оценку коэффициента сцепления колесного движителя с опорной поверхностью.

Получение практических зависимостей для сцепления, основанных на постоянных характеристиках колесного движителя и лесного почвогрунта, позволит развить методику инженерного расчета проходимости лесных машин.

Литература

1. Григорьев И.В., Никифорова А.И., Пельмский А.А., Хитров Е.Г., Хахина А.М. Экспериментальное определение времени релаксации напряжений лесного грунта // Учен. записки Петрозаводского гос. ун-та. 2013. № 8 (137). С. 77-80.
2. Никифорова А.И., Хитров Е.Г., Пельмский А.А., Григорьева О.И. Определение осадки при движении лесозаготовительной машины по двуслойному основанию // Учен. записки Петрозаводского гос. ун-та. 2014. № 2 (139). С. 87-91.
3. Калистратов А.В., Иванов В.А., Коротков Р.К., Хитров Е.Г., Григорьев Г.В. Исследование коэффициента фильтрации лесной почвы (случай дерново-подзолистой почвы) // Системы. Методы. Технологии. 2014. № 2 (22). С. 190-193.
4. Хитров Е.Г., Песков В.Б., Казаков Д.П., Божбов В.Е., Степанищева М.В. Метод решения задачи о вдавливании штампа-двигателя в неоднородный массив грунта // Системы. Методы. Технологии. 2018. № 2 (38). С. 116-120.
5. Grigorev I., Kunickaya O., Tikhonov E., Hertz E., Druzyanova V., Timokhova O., Ivanov V., Kruchinin I. Dynamic impact of wheeled skidders on forest soil in felling areas // Journal of Terramechanics. 2022. V. 101. P. 1-9.
6. Grigorev I., Burgonutdinov A., Makuev V., Tikhonov E., Shvetsova V., Timokhova O., Revyako S., Dmitrieva N. The theoretical modeling of the dynamic compaction process of forest soil // Mathematical Biosciences and Engineering. 2022. V. 19. № 3. P. 2935-2949.
7. Dobretsov R.Yu., Grigorev I.V., Ivanov V.A., Zhuk A.Yu., Verner N.N., Grigoriev G.V., Storodubtseva T.N., Dmitrieva N.K. Improvement of the forest tracked vehicles control by using impulse control technology for the steering mechanism // European Chemical Bulletin. 2022. V. 11. № 8. P. 32-37.
8. Khakhina A.M., Grigorev I.V., Dolmatov N.P., Makuev V.A., Kruchinin I.N., Storodubtseva T.N., Burgonutdinov A.M., Markov O.B. Predicting the passability of wheeled tractors // Mathematical Modelling of Engineering Problems. 2022. V. 9. № 5. P. 1233-1242.
9. Grigorev I., Kunickaya O., Tikhonov E., Hertz E., Khakhina A., Burmistrova O., Sukhomlinova N., Zhuk A. Methodology for assessing and managing the environmental performance of skidding and feller buncher tractors // Forests. 2021. V. 12. № 12.
10. Grigorev I., Kunickaya O., Burgonutdinov A., Tikhonov E., Makuev V., Egipko S., Hertz E., Zorin M. Modeling the effect of wheeled tractors and skidded timber bunches on forest soil compaction // Journal of Applied Engineering Science. 2021. V. 19. № 2. P. 439-447.
11. 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. V. 21. № 4. P. 3-13.
12. 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. V. 21. № 3. P. 67-75.
13. Бурмистрова О.Н., Просужих А.А., Хитров Е.Г., Куницкая О.А., Лулева Е.Н. Теоретические исследования производительности форвардеров при ограничениях воздей-

Работа выполнена в рамках научной школы «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства» Арктического государственного агротехнологического университета. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-16-00092, <https://rscf.ru/project/23-16-00092/>

14. Хитров Е.Г., Бартегов И.М. Влияние угла поперечного наклона поверхности качения на тягово-сцепные свойства колесного движителя // Лесотехнический журнал. 2016. Т. 6. № 4 (24). С. 225-232.
15. Хитров Е.Г., Бартегов И.М. Расчет глубины колеи колесного движителя лесных тракторов на склонах // Лесотехнический журнал. 2016. Т. 6. № 4 (24). С. 233-239.
16. Григорьев И.В., Макуев В.А., Никифорова А.И., Хитров Е.Г., Устинов В.В., Калинин С.Ю. Исследование коэффициента сопротивления передвижению колесных лесных машин // Вестн. Московского гос. ун-та леса. Лесной вестн. 2014. Т. 18. № S2. С. 36-41.
17. Хитров Е.Г., Хахина А.М., Дмитриева М.Н., Песков В.Б., Григорьева О.И. Уточненная модель для оценки тягово-сцепных свойств колесного движителя лесной машины // Изв. С.-Петербур. лесотехн. акад. 2016. № 217. С. 108-119.
18. Хитров Е.Г., Хахина А.М., Григорьев И.В., Григорьева О.И., Никифорова А.И. Расчет тягово-сцепных свойств колесных лесных машин с использованием вес-метода // Лесотехнический журнал. 2016. Т. 6. № 3 (23). С. 196-202.
19. Бурмистрова О.Н., Просужих А.А., Хитров Е.Г., Рудов С.Е., Куницкая О.А., Калита О.Н. Влияние переменных коэффициентов сопротивления движению и сцепления на производительность форвардера // Деревообрабатывающая пром-сть. 2021. № 1. С. 3-16.
20. Rudov S., Kunickaya O., Grigorev I., Burgonutdinov A., Kruchinin I., Prosuzhikh A., Dolmatov N., Dmitrieva N. The mathematical model of forestry machines impact on cryolitopzone forest soils // Asian Journal of Water, Environment and Pollution. 2020. V. 17. № 4. P. 89-95.
21. Grigorev I., Kunickaya O., Burgonutdinov A., Burmistrova O., Druzyanova V., Dolmatov N., Voronova A., Kotov A. Modeling the effect of skidded timber bunches on forest soil compaction // Journal of Defense Modeling and Simulation. 2020.
22. Хитров Е.Г., Григорьев И.В., Макуев В.А., Хахина А.М., Калинин С.Ю. Модель для оценки радиальной деформации колеса лесной машины с учетом деформации почвогрунта // Вестн. Московского гос. ун-та леса. Лесной вестн. 2015. Т. 19. № 6. С. 87-90.
23. Хитров Е.Г., Божбов В.Е., Ильющенко Д.А. Расчет несущей способности лесных почвогрунтов под воздействием колесных движителей // Системы. Методы. Технологии. 2014. № 4 (24). С. 122-126.

References

1. Grigorev I.V., Nikiforova A.I., Pelymskij A.A., Hitrov E.G., Nahina A.M. Experimental determination of the stress relaxation time of the forest soil // Proceedings of Petrozavodsk State University. 2013. № 8 (137). P. 77-80.
2. Nikiforova A.I., Hitrov E.G., Pelymskij A.A., Grigoreva O.I. Determination of settlement during the movement of a forest machine on a two-layer base // Proceedings of Petrozavodsk State University. 2014. № 2 (139). P. 87-91.
3. Kalistratov A.V., Ivanov V.A., Korotkov R.K., Hitrov E.G., Grigorev G.V. Investigation of the filtration coefficient of forest soil (case of soddy-podzolic soil) // Systems. Methods. Technologies. 2014. № 2 (22). P. 190-193.

4. Hitrov E.G., Peskov V.B., Kazakov D.P., Bozhbov V.E., Stepanishcheva M.V. Method for solving the problem of indentation of a driving stamp into an inhomogeneous soil mass // *Systems. Methods. Technologies*. 2018. № 2 (38). P. 116-120.
5. Grigorev I., Kunickaya O., Tikhonov E., Hertz E., Druzyanova V., Timokhova O., Ivanov V., Kruchinin I. Dynamic impact of wheeled skidders on forest soil in felling areas // *Journal of Terramechanics*. 2022. V. 101. P. 1-9.
6. Grigorev I., Burgonutdinov A., Makuev V., Tikhonov E., Shvetsova V., Timokhova O., Revyako S., Dmitrieva N. The theoretical modeling of the dynamic compaction process of forest soil // *Mathematical Biosciences and Engineering*. 2022. V. 19. № 3. P. 2935-2949.
7. Dobretsov R.Yu., Grigorev I.V., Ivanov V.A., Zhuk A.Yu., Verner N.N., Grigoriev G.V., Storodubtseva T.N., Dmitrieva N.K. Improvement of the forest tracked vehicles control by using impulse control technology for the steering mechanism // *European Chemical Bulletin*. 2022. V. 11. № 8. P. 32-37.
8. Khakhina A.M., Grigorev I.V., Dolmatov N.P., Makuev V.A., Kruchinin I.N., Storodubtseva T.N., Burgonutdinov A.M., Markov O.B. Predicting the passability of wheeled tractors // *Mathematical Modelling of Engineering Problems*. 2022. V. 9. № 5. P. 1233-1242.
9. Grigorev I., Kunickaya O., Tikhonov E., Hertz E., Khakhina A., Burmistrova O., Sukhomlinova N., Zhuk A. Methodology for assessing and managing the environmental performance of skidding and feller buncher tractors // *Forests*. 2021. V. 12. № 12.
10. Grigorev I., Kunickaya O., Burgonutdinov A., Tikhonov E., Makuev V., Egipko S., Hertz E., Zorin M. Modeling the effect of wheeled tractors and skidded timber bunches on forest soil compaction // *Journal of Applied Engineering Science*. 2021. V. 19. № 2. P. 439-447.
11. 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. V. 21. № 4. P. 3-13.
12. 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. V. 21. № 3. P. 67-75.
13. Burmistrova O.N., Prosuzhikh A.A., Hitrov E.G., Kunickaya O.A., Luneva E.N. Theoretical studies of the performance of forwarders with limited impact on soils // *Bulletin of higher educational institutions. Lesnoy zhurnal (Forestry journal)*. 2021. № 3 (381). P. 101-116.
14. Hitrov E.G., Bartenev I.M. Influence of the angle of the transverse inclination of the rolling surface on the traction-coupling properties of the wheel mover // *Forestry Engineering Journal*. 2016. V. 6. № 4 (24). P. 225-232.
15. Hitrov E.G., Bartenev I.M. Calculation of the track depth of the wheel mover of forest tractors on slopes // *Forestry Engineering Journal*. 2016. V. 6. № 4 (24). P. 233-239.
16. Grigor'ev I.V., Makuev V.A., Nikiforova A.I., Hitrov E.G., Ustinov V.V., Kalinin S.YU. Study of the coefficient of resistance to the movement of wheeled forest machines // *Moscow state forest university bulletin - Lesnoy vestnik*. 2014. V. 18. № S2. P. 36-41.
17. Hitrov E.G., Hahina A.M., Dmitrieva M.N., Peskov V.B., Grigor'eva O.I. Refined model for evaluating the traction and coupling properties of a wheeled propulsion machine of a forest machine // *Izvestia SPbLTA*. 2016. № 217. P. 108-119.
18. Hitrov E.G., Hahina A.M., Grigor'ev I.V., Grigor'eva O.I., Nikiforova A.I. Calculation of traction properties of wheeled forest machines using the wes-method // *Forestry Engineering Journal*. 2016. V. 6. № 3 (23). P. 196-202.
19. Burmistrova O.N., Prosuzhikh A.A., Hitrov E.G., Rudov S.E., Kunickaya O.A., Kalita O.N. Effect of Variable Drag and Cohesion Coefficients on Forwarder Performance // *Derevoobrabativaushaya promishlennost' (Woodworking industry)*. 2021. № 1. P. 3-16.
20. Rudov S., Kunickaya O., Grigorev I., Burgonutdinov A., Kruchinin I., Prosuzhikh A., Dolmatov N., Dmitrieva N. The mathematical model of forestry machines impact on cryolitzone forest soils // *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*. 2020. V. 17. № 4. P. 89-95.
21. Grigorev I., Kunickaya O., Burgonutdinov A., Burmistrova O., Druzyanova V., Dolmatov N., Voronova A., Kotov A. Modeling the effect of skidded timber bunches on forest soil compaction // *Journal of Defense Modeling and Simulation*. 2020.
22. Hitrov E.G., Grigor'ev I.V., Makuev V.A., Hahina A.M., Kalinin S.YU. Model for assessing the radial deformation of the forest machine wheel, taking into account the deformation of the soil // *Moscow state forest university bulletin - Lesnoy vestnik*. 2015. V. 19. № 6. P. 87-90.
23. Hitrov E.G., Bozhbov V.E., Il'yushenko D.A. Calculation of the bearing capacity of forest soils under the influence of wheel propellers // *Systems. Methods. Technologies*. 2014. № 4 (24). P. 122-126.