

Оценка тягово-цепных свойств движителя лесной гусеничной машины, работающей на склоне

До Туан Ань^{1a}, Г.В. Григорьев^{2b}, В.А. Каляшов^{3c}, Д.В. Новгородов^{4d},
О.И. Григорьева^{2e}, Е.Г. Хитров^{2f}

¹ Вьетнамский национальный университет лесного хозяйства, Шоссе 21, Суан Май, район Чуонгми, Ханой, Вьетнам

² Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Институтский пер., 5, Санкт-Петербург, Россия

³ Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, ул. 2-я Красноармейская, 4, Санкт-Петербург, Россия

⁴ Арктический государственный агротехнологический университет, Сергеляхское шоссе, 3, Якутск, Республика Саха (Якутия)

^a anhdo.dhln@gmail.com, ^b vtl-lta@mail.ru, ^c vit832@yandex.ru, ^d novgorodov_dulus@mail.ru,

^e grigoreva_o@list.ru, ^f yegorkhitrov@gmail.com

^a <https://orcid.org/0000-0002-9421-360X>, ^b <https://orcid.org/0000-0002-6368-3967>, ^c <https://orcid.org/0000-0002-8145-7058>,

^d <https://orcid.org/0000-0002-8288-6030>, ^e <https://orcid.org/0000-0001-5937-0813>, ^f <https://orcid.org/0000-0003-4569-9508>

Статья поступила 28.02.2022, принята 21.04.2022

При работе лесных машин на горных склонах, прежде всего, их оснащают специальными гусеницами. Однако это далеко не всегда обеспечивает эффективную и безопасную работу лесных машин на склонах. Для повышения эффективности и безопасности работы лесных машин на горных склонах, в настоящее время, используют два основных варианта. Во-первых, сами лесные машины могут быть оснащены встроенными лебедками, которые устанавливаются на заводах изготовителей, по предварительному требованию заказчика. Во-вторых, используют различные варианты самоходных лебедок (T-winch, ROV, Summit Winch Assist, и т. д.), выполненные на базе бульдозеров, экскаваторов, или специальных самоходных шасси. Использование таких технических решений позволяет существенно повысить эффективность и безопасность работы лесных машин на горных склонах, за счет реализации дополнительного тягового усилия. Это позволяет существенно снизить нагрузки в трансмиссии лесных машин и снизить расход топлива. Однако стоимость такого оборудования весьма существенна. В статье получены новые зависимости, позволяющие на практике, без итераций, рассчитать: несущую способность почвогрунта, находящегося под воздействием гусеничного движителя, в зависимости от физико-механических свойств почвогрунта с учетом угла склона; глубину колеи, образующейся под воздействием гусеничного движителя лесной машины, работающей на склоне; допустимое среднее давление гусеничного движителя на почвогрунт, ограниченное глубиной образующейся колеи; коэффициент сопротивления движению гусеничной машины, движущейся вдоль склона; коэффициент сцепления гусеничного движителя с грунтовой поверхностью с учетом ослабления почвогрунта при срезе.

Ключевые слова: горные леса; леса на склонах; лесосечные работы; трелевка; лесные машины; почвогрунты; образование колеи.

Evaluation of traction and hitch properties of a forest tracked machine mover operating on a slope

Do Tuan An^{1a}, G.V. Grigoriev^{2b}, V.A. Kalyashov^{3c}, D.V. Novgorodov^{4d},
O.I. Grigorieva^{2e}, E.G. Hitrov^{2f}

¹ Vietnam National Forestry University; 21, Highway, Suan Mai, Truongmi District, Hanoi City, Vietnam

² St. Petersburg State Forest Technical University under name of S.M. Kirov; 5, Institutsky Per., St. Petersburg, Russia

³ St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering; 4, 2nd Krasnoarmeyskaya St., St. Petersburg, Russia

⁴ Arctic State Agrotechnological University; 3, Sergelyakhskoe Shosse, Yakutsk, Republic of Sakha, Yakutia

^a anhdo.dhln@gmail.com, ^b vtl-lta@mail.ru, ^c vit832@yandex.ru, ^d novgorodov_dulus@mail.ru,

^e grigoreva_o@list.ru, ^f yegorkhitrov@gmail.com

^a <https://orcid.org/0000-0002-9421-360X>, ^b <https://orcid.org/0000-0002-6368-3967>, ^c <https://orcid.org/0000-0002-8145-7058>,

^d <https://orcid.org/0000-0002-8288-6030>, ^e <https://orcid.org/0000-0001-5937-0813>, ^f <https://orcid.org/0000-0003-4569-9508>

Received 28.02.2022, accepted 21.04.2022

When forest machines work on mountain slopes, first of all, they are equipped with special tracks. However, this does not always ensure efficient and safe operation of forest machines on slopes. To improve the efficiency and safety of forest machines on mountain

slopes, two main options are currently being used. Firstly, forest machines themselves can be equipped with built-in winches, which are installed at manufacturers' plants, at the customer's prior request. Second, various variants of self-propelled winches are used (T-winch, ROB, Summit Winch Assist, etc.), which are installed on bulldozers, excavators, or special self-propelled chassis. Use of such technical solutions makes it possible to considerably increase efficiency and safety of forest machines operation on mountain slopes, due to realization of additional traction force. This allows to considerably decrease loads in the transmission of forest machines and reduce fuel consumption. However, the cost of such equipment is very significant. In the article new dependences are developed, which practically allow to calculate without iterations: the bearing capacity of the soil under the influence of the gooseneck mover, depending on the physical and mechanical properties of the soil, taking into account the angle of the slope; the depth of the rut formed under the influence of the forest machine's gooseneck mover, operating on the slope; permissible average pressure of a tracked unit on the subsoil, limited by the depth of the rut forming; the coefficient of resistance to movement of a tracked unit moving along a slope; the coefficient of traction of a tracked unit with the subsoil surface taking into account subsoil loosening at cutting.

Keywords: mountain forests; forests on slopes; logging; skidding; forest machines; soils; rutting.

Введение. Проблема повышения эффективности лесосечных работ складывается из экономических и экологических показателей. Экономические показатели считаются хорошими при достижении возможного минимума себестоимости заготовленной древесины, т. е. минимизации затрат на подготовительные, вспомогательные и основные работы, объем которых во многом зависит от принятой системы машин, режима их работы, технологического процесса и схемы разработки лесосеки [1–5].

Экологические показатели лесосечных работ считаются хорошими при достижении возможного минимума отрицательного воздействия на лесную экосистему и, соответственно, при достижении минимума затрат на последующее лесовосстановление. При этом степень отрицательного воздействия лесосечных работ на лесную экосистему также во многом зависит от принятой системы машин, режима их работы, технологического процесса и схемы разработки лесосеки [6–10].

Во многих странах мира для освоения запасов древесины в эксплуатационных лесах на крутых склонах были разработаны многочисленные системы машин, включая различные средства воздушного транспорта (легче и тяжелее воздуха), различные системы канатных трелевочных установок (лесных кранов), самоходные лебедки, лесные машины с интегрированными в их трансмиссию лебедками.

В других странах мира, например, в США, Японии, Новой Зеландии, Австрии выпускается широкая линейка техники для работы в горных лесах. Каждый вариант этой техники имеет свои достоинства и недостатки.

Одним из наиболее распространенных в России вариантов при машинной заготовке древесины на склонах является использование лесных машин, оснащенных встроенными в трансмиссию лебедками. Такой вариант позволяет намного эффективнее работать на крутых склонах, но утяжеляет машину конструктивно и значительно удорожает. Кроме этого, недостатком такого варианта является негативное воздействие движителей лесных машин на почвогрунты [11–13], а также то, что при смене дислокации машины, например, при переходе на разработку равнинных лесосек снять эту лебедку нельзя, машина работает с дополнительным весом технологического оборудования и, соответственно, с дополнительным расходом топлива на перемещение.

Цель работы: определить коэффициент сопротивления движению гусеничной машины, движущейся вдоль склона; коэффициент сцепления гусеничного

двигателя с грунтовой поверхностью с учетом ослабления почвогрунта при срезе.

Материалы и методы исследования. Используются справочные данные о физико-механических свойствах лесных почвогрунтов. Расчеты выполнены на основе механики разрушений. Используются методы аппроксимации численных данных.

Результаты исследования. Сила сопротивления движению машины, возникающая со стороны деформируемого грунта, определяется по уравнению [14–17]:

$$F_R = bhp - b \int_0^p h(p)dh, \quad (1)$$

где b – средняя ширина пятна контакта, h – глубина колеи, p – среднее давление движителя на почвогрунт.

Далее определяется коэффициент сопротивления движению [16, 17]:

$$\varphi_R = \frac{h}{l} - \frac{1}{pl} \int_0^p h(p)dh, \quad (2)$$

где l – средняя длина пятна контакта.

В наших предыдущих исследованиях, основывающихся на результатах [14–21], были получены следующие формулы:

$$h = \frac{H(H + A(3x_1 - 4x_2))}{4A(x_1 - 2x_2)} - \frac{H\sqrt{(H + A(x_1 - 4x_2))^2 + 4HAx_1}}{4A(x_1 - 2x_2)}, \quad (3)$$

где:

$$x_1 = \arctg \frac{H}{ab\sqrt{1 - \frac{Jp}{E}}}, x_2 = \arctg \frac{H}{2ab\sqrt{1 - \frac{Jp}{E}}}, \quad (4)$$

$$A = \frac{p_s}{p_s - p} \cdot \frac{Jpab}{E\sqrt{1 - \frac{Jp}{E}}},$$

где p – среднее давление движителя по пятну контакта, E – модуль общей деформации грунтового основания, J – коэффициент, учитывающий соотношение сторон пятна контакта, a – коэффициент, учитывающий глубину распространения деформаций в грунтовом основании, b – средняя ширина пятна контакта, H – глубина распространения деформаций, p_s – несущая способность почвогрунта

$$p_s = q_s \delta_\beta, \quad (5)$$

где

$$q_s = 5,22C + \frac{109C + 1,5B}{10000} \varphi^2, \quad (6)$$

$$\delta_\beta = 1 - \frac{56 + \varphi}{10000} \beta, \quad (7)$$

где C – сцепление частиц почвогрунта, φ – угол внутреннего трения частиц почвогрунта.

Таблица 1. Коэффициент сопротивления движению гусеничной машины, вызванного образованием колеи, в зависимости от соотношения среднего и допустимого давления движителя на грунт (на склоне 30°)

Соотношение среднего и допустимого давления p/p_{adm}	Категория прочности почвогрунта		
	III (слабый)	II (средней прочности)	I (прочный)
0,5	0,0227 <i>0,0201</i>	0,0199 <i>0,0174</i>	0,0178 <i>0,0153</i>
0,75	0,0469 <i>0,0378</i>	0,0424 <i>0,0332</i>	0,0395 <i>0,0298</i>
1	0,0948 <i>0,0658</i>	0,0915 <i>0,0593</i>	0,0932 <i>0,0549</i>

Примечание. Курсив — на горизонтальной поверхности

Обобщим полученные данные и представим результаты расчета коэффициента сопротивления относительно соотношения среднего и допустимого давления движителя на почвогрунт (рис. 4).

В результате аппроксимации результатов расчетов, выполненных при $\beta = \text{var}$, получим функцию коэффициента сопротивления движению гусеничной машины, вызванного образованием колеи, в следующем виде:

$$\varphi_R = \varphi_{R0} \delta_{R\beta}, \quad (9)$$

где φ_{R0} – коэффициент сопротивления на горизонтальной опорной поверхности, $\delta_{R\beta}$ – коэффициент, учитывающий влияние угла склона на сопротивление движению:

$$\varphi_{R0} = 0,0306 - 0,0246q_s - 0,0829 \frac{p}{p_{adm}} + 0,115 \left(\frac{p}{p_{adm}} \right)^2, \quad (10)$$

$$\delta_{R\beta} = 1 + 0,016\beta. \quad (11)$$

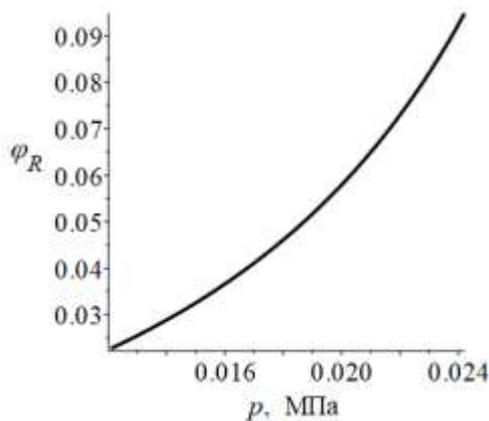


Рис. 1. Коэффициент сопротивления движению гусеничной машины, вызванного образованием колеи, в зависимости от среднего давления движителя на грунт (почвогрунты III категории прочности, $q_s = 0,047$ МПа)

Кроме того, на основе результатов [14-21], нами была обоснована оценка допустимого давления на почвогрунт, при котором глубина колеи не превысит 0,2 м:

$$p_{adm} = q_s \cdot (0,642 + 0,035 \ln q_s), \quad (8)$$

На рис. 1–3 представлены результаты численного интегрирования (2) при угле склона $\beta = 30^\circ$ для различных категорий прочности почвогрунта. Результаты расчетов обобщим в табл. 1.

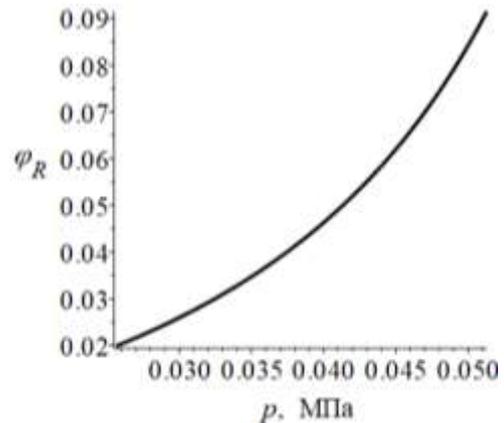


Рис. 2. Коэффициент сопротивления движению гусеничной машины, вызванного образованием колеи, в зависимости от среднего давления движителя на грунт (почвогрунты II категории прочности, $q_s = 0,095$ МПа)

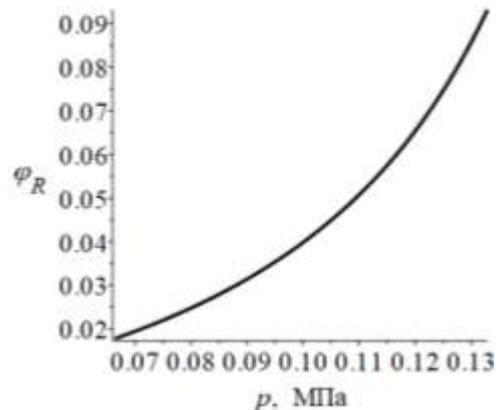


Рис. 3. Коэффициент сопротивления движению гусеничной машины, вызванного образованием колеи, в зависимости от среднего давления движителя на грунт (почвогрунты I категории прочности, $q_s = 0,233$ МПа)

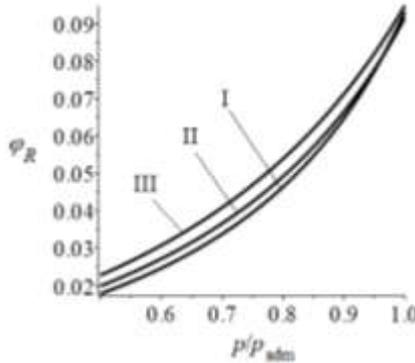


Рис. 4. Коэффициент сопротивления движению гусеничной машины, вызванного образованием колеи, в зависимости от соотношения среднего и допустимого давления движителя на почвогрунт

В итоге в результате аппроксимации расчетных данных запишем:

$$\varphi_R = \left(0,0306 - 0,0246q_s - 0,0829 \frac{p}{p_{adm}} + 0,115 \left(\frac{p}{p_{adm}} \right)^2 \right) (10,016\beta), \quad (12)$$

Сила сцепления движителя с грунтом определяется по уравнению [14–17]:

$$F_T = b \int_0^l \tau_x(x) dx, \quad (13)$$

где τ_x – касательное напряжение, распределенное вдоль пятна контакта, x – координата по оси, параллельной опорной поверхности движения машины.

Функция распределения τ_x известна [14-17]:

$$\tau_x(x) = \frac{1}{\frac{1}{\tau_{max}} + \frac{t_{rp}}{Gj(x)}}, \quad (14)$$

где t_{rp} – шаг грунтозацепов, G – модуль сдвига грунта, j – сдвиговая деформация грунта, τ_{max} – максимальное сопротивление грунта сдвигу.

Как правило, принимают линейную функцию деформации сдвига по координате x [14–18]:

$$j(x) = Sx, \quad (15)$$

где S – коэффициент буксования движителя.

Максимальное сопротивление грунта сдвигу следует определять с учетом его физико-механических и прочностных свойств [14-17]:

$$\tau_{max} = C\xi(j) + p \tan \varphi, \quad (16)$$

где $\xi(j)$ – функция, учитывающая снижение сопротивления грунта при срезе [14-17]:

$$\xi(j) = \begin{cases} 1, & j - j_0 \leq 0 \\ 1 - \frac{j - j_0}{t_{rp}}, & j - j_0 > 0 \end{cases}, \quad (17)$$

где j_0 – значение сдвиговой деформации грунта, при которой происходит его срез.

Известно выражение для оценки j_0 [14–18]:

$$j_0 = \frac{\tau_0 t_{rp}}{G} \left(\sqrt{\frac{G}{C}} - 1 \right), \quad (18)$$

где τ_0 – максимальное сопротивление грунта сдвигу без учета среза [14-18]:

$$\tau_0 = C + p \tan \varphi. \quad (19)$$

При вычисленном значении F_T рассчитывается коэффициент сцепления движителя с грунтом [14–18]:

$$\mu_T = \frac{F_T}{pbl} = \frac{1}{pl} \int_0^l \tau_x(x) dx. \quad (20)$$

Обратим внимание на ступенчатый характер функции $\xi(j)$, характеризующей снижение сопротивления сдвигу при развитии деформаций среза почвогрунта. Ввиду переменного характера $j(x)$ по длине пятна контакта интегрирование выражений (13), (20) сложно. Для исследования (13), (20) применим метод численного интегрирования.

На рис. 5 представлены результаты расчета коэффициента сцепления для различных категорий прочности почвогрунта при $S = var, p = p_{adm}$.

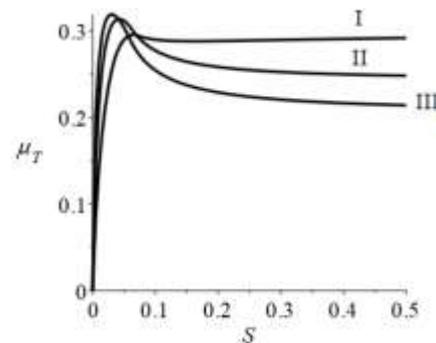


Рис. 5. Связь коэффициента сцепления гусеничного движителя с опорной поверхностью и коэффициента буксования

Согласно рекомендациям [16; 17; 22–24], следует исходить из верхней оценки коэффициента буксования $S = 0,2$ (наличие буксования обусловлено как сопротивлением почвогрунта, так и конструктивными особенностями движителя). Результаты расчетов показывают, что для гусеничного движителя при $S > 0,1$ коэффициент сцепления изменяется незначительно, в связи с чем примем оценку [16; 17; 22–24] в нашем исследовании.

Проведем вычисления коэффициента сцепления по (20) для различных категорий почвогрунта при изменении давления в пределах $p = 0,5p_{adm} \dots p_{adm}$ при $S = 0,2$; результаты представлены на рис. 6–8.

Сопоставим данные по различным категориям почвогрунта в относительных величинах, результаты представлены на рис. 9.

Тогда получим оценки коэффициента сцепления гусеничного движителя в зависимости от отношения среднего давления к допустимому для различных категорий прочности почвогрунта, представленные в табл. 2.

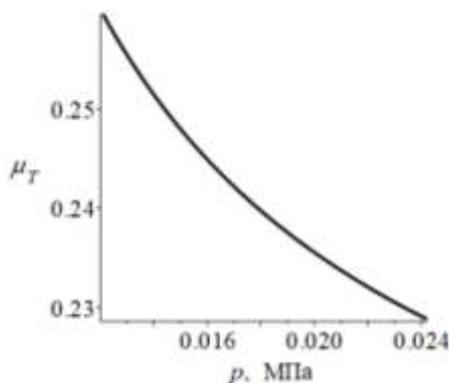


Рис. 6. Коэффициент сцепления гусеничного движителя на слабом почвогрунте

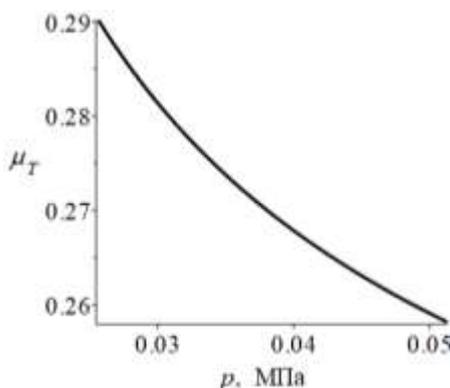


Рис. 7. Коэффициент сцепления гусеничного движителя на почвогрунте средней прочности

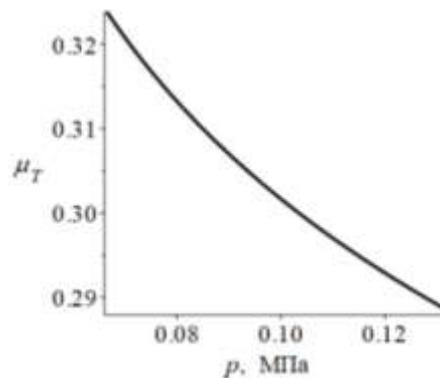


Рис. 8. Коэффициент сцепления гусеничного движителя на прочном почвогрунте

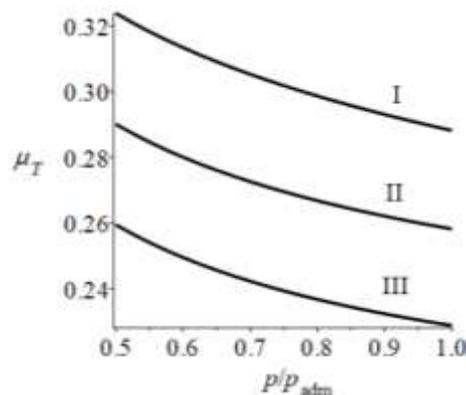


Рис. 9. Коэффициент сцепления гусеничного движителя в зависимости от отношения среднего давления к допустимому для категории прочности почвогрунта

Таблица 2. Коэффициент сцепления гусеничного движителя в зависимости от отношения среднего давления к допустимому

Соотношение среднего и допустимого давления p/p_{adm}	Категория прочности почвогрунта		
	III (слабый)	II (средней прочности)	I (прочный)
0,5	0,260	0,290	0,324
0,75	0,239	0,270	0,302
1	0,229	0,258	0,288

В результате аппроксимации табличных данных получим формулу для расчета коэффициента сцепления гусеничного движителя со склоном в зависимости от соотношения среднего и допустимого давления, а также несущей способности (при коэффициенте буксования движителя $S = 0,2$):

$$\mu_T = 0,253 - 0,066 \frac{p}{p_{adm}} + 0,925q_s - 2,11q_s^2 \quad (21)$$

Заключение

Таким образом, в результате выполненных теоретических исследований получены новые зависимости, позволяющие на практике рассчитать:

- коэффициент сопротивления движению гусеничной машины, движущейся вдоль склона;

Литература

1. Григорьев И.В., Куницкая О.А., Рудов С.Е., Давтян А.Б. Пути повышения эффективности работы лесных машин // Энергия: экономика, техника, экология. 2020. № 1. С. 55-63.

- коэффициент сцепления гусеничного движителя с грунтовой поверхностью с учетом ослабления почвогрунта при срезе.

Авторский вклад. До Туан Ань: проведение расчетов и интерпретация их результатов (50 %); Г.В. Григорьев: разработка программы для проведения расчетов (12,5 %), В.А. Каляшов: разработка программы для проведения расчетов (12,5 %); Д.В. Новгородов: анализ проблематики исследования (10 %); О.И. Григорьева анализ проблематики исследования (10 %); Е.Г. Хитров: общее руководство работой (5 %).

Работа выполнена в рамках научной школы «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства». Исследование частично выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-26-00009, <https://rscf.ru/project/22-26-00009/>.

2. Григорьев И.В., Куницкая О.А., Просужих А.А., Давтян А.Б., Рудов С.Е. Перспективы создания лесозаготовительных комплексов на базе отечественных строительных

- и сельскохозяйственных машин // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2020. № 10. С. 3-10.
3. Мануковский А.Ю., Зорин М.В., Просужих А.А., Куницкая О.А., Григорьев И.В. Современные подходы к повышению энергоэффективности и экономичности лесных машин // Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности: сб. ст. по итогам шестой междунар. науч. конф. (29-30 июня 2020 г.). Казань, 2020. С. 138-140.
 4. Куницкая О.А. Проактивный сервис для лесных машин // Повышение эффективности лесного комплекса: материалы Шестой Всерос. нац. науч.-практической конф. с междунар. участием (22 мая 2020 г.). Петрозаводск, 2020. С. 86-87.
 5. Куницкая О.А., Просужих А.А., Давтян А.Б., Григорьев М.Ф., Григорьева А.И. Организационно-технические решения для повышения коэффициента технической готовности лесных машин // Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе: материалы междунар. науч.-практической конф. (9-10 июня 2020 г.). Воронеж, 2020. С. 162-167.
 6. Рудов С.Е., Куницкая О.А. Теоретические исследования экологической совместимости колесных лесных машин и мерзлотных почвогрунтов лесов криолитозоны // Транспортные и транспортно-технологические системы: материалы Междунар. науч.-технической конф. (22 окт. 2020 г.). Тюмень, 2020. С. 323-326.
 7. Григорьев И.В., Куницкая О.А., Григорьев М.Ф., Григорьева А.И. Моделирование процесса динамического уплотнения почвогрунта // IX Междунар. конф. по математическому моделированию, посвящ. 75-летию В.Н. Вraga: тез. докладов (27 июля-01 авг. 2020 г.). Якутск, 2020. С. 144.
 8. Никитина Е.И., Куницкая О.А., Николаева Ф.В. Проект организации лесозаготовок в условиях Алданского лесничества с применением многооперационных лесозаготовительных комплексов // Современные проблемы и достижения аграрной науки в Арктике: сб. науч. ст. по материалам Всерос. студенческой науч.-практической конф. с междунар. участием в рамках «Северного форума - 2020» (29-30 сент. 2020 г.) и Междунар. науч. онлайн летней школы - 2020 (6-20 июля 2020 г.). Якутск, 2020. С. 138-148.
 9. 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.
 10. Kunickaya O., Hertz E., Kruchinin I., Tikhonov E., Ivanov N., Dolmatov N., Zorin M., Grigorev I. Pressure control systems for tyre preservation in forestry machinery and forest soils // Asian Journal of Water, Environment and Pollution. 2021. V. 18. № 3. P. 95-102.
 11. Хахина А.М. Методы прогнозирования и повышения проходимости колесных лесных машин: дис. ... д-ра техн. наук: 05.21.01. СПб., 2018. 318 с.
 12. Хитров Е.Г. Комплексное обоснование параметров и режимов работы движителей лесных машин: дис. ... д-ра техн. наук: 05.21. Воронеж, 2020. 319 с.
 13. Агейкин Я.С. Проходимость автомобилей. М.: Машиностроение, 1981. 232 с.
 14. Ларин В.В. Методы прогнозирования опорной проходимости многоосных колесных машин на местности: дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.03. М., 2007. 530 с.
 15. Рудов С.Е., Хитров Е.Г., Рудов М.Е., Устинов В.В. Расчет тяговых и сцепных свойств колесного скиддера с использованием данных зарубежных коллег // Актуальные направления науч. исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3. № 1 (12). С. 223-228.
 16. Kochnev A., Khitrov E. Theoretical models for rut depth evaluation after a forestry machine's wheel Passover // 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018. Conference proceedings, 2018. P. 1005-1012.
 17. 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.
 18. 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.
 19. Воронов Р.В., Марков О.Б., Григорьев И.В., Давтян А.Б. Математическая модель модульного принципа подбора системы машин для создания и эксплуатации лесных плантаций // Изв. высш. учеб. заведений. Лесной журнал. 2019. № 5 (371). С. 125-134.
 20. Мохирев А.П., Позднякова М.О., Куницкая О.А., Григорьев И.В. Факторы доступности древесных ресурсов: анализ влияния на ключевые критерии // Системы. Методы. Технологии. 2018. № 1 (37). С. 110-115.
 21. Бурмистрова О.Н., Просужих А.А., Рудов С.Е., Куницкая О.А., Григорьев И.В. Экспериментальные исследования производительности форвардера с учетом его эксплуатационных характеристик, параметров лесосеки, и физико-механических свойств почвогрунта // Resources and Technology. 2021. V. 18. № 1. P. 94-124.
 22. Бурмистрова О.Н., Тетеревлева Е.В., Рудов С.Е., Григорьев И.В., Куницкая О.А. Обоснование исходных требований математической модели взаимодействия колесных транспортных средств на пневматиках низкого давления с лесными почвогрунтами // Системы. Методы. Технологии. 2020. № 2 (46). С. 94-99.
 23. Бурмистрова О.Н., Тетеревлева Е.В., Рудов С.Е., Григорьев И.В., Куницкая О.А. Методика и результаты экспериментальных исследований взаимодействия колесных транспортных средств на пневматиках низкого давления с лесными почвогрунтами // Системы. Методы. Технологии. 2020. № 1 (45). С. 66-71.
 24. Dobretsov R., Grigorev I., Tikhonov E., Mikheev A., Khakhina A., Storodubtseva T., Shiryaev S., Burgonutdinov A. Impulse control technology for improving steering control systems of the tracked vehicles // International Review of Automatic Control. 2021. V. 14. № 3. P. 172-178.

References

1. Grigorev I.V., Kunickaya O.A., Rudov S.E., Davtyan A.B. Ways to improve the efficiency of forest machines // Energiya: ekonomika, tekhnika, ekologiya. 2020. № 1. P. 55-63.
2. Grigorev I.V., Kunickaya O.A., Prosuzhikh A.A., Davtyan A.B., Rudov S.E. Prospects for creating logging complexes based on domestic construction and agricultural machinery // Remont, Vosstanovlenie, Modernizatsiya (Repair, Reconditioning, Modernization). 2020. № 10. P. 3-10.
3. Manukovskij A.YU., Zorin M.V., Prosuzhikh A.A., Kunickaya O.A., Grigorev I.V. Modern approaches to improving energy efficiency and efficiency of forest machines: sb. st. po itogam shestoj mezhdunar. nauch. konf. (29-30 iyunya 2020 g.). Kazan', 2020. P. 138-140.
4. Kunickaya O.A. Proactive service for forest machines: materialy SHestoj Vseros. nac. nauch.-prakticheskoy konf. s mezhdunar. uchastiem (22 maya 2020 g.). Petrozavodsk, 2020. P. 86-87.
5. Kunickaya O.A., Prosuzhikh A.A., Davtyan A.B., Grigorev M.F., Grigoreva A.I. Organizational and technical solutions to increase the factor of technical availability of forest machines // Energoeffektivnost' i energosberezhenie v sovremennom proizvodstve i obshchestve: materialy mezhdunar. nauch.-prakticheskoy konf. (9-10 iyunya 2020 g.). Voronezh, 2020. P. 162-167.
6. Rudov S.E., Kunickaya O.A. Theoretical studies of ecological compatibility of wheeled forest machines and permafrost soils of cryolithozone forests // Transportnye i transportno-

- tehnologicheskie sistemy: materialy Mezhdunar. nauch.-tehnicheskoy konf. (22 okt. 2020 g.). Tyumen', 2020. P. 323-326.
7. Grigor'ev I.V., Kunickaya O.A., Grigor'ev M.F., Grigor'eva A.I. Modeling of dynamic compaction of soil // IX Mezhdunar. konf. po matematicheskomu modelirovaniyu, posvyashch. 75-letiyu V.N. Vragova: tez. dokladov (27 iyulya-01 avg. 2020 g.). YAkutsk, 2020. P. 144.
 8. Nikitina E.I., Kunickaya O.A., Nikolaeva F.V. Project of logging organization in conditions of Aldan forestry with the use of multi-operational logging complexes // Sovremennyye problemy i dostizheniya agrarnoy nauki v Arktike: sb. nauch. st. po materialam Vseros. studencheskoj nauch.-prakticheskoy konf. s mezhdunar. uchastiem v ramkah «Severnogo foruma - 2020» (29-30 sent. 2020 g.) i Mezhdunar. nauch. onlajn letnej shkoly - 2020 (6-20 iyulya 2020 g.). YAkutsk, 2020. P. 138-148.
 9. 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.
 10. Kunickaya O., Hertz E., Kruchinin I., Tikhonov E., Ivanov N., Dolmatov N., Zorin M., Grigorev I. Pressure control systems for tyre preservation in forestry machinery and forest soils // Asian Journal of Water, Environment and Pollution. 2021. V. 18. № 3. P. 95-102.
 11. Hahina A.M. Methods for predicting and improving the permeability of wheeled forest machines: dis. ... d-ra tekhn. nauk: 05.21.01. SPb., 2018. 318 p.
 12. Hitrov E.G. Complex substantiation of parameters and operating modes of forest machine engines: dis. ... d-ra tekhn. nauk: 05.21. Voronezh, 2020. 319 p.
 13. Agejkin YA.S. The Automobile Driving Effort. M.: Mashinostroenie, 1981. 232 p.
 14. Larin V.V. Methods of prognostication of the supportability of multi-axle wheeled vehicles on the ground: dis. ... d-ra tekhn. nauk: 05.05.03. M., 2007. 530 p.
 15. Rudov S.E., Hitrov E.G., Rudov M.E., Ustinov V.V. Calculation of traction and coupling properties of a wheeled skidder using data from foreign colleagues // Aktual'nye napravleniya nauch. issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika. 2015. V. 3. № 1 (12). P. 223-228.
 16. Kochnev A., Khitrov E. Theoretical models for rut depth evaluation after a forestry machine's wheel Passover // 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018. Conference proceedings, 2018. P. 1005-1012.
 17. Kalistratov A.V., Ivanov V.A., Korotkov R.K., Hitrov E.G., Grigor'ev G.V. Investigation of the filtration coefficient of forest soil (case of soddy-podzolic soil) // Systems. Methods. Technologies. 2014. № 2 (22). P. 190-193.
 18. Grigor'ev I.V., Nikiforova A.I., Pelymskij A.A., Hitrov E.G., Hahina A.M. Experimental determination of the stress relaxation time of the forest soil // Proceedings of Petrozavodsk State University. 2013. № 8 (137). P. 77-80.
 19. Voronov R.V., Markov O.B., Grigor'ev I.V., Davtyan A.B. Mathematical model of the modular principle of the machinery system selection for creating and operating forest plantations // Bulletin of higher educational institutions. Lesnoy zhurnal (Forestry journal). 2019. № 5 (371). P. 125-134.
 20. Mohirev A.P., Pozdnyakova M.O., Kunickaya O.A., Grigor'ev I.V. Factors of wood resources availability: analysis of influence on key criteria // Systems. Methods. Technologies. 2018. № 1 (37). P. 110-115.
 21. Burmistrova O.N., Prosuzhikh A.A., Rudov S.E., Kunickaya O.A., Grigor'ev I.V. Experimental studies of forwarder productivity with regard to its operational characteristics, logging parameters, and physical and mechanical properties of the soil // Resources and Technology. 2021. V. 18. № 1. P. 94-124.
 22. Burmistrova O.N., Teterleva E.V., Rudov S.E., Grigor'ev I.V., Kunickaya O.A. Substantiation of initial requirements of mathematical model of interaction of wheeled vehicles on low pressure pneumatics with forest soil // Systems. Methods. Technologies. 2020. № 2 (46). P. 94-99.
 23. Burmistrova O.N., Teterleva E.V., Rudov S.E., Grigor'ev I.V., Kunickaya O.A. Methods and results of experimental studies of interaction of wheeled vehicles on low pressure pneumatics with forest soils // Systems. Methods. Technologies. 2020. № 1 (45). P. 66-71.
 24. Dobretsov R., Grigorev I., Tikhonov E., Mikheev A., Khakhina A., Storodubtseva T., Shiryaev S., Burgonutdinov A. Impulse control technology for improving steering control systems of the tracked vehicles // International Review of Automatic Control. 2021. V. 14. № 3. P. 172-178.