



Теоретический анализ опорной проходимости колесного движителя лесной машины при работе на склоне

Андрей А. Кривошеев¹, ugtukrivosheev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1708-7873>

Ольга А. Куницкая², ola.ola07@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>

Ольга Н. Бурмистрова¹, oburmistrova19@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2616-7557>

Владимир А. Морковин³, morkovin-vladimir@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-5822-2254>

Александр Ю. Гурьев², sashafuryjager96@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5322-1865>

Александр В. Андронов⁴, andronovalexandr@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1035-9231>

¹ФГБОУ ВО «Ухтинский государственный технический университет», ул. Первомайская, 13, г. Ухта, Российская Федерация

²ФГБОУ ВО «Арктический государственный агротехнологический университет», шоссе Сергеляхское, 3 км, д 3, г. Якутск, Республика Саха (Якутия), Российская Федерация

³ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация

⁴ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова», Институтский переулок, 5, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Исследование носит теоретический характер и основано на анализе численного решения уравнения колебания на лесном почвогрунте с учетом потери несущей способности. Анализ результатов вычислительного эксперимента, выполненного при варьировании механических свойств почвогрунта, угла склона и веса колесного движителя, позволил получить комплексную оценку проходимости колесного движителя лесной машины, работающей на местности с уклоном, на пересеченной местности. Впервые получены формулы, основанные на результатах обработки расчетных данных, предназначенные для практического обоснования допустимых параметров колесного движителя лесной машины, работающей на склоне. Полученные расчетные данные доказывают важность учета угла склона, на котором работают колесные лесные машины, с точки зрения практического обоснования допустимых нагрузочных параметров колесного движителя. Результаты моделирования показали, что при незначительном угле склона 5° для обеспечения опорной проходимости колесного движителя вес, допустимый на горизонтальной опорной поверхности, следует снизить на 20-25%, при угле 10° требуемое снижение веса движителя составляет 40-50%. На сравнительно крутых склонах от 15° и выше требуется снижение на 65% и более от значения, допустимого для работы на горизонтальной опорной поверхности. Отмеченное позволяет рекомендовать оснащать колесные лесные машины самоходными лебедками уже при углах склона 10 – 15° для обеспечения опорной проходимости движителей. Оценка требуемой мощности возможна на базе результатов расчета коэффициента сопротивления движению. Установлено, что при сравнительно небольших углах склона, до 5°, оценка глубины колеи при весе, допустимом по критерию опорной проходимости, выше величины 0,20 м, рекомендуемой с точки зрения экологичности движителя. При весе движителя, допустимом по критерию проходимости на более крутых склонах, расчетная глубина колеи существенно меньше 0,20 м, однако действительная деформация и повреждаемость почвогрунта будет выше, что связано с воздействием грунтозацепов движителя. Тем не менее, при обеспечении проходимости машин за счет использования самоходных лебедок, можно прогнозировать «резерв» увеличения допустимого веса движителя. С учетом отмеченных обстоятельств,

в дальнейшем целесообразно провести отдельные исследования, направленные на изучение экологичности колесных движителей лесных машин, работающих на склонах.

Ключевые слова: тягово-сцепные свойства, колеобразование, несущая способность, угол результирующей нагрузки, лесные почвогрунты

Финансирование: материалы исследования получены за счет гранта Российского научного фонда № 23-16-00092, <https://rscf.ru/project/23-16-00092/>.

Благодарности: авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи. Работа выполнена в рамках научной школы «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства»

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Теоретический анализ опорной проходимости колесного движителя лесной машины при работе на склоне / А. А. Кривошеев, О. А. Куницкая, О. Н. Бурмистрова, В. А. Морковин, А. Ю. Гурьев, А. В. Андронов // Лесотехнический журнал. – 2024. – Т. 14. – № 4 (56). – С. 187-207. – Библиогр.: с. 204-206 (16 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.4/13>.

Поступила 23.08.2024 Пересмотрена 23.10.2024 Принята 03.12.2024 Опубликована онлайн 27.12.2024

Article

Theoretical analysis of the supporting cross-country ability of the wheeled propulsion of a forest machine when working on a slope

Andrey A. Krivosheev¹, ugtukrivosheev@mail.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-1708-7873>

Olga A. Kunitskaya², ola.ola07@mail.ru,  <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>

Olga N. Burmistrova¹, oburmistrova19@gmail.com,  <https://orcid.org/0000-0003-2616-7557>

Vladimir A. Morkovin³,  morkovin-vladimir@mail.ru,  <https://orcid.org/0000-0003-5822-2254>

Alexander Y. Guryev², sashafuryjager96@gmail.com,  <https://orcid.org/0000-0002-5322-1865>

Alexander V. Andronov⁴, andronovalexandr@gmail.com,  <https://orcid.org/0000-0002-1035-9231>

¹Ukhta State Technical University, 13, Pervomaiskaya str., Ukhta, Russian Federation

²Arctic State Agrotechnological University, Sergelyakhskoye Highway, 3 km, 3, Yakutsk, Republic of Sakha (Yakutia), Russian Federation

³Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 8, Timiryazeva str., Voronezh, Russian Federation

⁴Saint Petersburg State Forestry University named after S.M. Kirov, 5, Institutsky Lane, Saint Petersburg, Russian Federation

Abstract

The study is theoretical in nature and is based on the analysis of the numerical solution of the equation of rutting on forest soil, taking into account the loss of bearing capacity. The analysis of the results of a computational experiment performed by varying the mechanical properties of the soil, the angle of slope and the weight of the wheel mover allowed us to obtain a comprehensive assessment of the cross-country ability of the wheel mover of a forest machine operating on a terrain with a slope, on rough terrain. For the first time, formulas based on the results of processing calculated data were obtained, intended for practical justification of the permissible parameters of the wheeled propulsion of a forest

machine operating on a slope. The calculated data obtained prove the importance of taking into account the angle of the slope on which wheeled forestry machines operate, from the point of view of practical justification of the permissible load parameters of the wheeled propulsion. The simulation results showed that with an insignificant slope angle of 5°, in order to ensure the supporting cross-country ability of the wheel mover, the weight allowed on the horizontal support surface should be reduced by 20-25%, with an angle of 10°, the required reduction in the weight of the mover is 40-50%. On relatively steep slopes from 15° and above, a decrease of 65% or more from the value allowed for operation on a horizontal support surface is required. This makes it possible to recommend equipping wheeled forestry machines with self-propelled winches already at slope angles of 10 - 15° to ensure the supporting cross-country ability of the propellers. The estimation of the required power is possible based on the results of the calculation of the coefficient of resistance to movement. It was found that at relatively small slope angles, up to 5°, the assessment of the depth of the track at a weight acceptable according to the criterion of support patency is higher than 0.20 m, recommended from the point of view of environmental friendliness of the propulsion. With the weight of the mover acceptable according to the criterion of passability on steeper slopes, the estimated track depth is significantly less than 0.20 m, however, the actual deformation and damage to the soil will be higher, which is due to the impact of the mover's ground hooks. Nevertheless, while ensuring the cross-country ability of vehicles through the use of self-propelled winches, it is possible to predict a "reserve" increase in the permissible weight of the propulsion. Taking into account the above circumstances, in the future it is advisable to conduct separate studies aimed at studying the environmental friendliness of wheeled propellers of forest machines operating on slopes.

Keywords: *traction properties, track formation, bearing capacity, angle of resultant load, forest soils*

Funding: The research materials were obtained through a grant from the Russian Science Foundation No. 23-16-00092, <https://rscf.ru/project/23-16-00092/>.

Acknowledgments: authors thank the reviewers for their contribution to the peer review. The work was carried out within the framework of the scientific school "Innovative developments in the field of logging industry and forestry".

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

For citation: Krivosheev A. A., Kunitskaya O. A., Burmistrova O. N., Morkovin V. A., Guryev A. Yu., Andronov A. V. (2024) Theoretical analysis of the supporting cross-country ability of the wheeled propulsion of a forest machine when working on a slope. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 14, No. 4 (56), pp. 187-207 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.4/13>.

Received 23.08.2024. **Revised** 23.10.2024. **Accepted** 03.12.2024. **Published online** 27.12.2024.

Введение

Научные знания о механизмах взаимодействия движителей машин с различными типами опорных поверхностей являются ключевым элементом научной базы, необходимой как для проектирования технологических процессов, так и для создания конструктивных элементов лесных машин. Эти сведения оказываются незаменимыми при разработке современных, экологически безопасных и высокоэффективных технологий, способных минимизировать воздействие на почвенный покров в ходе лесозаготовительных работ. Более того, подобные

знания критично важны для формирования усовершенствованных образцов колесной и гусеничной техники, адаптированной к эксплуатации в целой гамме сложных и экстремальных природных условий. К числу таких условий относятся лесные почвогрунты, демонстрирующие значительную подверженность деформациям под движителями, а также особо сложные среды, включающие избыточно увлажнённые или заболоченные территории, глубокий снежный покров, рыхлые и нестабильные грунты.

Актуальность исследований в этой области стремительно возрастает в свете современных стратегических приоритетов, направленных на замещение импортной лесной техники отечественными аналогами. Реализация данной задачи требует разработки высокотехнологичных и конкурентоспособных решений, способных не только соответствовать мировым стандартам, но и удовлетворять специфическим требованиям российской лесной отрасли. Разработка таких машин невозможна без глубокого понимания процессов распределения давления движителей на грунт, оценки сцепных характеристик и анализа механики деформации почвы в условиях значительных нагрузок [1,2].

В отечественной науке изучение вопросов взаимодействия движителей лесных, сельскохозяйственных и других машин с различными поверхностями, включая почвы и грунты, ведется на протяжении десятилетий специалистами в разных отраслях. Исследования охватывают задачи, связанные с сельским и лесным хозяйством, строительной индустрией, эксплуатацией специальной военной техники. Сформировалась научная основа, включающая теорию движения автомобильного транспорта по бездорожью.

Теоретические положения этой науки имеют межотраслевое значение: они успешно применяются для решения проблем лесозаготовительного производства, где взаимодействие движителя с почвенной средой является ключевым фактором.

Базовые положения этой научной теории опираются на основные законы механики: механику грунтов, механику контактного взаимодействия и механику деформируемого тела. Эти разделы механики лежат в основе понимания процессов передачи тяговых усилий через движитель на почвогрунт, а также управления параметрами проходимости транспортных средств по деформируемым средам [3]. Благодаря этим теоретическим разработкам удалось возможным прогнозировать поведение машин в условиях сложного рельефа и нестабильных почв, разрабатывать конструктивные решения, учитывающие особенности взаимодействия подвижных систем с почвенной средой, и апробировать новые

технологические подходы, направленные на минимизацию разрушающего воздействия на почвенный покров.

Аналогичные исследования ведутся и за рубежом, где сформировалась отдельная научная область исследований, известная как "террамеханика" (terramechanics). Этот термин обозначает применение механики грунтов для анализа процессов взаимодействия движителей машин с различными типами опорных поверхностей. Основной акцент террамеханики сделан на изучении и моделировании взаимодействия движителей колесных и гусеничных машин с почвами, грунтами и другими деформируемыми поверхностями. Этот научный подход активно используется в разнообразных отраслях: от сельского хозяйства и строительства до проектирования внедорожной и военной техники. Проблемное поле исследований террамеханики охватывает такие критически важные вопросы, как сцепные свойства движителей, величина и распределение давления на грунт, энергоэффективность движения по мягким и наклонным поверхностям.

По сравнению с отечественными исследованиями, международные работы отличаются акцентом на цифровую обработку данных, моделирование сложных грунтовых условий и применение машинного обучения для создания предсказательных моделей проходимости техники. Таким образом, научные исследования и теоретические разработки, связанные с взаимодействием движителей лесных машин с опорными поверхностями, формируют междисциплинарное научное поле и играют ключевую роль в науке и практике проектирования современной техники. Эти исследования также обеспечивают инструменты и подходы для повышения экологичности и эффективности технологий в лесозаготовительной отрасли. Сравнение отечественного и зарубежного опыта показывает, что они взаимно дополняют друг друга: отечественные подходы сильны в фундаментальной теории, в то время как международные исследования акцентируются на разработке адаптивных технологий для внедрения в сложные эксплуатационные условия

Обоснование параметров и режимов работы движителей лесных машин является классической научной задачей лесоинженерного дела. Ранее были

представлены положения, прогнозирующие показатели колеобразования, коэффициенты сопротивления движению, сцепления и тяги для колесных и гусеничных движителей лесной техники, работающей в условиях лесных почвогрунтов различных категорий прочности [4]. Положения получили развитие и активно используются исследователями в рамках научной школы «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства» Арктического государственного агротехнологического университета. В основе разработанных математических моделей лежат уравнения механики грунтов [5], связывающие показатели деформирования почвогрунтов, их механические свойства и характеристики воздействия движителей лесных машин на опорную поверхность, такие как вес либо давление, форма пятна контакта, время воздействия и проч. Результативно выполнена реализация таких моделей [4]: получены практические оценки проходимости и экологичности лесной техники как при прямолинейном движении, так и при движении с поворотом. Для реализации моделей использован вычислительный эксперимент с последующей верификацией расчетных данных путем сопоставления с полевыми и лабораторными опытными данными, а также со сведениями независимых источников. Принципиально, математические модели позволяют учесть направление вектора приложения нагрузки к опорной поверхности и ее уклон [5], что необходимо при изучении движения лесных машин по крутым склонам. Получены результаты оценки тягово-сцепных свойств и повреждаемости почвогрунтов склонов для гусеничных движителей [5]. Ведутся исследования в области моделирования свойств и обоснования допустимых показателей воздействия лесной техники на оттаивающие грунты склонов в арктических и субарктических условиях [6]. Изложена общая постановка задачи и получены частные оценки показателей колеобразования и проходимости колесных лесных машин, работающих на склонах [7]. Тем не менее, проблематика обоснования параметров и режимов работы движителей колесных лесных машин, предназначенных для условий сильно пересеченной местности, изучена не в полной мере. Не представлены результаты, позволяющие обосновать допустимый вес

либо давление колесного движителя по пятну контакта при варьировании уклона опорной поверхности в диапазоне, соответствующем природно-производственным условиям нашей страны. Отсутствуют результаты, позволяющие в перспективе оценить и обосновать мощность двигателя лесных машин, работающих на склонах. Важно отметить, что изучение движения машин на пересеченной местности актуально и для зарубежных исследователей, что отмечается в статьях в ведущих отечественных и зарубежных научных журналах. Проблематика считается сложной с точки зрения теоретической проработки, применяются современные методы математического и численного моделирования, такие как метод конечных элементов [7-10], аппарат теории клеточных автоматов [8]. Результаты представляют интерес не только для лесоинженерной области, но и для природопользования [15] и механики грунтов в целом [10; 11-14, 16]. Для получения дальнейших практических результатов требуются отдельные исследования, чему и посвящена настоящая статья.

Материалы и методы

Исследование носит теоретический характер и основано на анализе численного решения уравнения колеобразования на лесном почвогрунте с учетом потери несущей способности [3,4]. При получении решения учтено увеличение толщины деформируемого слоя почвогрунта по направлению результирующего воздействия, а также снижение несущей способности при отклонении вектора результирующей нагрузки от нормали к опорной поверхности. Таким образом, учитывается угол склона поверхности движения лесной машины. В работе проводится вычислительный эксперимент при варьировании механических свойств почвогрунта, угла склона и веса колесного движителя. Оценка проходимости выполняется с учетом угла склона в результате вычисления силы сопротивления движению и сцепления колесного движителя с почвенно-грунтовой поверхностью склона. Основой для определения силы сопротивления являются положения теории движения машин в условиях бездорожья [4]: используются расчетные данные, устанавливающие функцию нормального давления от глубины колеи. При определении сцепления выполняется численное интегрирование функции касательного напряжения по

длине пятна контакта при линейной функции сдвига от горизонтальной координаты, с учетом ослабления почвенно-грунтовой поверхности при возможном срезе [4]. Механические свойства почвогрунта, включая сцепные и фрикционные, определяются модулем деформации по апробированным эмпирическим зависимостям [4]. Реализация математических моделей выполняется для угла склона до 30°, для лесных почвогрунтов II и III категорий прочности, при стандартных параметрах колесного движителя: диаметр $d = 1,333$ м, ширина шины $B = 0,7$ м, давление в шине $p_w = 0,35$ МПа, шаг грунтозацепов $t_{gr} = 0,21$ м. Для проведения расчета использована программа, подготовленная на имплементируемом языке программирования Python в IDE Jupyter Notebook.

Результаты

Вначале приведем общие формулы, образующие математическую модель, реализуемую в настоящей работе. Основное уравнение, решение которого прогнозирует образование колеи, следующее [4]:

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

где h – глубина колеи, образующейся на почвогрунте под воздействием движителя, p – среднее давление колесного движителя по пятну контакта, K – коэффициент податливости почвенно-грунтовой опорной поверхности, p_s – несущая способность почвогрунта, деформируемого колесным движителем, J – коэффициент учета формы пятна контакта, H – толщина деформируемого слоя почвогрунта (также мощность слоя), a – коэффициент затухания деформации почвогрунта по глубине, b – средняя ширина пятна контакта.

Мощность H почвенно-грунтовой поверхности склона определим на основе [2], но непосредственно с учетом угла результирующей нагрузки β :

$$H = \frac{2b}{\cos \beta}, \quad (2)$$

тогда для a получим по [2]:

$$a = 0,64 \left(1 + \frac{b}{H}\right) = 0,64 \left(1 + \frac{\cos \beta}{2}\right) \quad (3)$$

Выражение для J [2]:

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

где l – средняя длина пятна контакта, которую определим с учетом эластичности колесного движителя [2]:

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

где d – диаметр колеса, радиальная деформация колеса h_w рассчитывается по формуле Хейдекеля:

$$h_w = \frac{0,5w^{3/4}}{1 + p_w}, \quad (6)$$

где w – вес колесного движителя [МН], p_w – внутреннее давление в шине [МПа].

Примем допущение о близости формы пятна контакта к прямоугольнику и среднее давление p определим как частное:

$$p = \frac{w}{bl'} \quad (7)$$

причем, ввиду (5), (6), отметим нелинейную связь p и w , учитывающую как радиальную деформацию колесного движителя, так и глубину колеи h .

Поскольку исследуется случай работы лесных машин на склоне, учтем угол приложения результирующей нагрузки. Запишем в общем виде уравнения для расчета несущей способности деформируемой почвенно-грунтовой поверхности p_s [МПа] [1;2]:

$$\left\{ \begin{array}{l} p_s = p_{s0} \alpha_z \\ p_{s0} = 0,5J_1 B_1 N_1 b \gamma + N_2 \gamma h + J_3 B_3 N_3 C \\ J_1 = \frac{l}{l + 0,4b}, J_3 = \frac{l + b}{l + 0,5b} \\ B_1 = \frac{\pi - 4\beta \operatorname{tg} \varphi}{\pi + 4\beta \operatorname{tg} \varphi}, B_3 = \frac{3\pi - 2\beta}{3\pi + 2\beta} \\ N_1 = \frac{1 - \text{III}^4}{\text{III}^5}, N_2 = \frac{1}{\text{III}^2}, N_3 = \frac{2 \cdot (1 + \text{III}^2)}{\text{III}^3}, \text{III} = \operatorname{tg} \frac{\pi - 2\varphi}{4} \\ \alpha_z = 1 + h \cdot H_z \\ H_z = \frac{\frac{\sqrt{2}}{2} b \operatorname{tg} \varphi \cos \frac{3\varphi}{4} \exp\left[\left(\frac{\pi}{4} + \frac{3\varphi}{4}\right) \operatorname{tg} \frac{3\varphi}{4}\right]}{2H \cdot \left(H - h - 0,25 \frac{\sqrt{2}}{2} b \operatorname{tg} \varphi \cos \frac{3\varphi}{4} \exp\left[\left(\frac{\pi}{4} + \frac{3\varphi}{4}\right) \operatorname{tg} \frac{3\varphi}{4}\right]\right)} \end{array} \right. \quad (8)$$

где p_{s0} – оценка несущей способности почвенно-грунтовой опорной поверхности без учета мощности, α_z – коэффициент учета мощности почвенно-грунтовой опорной поверхности, J_1, J_2 – коэффициенты, учитывающие соотношение сторон пятна контакта, N_1, N_2, N_3 – коэффициенты, учитывающие фрикционные свойства почвенно-грунтовой опорной поверхности, III, H_z – вспомогательные обозначения.

В формулах (8) и далее используются механические параметры почвогрунта, а именно – удельное сцепление C [МПа], удельный вес γ [МН/м³], угол внутреннего трения φ [°], модуль сдвига G [МПа].

Показано, что их значения связаны с модулем общей деформации лесного почвогрунта E [МПа] [4]:

$$\begin{aligned} C &= 10,774E^{0,7737}, \varphi \\ &= 13,669E^{0,1818}, \\ \gamma &= 8,4008E^{0,1168}, G \\ &= 2,4388E^{0,1161}, \end{aligned} \quad (9)$$

Важно отметить, что «результатирующий» угол β определяется с учетом угла склона α и угла δ , связанного с соотношением касательного и нормального воздействия колесного движителя на почвенно-грунтовую опорную поверхность:

$$\beta = \alpha + \delta = \alpha + \arctg \frac{\tau}{p}, \quad (10)$$

где τ – среднее значение касательного напряжения, вызванного сдвигом почвогрунта при движении машины, вдоль пятна контакта.

Величина τ определяется интегрированием функции τ_x [1;2]:

$$\tau = \frac{1}{l} \int_0^l \tau_x dx, \quad (11)$$

и, помимо уточнения угла β , используется при расчете коэффициента сцепления движителя с опорной поверхностью, определяемого как отношение касательной силы F_τ и веса w [1;2]:

$$\mu = \frac{F_\tau}{w} = \frac{bl\tau}{w} = b \int_0^l \tau_x dx \quad (12)$$

Функция τ_x вводится с учетом ослабления опорной поверхности при возможном срезе [4,5]:

$$\tau_x = \frac{1}{\frac{1}{p \operatorname{tg} \varphi + \xi C I(\xi)} + \frac{t_{\text{гр}}}{Gj}} \quad (13)$$

где $t_{\text{гр}}$ – шаг грунтозацепов колесного движителя, ξ – коэффициент снижения удельного сцепления почвогрунта, учитывающий возможный срез, j – сдвиг почвенно-грунтовой опорной поверхности, $I(\arg)$ – индикаторная функция:

$$\begin{cases} I(\arg) = 1, \arg \geq 0 \\ I(\arg) = 0, \arg < 0 \end{cases} \quad (14)$$

Выражение для ξ имеет вид [1;2]:

$$\begin{aligned} \xi &= 1 - \frac{j - j_0}{t_{\text{гр}}} I(j - j_0), j_0 \\ &= \frac{t_{\text{гр}}(p \operatorname{tg} \varphi + C)}{G} \sqrt{\frac{G}{C} - 1} \end{aligned} \quad (15)$$

где j_0 – коэффициент, связанный со сдвиговыми свойствами почвенно-грунтовой поверхности и шагом грунтозацепов.

Зависимость сдвига от координаты принимается в виде линейной функции [2]:

$$j = Sx, \quad (16)$$

где коэффициент пропорциональности S характеризует буксование движителя (в расчетах принимается для колесного движителя $S = 0,2$).

Решение уравнения (1) проводится численно с учетом уравнений математической модели (2) – (16).

Для завершения оценки проходимости колесного движителя лесной машины на склоне приведем выражения для коэффициента сопротивления движению, представляющего собой частное силы сопротивления $F_{\text{сопр}}$ и веса w [4]:

$$\varphi_{\text{сопр}} = \frac{F_{\text{сопр}}}{w} = \frac{1}{w} b \int_0^h p(h) dh \quad (17)$$

Критерий проходимости движителя на склоне запишем в виде неравенства:

$$\varphi_P = \mu - \varphi_{\text{сопр}} > \operatorname{tg} \alpha, \quad (18)$$

где φ_P – коэффициент тяги.

Входными параметрами при реализации модели являются $B, d, p_w, t_{\text{гр}}, S, w, E, \alpha$.

Для расчета сопротивления в (17) выполняется интегрирование функции $p(h)$. Получить ее запись в элементарных функциях не представляется возможным. Для получения практических результатов решение (1) проводится при варьировании веса $w = \text{var} = \{w_0; w_1; \dots; w_j; \dots w\}$ с некоторым шагом, в пределах от 0 до заданного значения w . Результаты вычислений представляют собой табличные функции p от h , позволяющие выполнить приближенное интегрирование (17).

Ввиду наличия индикаторной функции в (13) интегрирование (12) на каждом шаге также выполняется численно.

Таким образом, при «однократном» вычислении показателей колесобразования и проходимости колесного движителя на склоне, при заданных значениях $B, d, p_w, t_{\text{гр}}, S, w, E, \alpha$, проводится серия расчетов, связанных как с многократным решением нелинейного уравнения (1), так и с «промежуточным»

численным интегрированием (12), (17). Полноценная реализация математической модели представляет собой вычислительный эксперимент при управлении значениям входных параметров для выявления их связи с h , μ , $\varphi_{\text{сопр}}$, φ_p . С точки зрения проведения расчетов задача ресурсоемка, даже при современном уровне развития вычислительных средств для обеспечения устойчивости вычислительной схемы требуются начальные приближения к решению (1). Его нелинейная структура осложнена учетом угла β при определении несущей способности p_s и мощности слоя H , а также переменной длиной пятна контакта l эластичного колесного движителя. В нашем исследовании для получения надежных начальных приближений к решению h_j используются результаты, полученные на предыдущем шаге расчета при w_{j-1} , шаг принимается постоянным, $w_j - w_{j-1} = 0,001w$, $j = 1, 2 \dots$, $w_0 = 0$, $h_0 = 0$.

На рис. 1 приведен пример результатов расчета для случая, когда колесный движитель воздействует на опорную поверхность, представленную слабонесущим лесным почвогрунтом III категории прочности, модуль деформации $E = 0,4$ МПа [4].

Оценка среднего значения давления по пятну контакта p снижается, поскольку длина пятна контакта l увеличивается по мере увеличения угла склона α , что связано с большей глубиной образующейся колеи h , рис. 2.

При равном весе колесного движителя w , большим значениям угла склона α соответствуют большие значения глубины колеи h , это обстоятельство следует из предпосылок, заложенных в математическую модель, учитывающих снижение несущей способности почвогрунта p_s при отклонении β результирующей нагрузки от нормали к опорной поверхности. Пример результатов расчета несущей

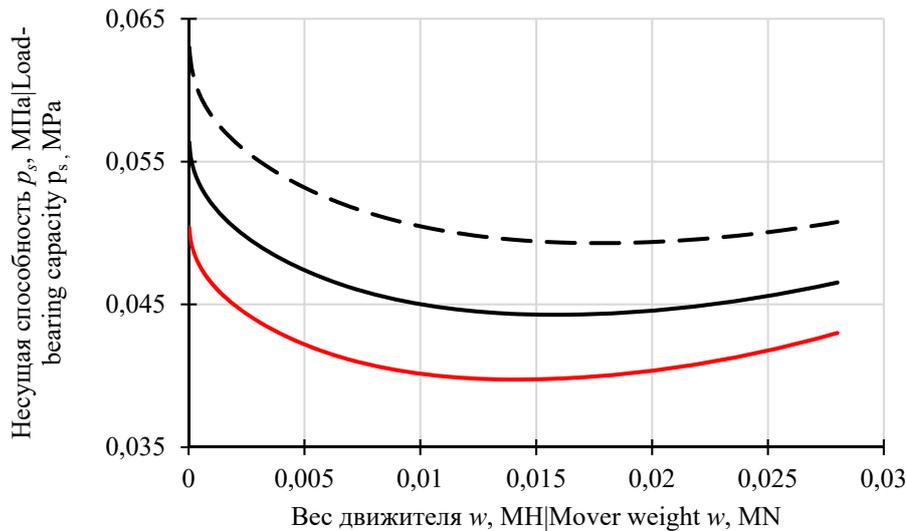
способности p_s с учетом угла склона α приведен на рис. 3.

На рис. 4 приведены результаты сопоставления среднего давления p с несущей способностью почвенно-грунтовой опорной поверхности p_s , рассчитанной без учета глубины образующейся колеи h . Такая оценка зачастую используется при формулировании рекомендаций по подбору допустимых параметров движителей лесных машин, поскольку несущая способность недеформированного почвогрунта оперативно определяется в полевых условиях путем зондирования. При увеличении веса w соотношение $p/p_s > 1$, что не является ошибкой либо противоречием, поскольку математическая модель учитывает повышение несущей способности по мере увеличения глубины колеи h .

Пример результатов численного интегрирования функции давления p от глубины колеи h , образующейся при различном весе w , приведены на рис. 5. Отмечается повышение коэффициента сопротивления движению $\varphi_{\text{сопр}}$ при увеличении угла склона α , что связано с характером функции $p(h)$.

В результате интегрирования функции касательного напряжения τ_x при различных углах склона отмечаются близкие оценки коэффициента сцепления μ , рис. 6, поскольку каких-либо физических предпосылок к изменению оценки сцепления на настоящем этапе исследований в математическую модель не заложено.

Для итоговой оценки проходимости колесного движителя используется критерий (18), в основе которого лежит оценка коэффициента тяги φ_p . На рис. 7 приведен пример результатов вычислительного эксперимента, иллюстрирующий снижение оценки φ_p при увеличении угла α , что связано с повышенными значениями коэффициента сопротивления $\varphi_{\text{сопр}}$.

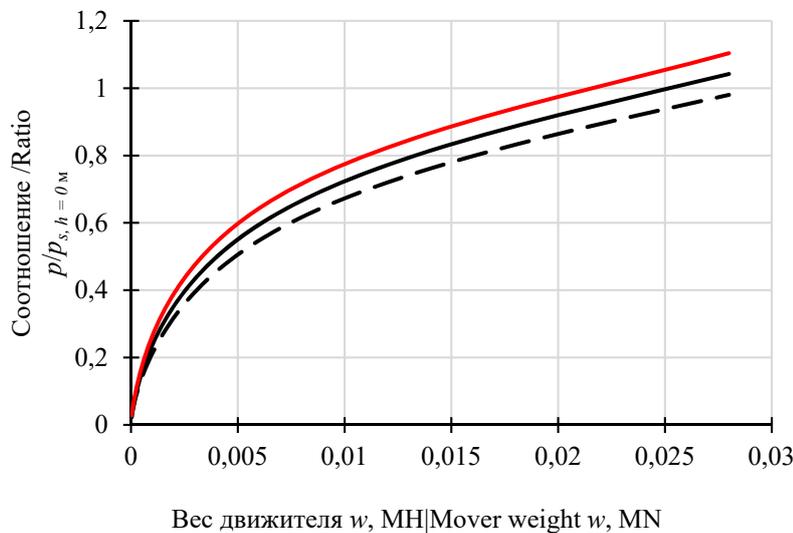


- Горизонтальная ОП Horizontal support surface
- Угол склона 30 градусов Slope angle 30 degrees
- Угол склона 15 градусов Slope angle 15 degrees

Рисунок 3. Зависимость несущей способности слабонесущей почвенно-грунтовой опорной поверхности от веса колесного движителя

Figure 3. Dependence of the load-bearing capacity of a low-bearing soil-soil support surface on the weight of the wheel mover

Источник: собственная композиция авторов | Source: authors' composition

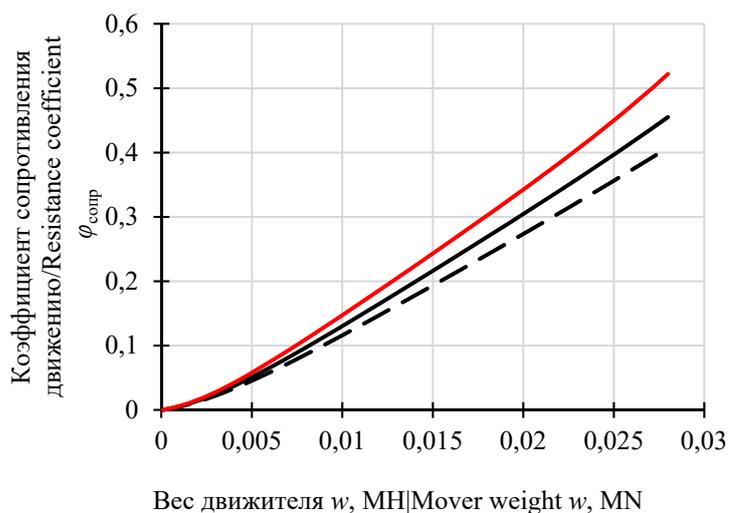


- Горизонтальная ОП Horizontal support surface
- Угол склона 30 градусов Slope angle 30 degrees
- Угол склона 15 градусов Slope angle 15 degrees

Рисунок 4. Соотношение несущей способности слабонесущей почвенно-грунтовой опорной поверхности и среднего давления колесного движителя при изменении веса

Figure 4. The ratio of the bearing capacity of a weakly bearing soil-soil support surface and the average pressure of a wheel mover with a change in weight

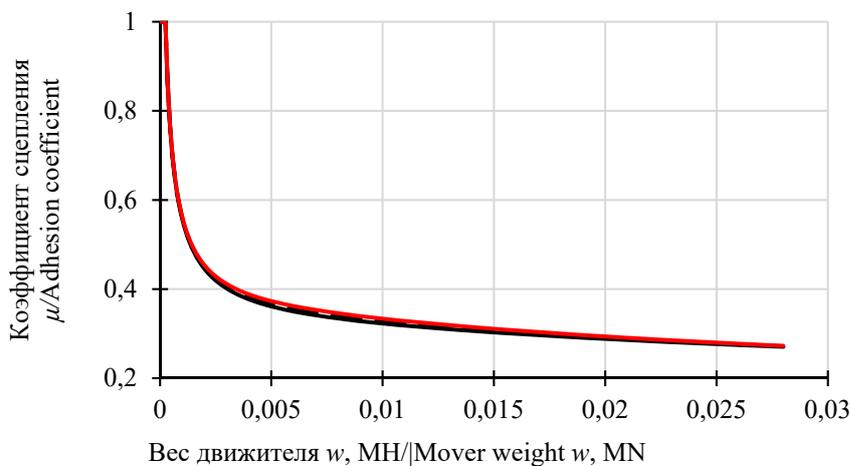
Источник: собственная композиция авторов | Source: authors' composition



- - - Горизонтальная ОП Horizontal support surface
- Угол склона 30 градусов Slope angle 30 degrees
- Угол склона 15 градусов Slope angle 15 degrees

Рисунок 5. Коэффициент сопротивления движению в зависимости от веса колесного движителя
 Figure 5. Coefficient of resistance to movement depending on the weight of the wheel mover

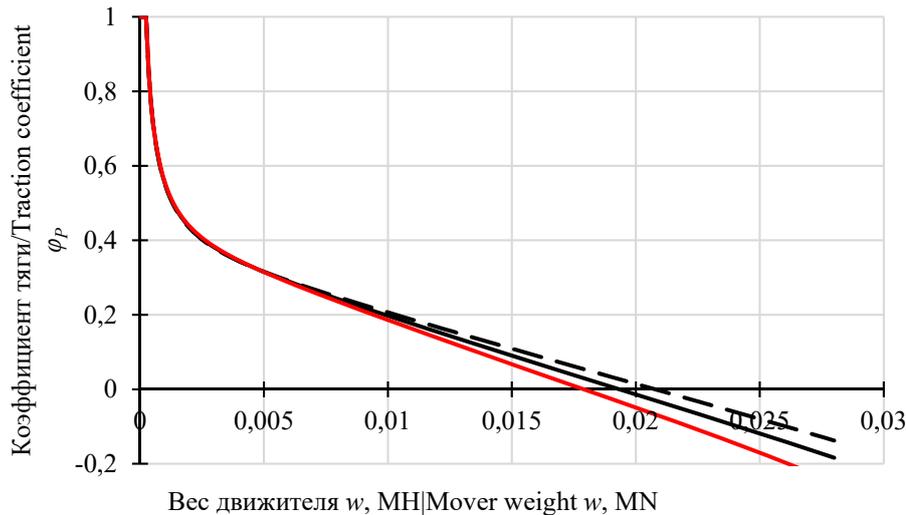
Источник: собственная композиция авторов
 Source: author's composition



- - - Горизонтальная ОП Horizontal support surface
- Угол склона 30 градусов Slope angle 30 degrees
- Угол склона 15 градусов Slope angle 15 degrees

Рисунок 6. Коэффициент сцепления колесного движителя в зависимости от веса
 Figure 6. The coefficient of adhesion of the wheel drive depending on the weight

Источник: собственная композиция авторов
 Source: authors' composition



- - - Горизонтальная ОП Horizontal support surface
- Угол склона 30 градусов Slope angle 30 degrees
- Угол склона 15 градусов Slope angle 15 degrees

Рисунок 7. Коэффициент тяги колесного движителя в зависимости от веса
 Figure 7. The coefficient of traction of the wheel drive depending on the weight

Источник: собственная композиция авторов
 Source: authors' composition

Обсуждение

Вычисления показали, что увеличение угла склона влияет на расчетные значения колесобразования и тягово-сцепных свойств, предпосылки, заложенные в математическую модель, отражены в полученных результатах. Вычислительный эксперимент реализован с шагом по углу склона α в 5° . В табл. 1 приведены результаты расчета допустимых по критерию (18) показателей воздействия колесного движителя на почвенно-грунтовую опорную поверхность III и II категории прочности (соотв. слабонесущий лесной почвогрунт, $E = 0,4$ МПа [1], и лесной почвогрунт средней прочности, $E = 1,0$ МПа [4]). Учтено повышение требуемого коэффициента тяги ϕ_p , при котором обеспечивается опорная проходимость колесного движителя на склоне.

Приведем иллюстрации результатов расчетов. На рис. 8 показаны функции коэффициентов сопротивления движению $\phi_{\text{сопр}}$ и сцепления μ , используемых при оценке проходимости движителя. Вес движителя w соответствует максимально допустимому значению (табл. 1).

Схожие результаты получены для почвенно-грунтовой поверхности склона средней прочности (табл. 1).

Графики на рис. 9 иллюстрируют расчетное значение глубины колеи h , полученное как решение уравнения (1), при максимально допустимом весе движителя w . Отметим, что иллюстрация выполнена для расчетного значения h , действительная деформация и повреждаемость почвогрунта выше, что связано с воздействием грунтозацепов движителя. При сравнительно небольших углах склона α оценка h выше рекомендуемой $h = 0,20$ м [4], поскольку обоснование допустимого веса w выполнено по критерию проходимости (18). С учетом отмеченных обстоятельств, в дальнейшем целесообразно провести отдельные исследования, направленные на изучение экологичности колесных движителей лесных машин, работающих на склонах.

Функции среднего давления p допустимого по критерию (18), от угла склона α проиллюстрированы на рис. 10.

Для практических расчетов предложим результаты аппроксимации полученных данных, линейно

связывающие допустимое давление p [МПа] и угол склона α [°], для слабонесущих (III категория) и среднепрочных (II категория) почвенно-грунтовых опорных поверхностей соответственно:

$$p = -0,0011\alpha + 0,0442, \quad (19)$$

$$p = -0,0032\alpha + 0,1185, \quad (20)$$

Дальнейший анализ математической модели позволит обобщить результаты и представить оценки допустимого воздействия машин на опорные поверхности склонов не только по категориям прочности почвогрунта, но и при варьировании значений механических свойств. На рис. 11 приведены результаты, иллюстрирующие соотношение давления p и несущей способности недеформированного почвогрунта поверхности склона $p_{s, h=0 м}$.

Полученные данные для допустимого соотношения $p/p_{s, h=0 м}$ удобно аппроксимировать следующими функциями, для слабонесущих (III категория) и среднепрочных (II категория) почвенно-грунтовых опорных поверхностей соответственно:

$$\frac{p}{p_{s, h=0 м}} = -0,022\alpha + 0,9196, \quad (21)$$

$$\frac{p}{p_{s, h=0 м}} = -0,0004\alpha^2 - 0,0196\alpha + 1,1368, \quad (22)$$

где α – угол склона[°].

Формулы (18) – (22) основаны на расчетных данных, полученных впервые, и предназначены для практического обоснования допустимых параметров колесного движителя лесной машины, работающей на склоне. Формулы составлены относительно среднего давления p [МПа], которое, с учетом эластичности колесного движителя, вычисляется при заданных значениях веса w [МН], ширины B и диаметра колеса d , внутреннего давления в шине p_w и E , p_s [МПа] по формуле [16]:

$$p \approx 37,52d^{-0,38}B^{-0,41}p_w^{0,14}w^{0,45}E^{0,16}p_s^{0,35}, \quad (23)$$

либо принимаем приближенно:

$$p \approx NGP = \frac{2w}{Bd}, \quad (24)$$

где NGP – номинальное (условное) давление движителя на почвогрунт.

Графики, приведенные на рис. 12, наглядно иллюстрируют влияние угла склона α на технологический параметр – допустимый по критерию (18) вес w колесного движителя лесной машины.

Таблица 1

Результаты расчета допустимых показателей воздействия колесного движителя на почвенно-грунтовую опорную поверхность склона

Table 1

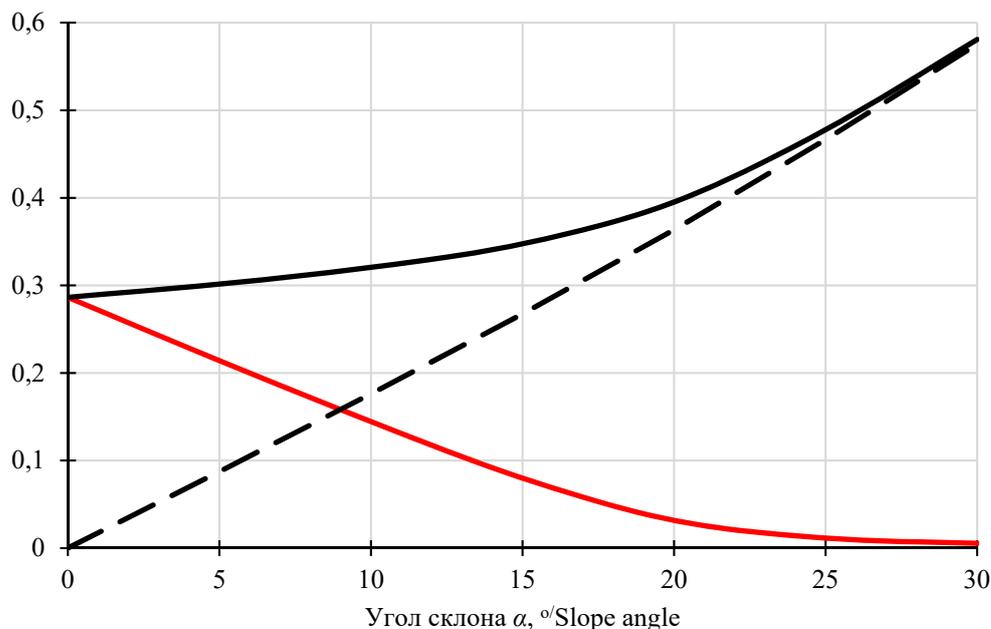
The results of calculating the permissible indicators of the impact of the wheel mover on the soil-soil support surface of the slope

Категория опорной поверхности The category of the support surface	α , °	w , МН MN	p , Мпа MPa	p_s , МПа MPa	$p/p_{s, h=0 м}$	h , м	φ_R	μ	φ_P
II	0	0,0662	0,1145	0,1029	1,1131	0,2842	0,2923	0,2924	0,0001
II	5	0,0522	0,1028	0,0991	1,0376	0,1820	0,2149	0,3024	0,0874
II	10	0,0380	0,0908	0,0967	0,9393	0,0972	0,1389	0,3153	0,1764
II	15	0,0236	0,0760	0,0964	0,7885	0,0359	0,0674	0,3356	0,2681
II	20	0,0109	0,0539	0,0984	0,5478	0,0071	0,0192	0,3834	0,3643
II	25	0,0049	0,0350	0,0994	0,3523	0,0015	0,0057	0,4726	0,4669
II	30	0,0027	0,0245	0,0987	0,2484	0,0005	0,0025	0,5812	0,5786
III	0	0,0208	0,0433	0,0494	0,8764	0,2318	0,2863	0,2865	0,0002
III	5	0,0158	0,0387	0,0476	0,8133	0,1461	0,2141	0,3016	0,0875
III	10	0,0112	0,0342	0,0465	0,7357	0,0788	0,1445	0,3207	0,1762

III	15	0,0069	0,0291	0,0462	0,6298	0,0323	0,0800	0,3476	0,2676
III	20	0,0035	0,0225	0,0469	0,4809	0,0087	0,0317	0,3953	0,3637
III	25	0,0016	0,0160	0,0472	0,3384	0,0022	0,0115	0,4780	0,4666
III	30	0,0009	0,0117	0,0466	0,2503	0,0008	0,0054	0,5810	0,5756

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations



- требуемый коэффициента тяги Required Traction Coefficient
- коэффициент сопротивления Resistance Coefficient
- коэффициент сцепления Adhesion Coefficient

Рисунок 8. Результаты расчета тягово-сцепных свойств колесного движителя с учетом угла склона, слабонесущая почвенно-грунтовая опорная поверхность (III категория)

Figure 8. The results of calculating the traction properties of a wheel mover, taking into account the angle of the slope, a weakly bearing soil-soil support surface (category III)

Источник: собственная композиция авторов

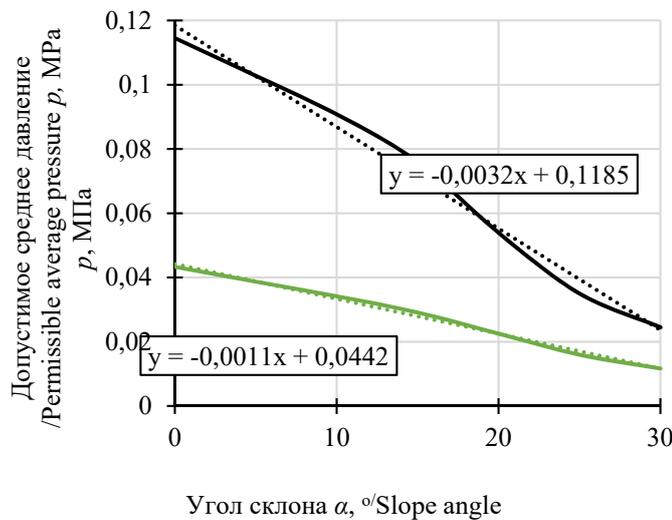
Source: authors' composition



— III категория (слабонесущая)/ Category III (weakly load-bearing)
 — II категория (средней прочности)/ Category II (medium strength)

Рисунок 9. Глубина колеи, образующейся при работе колесного движителя, с учетом угла склона при допустимом весе движителя, ограниченном требуемым коэффициентом тяги
 Figure 9. The depth of the track formed during the operation of the wheel mover, taking into account the slope angle with the permissible weight of the mover limited by the required thrust coefficient

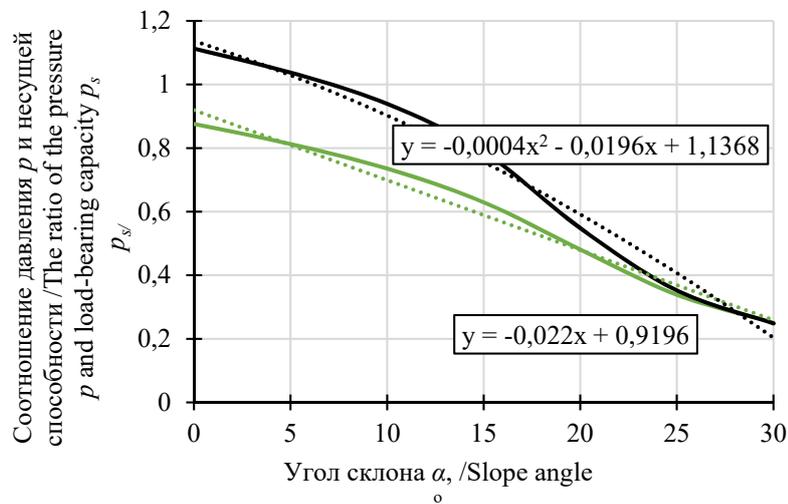
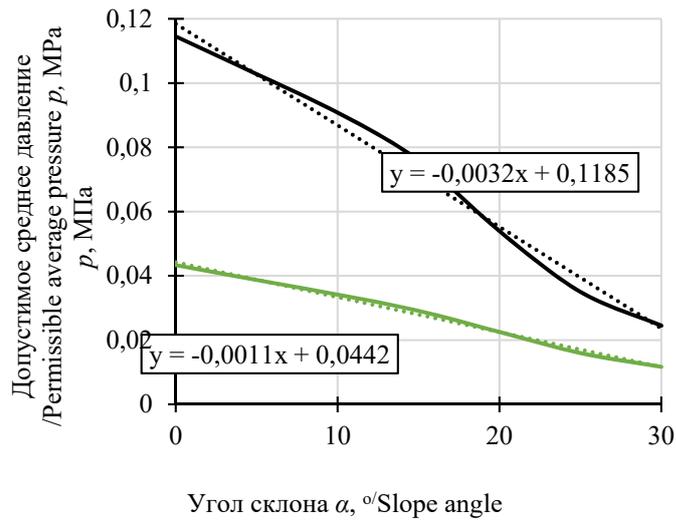
Источник: собственная композиция авторов
 Source: authors' composition



— III категория (слабонесущая)/ Category III (weakly load-bearing)
 — II категория (средней прочности)/ Category II (medium strength)

Рисунок 10. Допустимое среднее давление колесного движителя на почвенно-грунтовую опорную поверхность склона, ограниченное требуемым коэффициентом тяги
 Figure 10. The permissible average pressure of the wheel mover on the soil-soil support surface of the slope, limited by the required thrust coefficient

Источник: собственная композиция авторов
 Source: authors' composition



— III категория (слабонесущая) / Category III (weakly load-bearing)
 — II категория (средней прочности) / Category II (medium strength)

Рисунок 11. Соотношение среднего давления и несущей способности почвенно-грунтовой опорной поверхности склона, ограниченное требуемым коэффициентом тяги

Figure 11. The ratio of the average pressure and bearing capacity of the soil-soil support surface of the slope, limited by the required coefficient of traction

Источники: собственная композиция авторов
Source: authors' composition

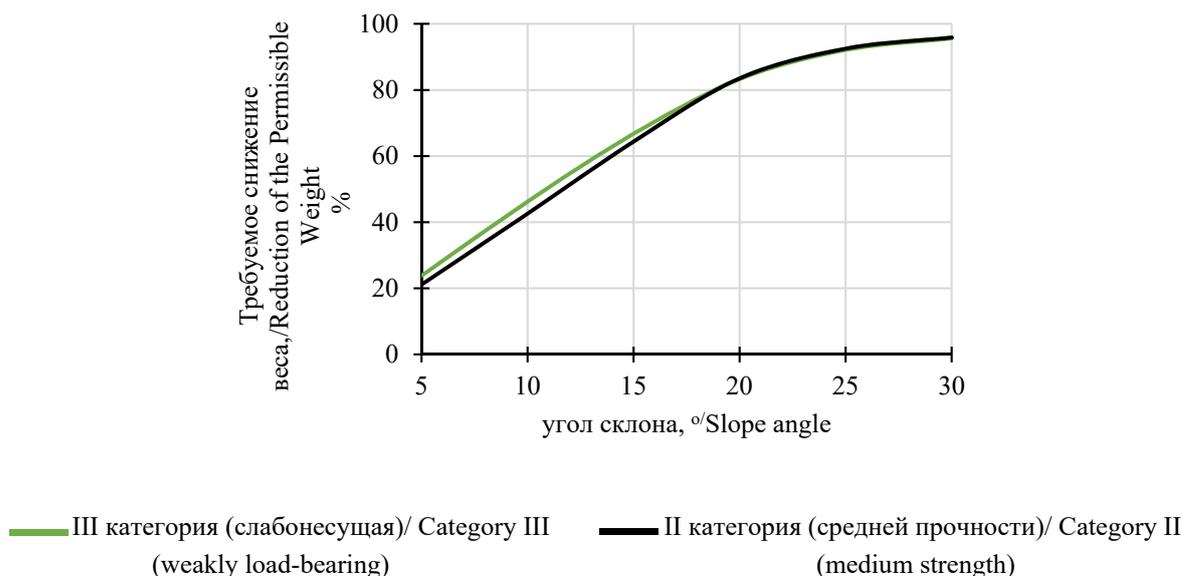


Рисунок 12. Снижение допустимого веса колесного движителя, ограниченного требуемым коэффициентом тяги, с учетом угла склона

Figure 12. Reduction of the permissible weight of the wheel drive, limited by the required thrust coefficient, taking into account the slope angle

Источник: собственная композиция авторов
Source: authors' composition

Заключение

Анализ результатов вычислительного эксперимента, выполненного при варьировании механических свойств почвогрунта, угла склона и веса колесного движителя, позволил получить комплексную оценку проходимости колесного движителя лесной машины, работающей на местности с уклоном, на пересеченной местности.

Впервые получены формулы (18)–(22), основанные на результатах обработки расчетных данных, предназначенные для практического обоснования допустимых параметров колесного движителя лесной машины, работающей на склоне. Уравнения позволяют обосновать допустимое среднее давление колесного движителя на почвенно-грунтовую опорную поверхность. При необходимости уточнить влияние геометрических параметров колесного движителя на оценку опорной проходимости следует воспользоваться уравнением (23), полученным ранее [16].

Полученные расчетные данные доказывают важность учета угла склона, на котором работают

колесные лесные машины, с точки зрения практического обоснования допустимых нагрузочных параметров колесного движителя. Результаты моделирования показали (рис. 12), что при незначительном угле склона 5° для обеспечения опорной проходимости колесного движителя вес, допустимый на горизонтальной опорной поверхности, следует снизить на 20-25%, при угле 10° требуемое снижение веса движителя составляет 40-50%. На сравнительно крутых склонах от 15° и выше требуется снижение на 65% и более от значения, допустимого для работы на горизонтальной опорной поверхности. Отмеченное позволяет рекомендовать оснащать колесные лесные машины самоходными лебедками уже при углах склона 10 – 15° для обеспечения опорной проходимости движителей. Оценка требуемой мощности возможна на базе результатов расчета коэффициента сопротивления движению (рис. 8).

Установлено, что при сравнительно небольших углах склона, до 5°, оценка глубины колеи при весе, допустимом по критерию опорной проходимости, выше величины 0,20 м, рекомендуемой с точки

зрения экологичности движителя. При весе движителя, допустимом по критерию проходимости на более крутых склонах, расчетная глубина колеи существенно меньше 0,20 м (рис. 9), однако действительная деформация и повреждаемость почвогрунта будет выше, что связано с воздействием грунтозацепов движителя. Тем не менее, при обеспечении проходимости машин за счет использования самоходных лебедок, возможно прогнозировать «резерв» увеличения допустимого веса движителя.

С учетом отмеченных обстоятельств, в дальнейшем целесообразно провести отдельные исследования, направленные на изучение экологичности колесных движителей лесных машин, работающих на склонах.

В качестве перспективного направления дальнейших исследований также следует отметить изучение влияния «армирующих» свойств корневой системы деревьев, растущих на склонах, на проходимость лесных машин.

Список литературы

1. Linstrom B. V., Els P. S., Botha T. R. A real-time non-linear vehicle preview model // *Int. J. Heavy Veh. Syst.* 2018; 25: 1-22. <https://doi.org/10.1504/IJHVS.2018.089893>.
2. Manukovsky A. Y., Grigorev I. V., Ivanov V. A., Gasparyan G. D., Lapshina M. L., Makarova Yu. A., Chetverikova I. V., Yakovlev K. A., Afonichev D. N., Kunitskaya O. A. Increasing the logging road efficiency by reducing the intensity of rutting: mathematical modeling. *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments.* 2018; 41 (2):35-41.
3. Zhuk A. Yu., Nahina A. M., Grigorev I. V., Ivanov V. A., Gasparyan G. D., Manukovsky A. Y., Kunitskaya O. A., Danilenko O. K., Grigoreva O. I. Modelling of indenter pressed into heterogeneous soil // *Journal of Engineering and Applied Sciences.* 2018; 13 (S8): 6419-6430.
4. Хитров Е.Г. Анализ составляющих глубины колеи, образующейся под воздействием движителя лесной машины на почвогрунт // *Resources and Technology.* 2019; 16 (4): 76-93.
5. Каляшов В.А., До Туан А., Хитров Е.Г., Григорьева О.И., Гурьев А.Ю., Новгородов Д.В. Современные системы машин и технологии заготовки древесины и лесовосстановления в условиях горных лесосек // *Resources and Technology.* 2022; 19 (2):1-47.
6. Каляшов В.А., Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Должиков И.С., Друзьянова В.П. Формирование колеи движителем лесной машины на склоне оттаивающего почвогрунта криолитозоны с учетом эффекта солифлюкции // *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал.* 2024; 3 (399):140-152.
7. Хитров Е.Г., Бартенев И.М. Влияние угла поперечного наклона поверхности качения на тягово-сцепные свойства колесного движителя // *Лесотехнический журнал.* 2016; 6 (4 (24)): 225-232.
8. До Т.А., Злобина Н.И., Каляшов В.А., Гурьев А.Ю., Григорьева О.И., Хитров Е.Г. Теоретические исследования влияния угла склона на несущую способность почвогрунта при работе лесных машин // *Деревообрабатывающая промышленность.* 2022; 2:18-27.
9. До Т.А., Григорьев Г.В., Каляшов В.А., Новгородов Д.В., Григорьева О.И., Хитров Е.Г. Оценка тягово-сцепных свойств движителя лесной гусеничной машины, работающей на склоне // *Системы. Методы. Технологии.* 202; 2 (54): 78-84.
10. До Т.А., Григорьев Г.В., Каляшов В.А., Гурьев А.Ю., Григорьева О.И., Хитров Е.Г. Теоретические исследования работы лесных машин с гусеничным движителем на склонах // *Resources and Technology.* 2022; 19 (3):1-29.
11. До Т.А., Григорьев Г.В., Каляшов В.А., Новгородов Д.В., Григорьева О.И., Хитров Е.Г. Методика и результаты экспериментальных исследований воздействия лесных машин с гусеничным движителем на почвогрунты на склонах // *Resources and Technology.* 2022; 19 (4):64-84.

12. Каляшов В.А., Григорьев И.В., Григорьева О.И. Сравнительный анализ видов трелевки на горных склонах // Вестник АГАТУ. 2022; 2 (6):41-59.
13. Каляшов В.А., Григорьева О.И., Григорьев И.В. Перспективные варианты восстановления лесов на склонах // Вестник АГАТУ. 2022; 1 (5): 86-96.
14. Каляшов В.А., До Т.А., Григорьева О.И., Гурьев А.Ю., Новгородов Д.В. Современные технические решения для обеспечения безопасной работы лесных машин на горных склонах // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. 2022; 2:11-25.
15. Akbuliakova E.N., Ponomaryov A.B. Analysis of the water saturation influence on the strength characteristics of eluvial soils // Construction and Geotechnics. 2024; 15 (1):83-90.
16. Хитров Е.Г., Котенев Е.В., Андронов А.В., Ильюшенко Д.А., Пушков Ю.Л. О сопоставлении среднего и номинального давления движителя лесной машины на почвогрунт // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2019; 229:185-195.

References

1. Linstrom B. V., Els P. S., Botha T. R. A real-time non-linear vehicle preview model // Int. J. Heavy Veh. Syst. 2018; 25: 1-22. <https://doi.org/10.1504/IJHVS.2018.089893>.
2. Manukovsky A. Y., Grigorev I. V., Ivanov V. A., Gasparyan G. D., Lapshina M. L., Makarova Yu. A., Chetverikova I. V., Yakovlev K. A., Afonichev D. N., Kunitskaya O. A. Increasing the logging road efficiency by reducing the intensity of rutting: mathematical modeling. Journal of Mechanical Engineering Research and Developments. 2018; 41 (2):35-41.
3. Zhuk A. Yu., Nahina A. M., Grigorev I. V., Ivanov V. A., Gasparyan G. D., Manukovsky A. Y., Kunitskaya O. A., Danilenko O. K., Grigoreva O. I. Modelling of indenter pressed into heterogeneous soil. Journal of Engineering and Applied Sciences. 2018; 13 (S8): 6419-6430.
4. Khitrov E.G. Analiz sostavlyayushchikh glubiny kolei, obrazuyushchey pod vozdeystviem dvizhitelya lesnoy mashiny na pochvogrunte [Analysis of the condition of the railways formed under the impact of the forest mass mover on the soil]. Resources and Technology. 2019; 16 (4): 76-93. (in Russian).
5. Kalyashov V.A., Do Tuan A., Khitrov E.G., Grigor'eva O.I., Gur'ev A.Yu., Novgorodov D.V. Sovremennyye sistemy mashin i tekhnologii zagotovki drevesiny i lesovosstanovleniya v usloviyakh gornyykh lesosek [Modern engineering systems and technologies for timber harvesting and reforestation in mountain forests]. Resources and Technology. 2022; 19 (2):1-47. (in Russian).
6. Kalyashov V.A., Shapiro V.Ya., Grigor'ev I.V., Kunitskaya O.A., Dolzhikov I.S., Druz'yanova V.P. Formirovaniye kolei dvizhitelem lesnoy mashiny na sklone ottaivayushchego pochvogrunta kriolitozony s uchetom effekta soliflyuksii [Rutting formation by the forest mass mover on the slope of the thawing cryolithozone taking into account the effect of solifluctions]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal= Bulletin of Higher Educational Institutions. Russian Forestry Journal. 2024; 3 (399):140-152. (in Russian).
7. Khitrov E.G., Bartenev I.M. Vliyanie ugla poperechnogo naklona poverkhnosti kacheniya na tyagovo-stsepnyye svoystva kolesnogo dvizhitelya [Influence of the cross slope angle of the rolling surface on the traction and traction properties of the wheeled mover]. Lesotekhnicheskyy zhurnal= Forest Engineering Journal. 2016; 6 (4 (24)): 225-232. (in Russian).
8. Do T.A., Zlobina N.I., Kalyashov V.A., Gur'ev A.Yu., Grigor'eva O.I., Khitrov E.G. Teoreticheskiye issledovaniya vliyaniya ugla sklona na nesushchuyu sposobnost' pochvogrunta pri rabote lesnykh mashin [Theoretical studies of the influence of the slope angle on the bearing capacity of the soil at the operation of forest machines]. Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost'=Woodworking Industry. 2022; 2:18-27. (in Russian).
9. Do T.A., Grigor'ev G.V., Kalyashov V.A., Novgorodov D.V., Grigor'eva O.I., Khitrov E.G. Otsenka tyagovo-stsepnyykh svoystv dvizhitelya lesnoy gusenichnoy mashiny, rabotayushchey na sklone [Evaluation of the traction and

traction properties of the forest tracked machine propulsion system working on a slope]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* = Systems. Methods. Technologies. 2022; 2 (54): 78-84. (in Russian).

10. Do T.A., Grigor'ev G.V., Kalyashov V.A., Gur'ev A.Yu., Grigor'eva O.I., Khitrov E.G. *Teoreticheskie issledovaniya raboty lesnykh mashin s gusenichnym dvizhitelem na sklonakh* [Theoretical studies of forest machines with crawler on slopes]. *Resources and Technology*. 2022; 19(3):1-29. (in Russian).

11. Do T.A., Grigor'ev G.V., Kalyashov V.A., Novgorodov D.V., Grigor'eva O.I., Khitrov E.G. *Metodika i rezul'taty eksperimental'nykh issledovaniy vozdeystviya lesnykh mashin s gusenichnym dvizhitelem na pochvogrunty na sklonakh* [Methods and results of experimental studies of the impact of forest machines with crawler on soil on slope]. *Resources and Technology*. 2022; 19 (4):64-84. (in Russian).

12. Kalyashov V.A., Grigor'ev I.V., Grigor'eva O.I. *Sravnitel'nyy analiz vidov trelevki na gornykh sklonakh* [Comparative analysis of skidding types on mountain slopes]. *Vestnik AGATU*. 2022; 2 (6):41-59. (in Russian).

13. Kalyashov V.A., Grigor'eva O.I., Grigor'ev I.V. *Perspektivnye varianty vosstanovleniya lesov na sklonakh* // *Vestnik AGATU=Vestnik ASAU*. 2022; 1 (5): 86-96. (in Russian).

14. Kalyashov V.A., Do T.A., Grigor'eva O.I., Gur'ev A.Yu., Novgorodov D.V. *Sovremennyye tekhnicheskie resheniya dlya obespecheniya bezopasnoy raboty lesnykh mashin na gornykh sklonakh* // *Bezopasnost' i okhrana truda v lesozagotovitel'nom i derevoobrabatyvayushchem proizvodstvakh*. 2022; 2:11-25. (in Russian).

15. Akbuliakova E.N., Ponomaryov A.B. *Analysis of the water saturation influence on the strength characteristics of eluvial soils*. *Construction and Geotechnics*. 2024; 15 (1):83-90. (in Russian).

16. Khitrov E.G., Kotenev E.V., Andronov A.V., Il'yushenko D.A., Pushkov Yu.L. *O sopostavlenii srednego i nominal'nogo davleniya dvizhitelya lesnoy mashiny na pochvogrunty* [On the comparison of the average and nominal pressure of the forest machine propeller on the soil]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii=Izvestiya St. Petersburg Forest Engineering Academy*. 2019; 229:185-195. (in Russian).

Сведения об авторах

Кривошеев Андрей Александрович – аспирант кафедры технологии и транспортно-технологических машин ФГБОУ ВО «Ухтинский государственный технический университет», ул. Первомайская, 13, г. Ухта, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1708-7873>, e-mail: ugtukrivosheev@mail.ru.

Куницкая Ольга Анатольевна – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология и оборудование лесного комплекса» ФГБОУ ВО «Арктический государственный агротехнологический университет», шоссе Сергеляхское, 3 км, д. 3, г. Якутск, Республика Саха (Якутия), Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>, e-mail: ola.ola07@mail.ru.

Бурмистрова Ольга Николаевна – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии и транспортно-технологических машин ФГБОУ ВО «Ухтинский государственный технический университет», ул. Первомайская, 13, г. Ухта, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2616-7557>, e-mail: oburmistrova19@gmail.com.

✉ *Морковин Владимир Александрович* – кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой промышленного транспорта, строительства и геодезии ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-5822-2254>, e-mail: morkovin-vladimir@mail.ru.

Гурьев Александр Юрьевич – преподаватель кафедры «Технология и оборудование лесного комплекса» ФГБОУ ВО «Арктический государственный агротехнологический университет», шоссе Сергеляхское, 3 км, д. 3, г. Якутск, Республика Саха (Якутия), Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5322-1865>, e-mail: sashafuryjager96@gmail.com.

Андронов Александр Вячеславович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры лесного машиностроения, сервиса и ремонта ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова», Институтский переулок, 5, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1035-9231>, e-mail: andronovalexandr@gmail.com.

Information about the authors

Andrey A. Krivosheev – Postgraduate student of the Department of Technology and Transport and Technological Machines, Ukhta State Technical University, 13, Pervomaiskaya str., Ukhta, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1708-7873>, e-mail: ugtukrivosheev@mail.ru.

Olga A. Kunitskaya – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Technology and Equipment of the Forest Complex of the Arctic State Agrotechnological University, Sergelyakhskoye Highway, 3 km, 3, Yakutsk, Republic of Sakha (Yakutia), Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>, e-mail: ola.ola07@mail.ru.

Olga N. Burmistrova – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Technology and Transport and Technological Machines, Ukhta State Technical University, 13, Pervomaiskaya str., Ukhta, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2616-7557>, e-mail: oburmistrova19@gmail.com.

✉ *Vladimir A. Morkovin* – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Industrial Transport, Construction and Geodesy, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 8, Timiryazeva str., Voronezh, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-5822-2254>, e-mail: morkovin-vladimir@mail.ru.

Alexander Yu. Guryev – lecturer of the Department of Technology and Equipment of the Forest Complex of the Arctic State Agrotechnological University, Sergelyakhskoye Highway, 3 km, 3, Yakutsk, Republic of Sakha (Yakutia), Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5322-1865>, e-mail: sashafuryjager96@gmail.com.

Alexander V. Andronov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Forestry Engineering, Service and Repair, St. Petersburg State Forestry University named after S.M. Kirov, 5, Institutsky Lane, Saint Petersburg, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1035-9231>, e-mail: andronovalexandr@gmail.com.

✉ – Для контактов/Corresponding author