

УДК 674.81

DOI: 10.15393/j2.art.2022.6183

Статья

Теоретические исследования работы лесных машин с гусеничным двигателем на склонах

До Туан Ань

преподаватель, Вьетнамский национальный университет лесного хозяйства (Социалистическая Республика Вьетнам), anhdo.dhln@gmail.com

Григорьев Глеб Владимирович

кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С. М. Кирова (Российская Федерация), vil-lta@mail.ru

Каляшов Виталий Анатольевич

кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (Российская Федерация), vit832@yandex.ru

Гурьев Александр Юрьевич

аспирант, Арктический государственный агротехнологический университет (Российская Федерация), sashafuryjager96@gmail.com

Григорьева Ольга Ивановна

кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С. М. Кирова (Российская Федерация), grigoreva_o@list.ru

Хитров Егор Германович

доктор технических наук, доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (Российская Федерация), yegorkhitrov@gmail.com

Получена: 28 февраля 2022 / Принята: 9 сентября 2022 / Опубликовано: 15 сентября 2022

Аннотация: Во многих странах мира достаточно большие запасы лесных ресурсов находятся на горных склонах. Работы по заготовке древесины в условиях горных лесосек существенно снижают производительность и повышают риски для людей и техники. Во многих индустриально развитых странах мира преобладают машинные способы заготовки древесины, включая освоение лесов на горных склонах. Колёсные лесные машины, работающие на горных склонах, прежде всего, оснащаются специальными гусеницами. Необходимо учитывать, что экосистемы горных лесов являются очень ранимыми, при неправильном проведении работ,

избыточном негативном воздействии на почвогрунт на них могут возникать и быстро развиваться процессы водной и ветровой эрозии. Особенно опасным для экосистем лесов на склонах является процесс образования колеи под воздействием движителей лесных машин. Именно колея волока служит концентратором водной и часто ветровой эрозии. Кроме того, превышение несущей способности почвогрунта может приводить к возникновению оползней, соскальзыванию машины по склону. В статье представлено теоретическое обоснование допустимого среднего давления движителя работающей на склоне лесной машины на почвогрунт при ограничении глубины образующейся колеи. Кроме того, 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 учётом 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 учётом ослабления почвогрунта при срезе.

Ключевые слова: горные леса, леса на склонах, лесосечные работы, лебёдки, трелёвка, почвогрунты

DOI: 10.15393/j2.art.2022.6183

Article

Theoretical studies of forest machines with a tracked mover on slopes

Do Tuan An'

*Lecturer, Vietnam National University of Forestry (Socialist Republic of Vietnam),
anhdo.dhln@gmail.com*

Gleb Grigorev

Ph. D. in engineering, associate professor, St. Petersburg State Forest Engineering University named after S. M. Kirov (Russian Federation), vtl-lta@mail.ru

Vitalij Kalyashov

Ph. D. in engineering, associate professor, St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (Russian Federation), vit832@yandex.ru

Aleksandr Gur'ev

*Ph. D. student, Arctic State Agrotechnological University (Russian Federation),
sashafuryjager96@gmail.com*

Olga Grigoreva

Ph. D. in agriculture, associate professor, St. Petersburg State Forest Engineering University named after S. M. Kirov (Russian Federation), grigoreva_o@list.ru

Egor Khitrov

D. Sc. in engineering, associate professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (Russian Federation), yegorkhitrov@gmail.com

Received: 28 February 2022 / Accepted: 9 September 2022 / Published: 15 September 2022

Abstract: In many countries around the world quite large reserves of forest resources are located on mountain slopes. Logging operations in mountainous areas significantly reduce productivity and increase risks for people and machinery. In many industrialized countries of the world machine logging methods dominate including harvesting operations on mountain slopes. Wheeled forest machines operating on mountain slopes are primarily equipped with special tracks. Ecosystems of mountainous forests are very vulnerable and violation of standard operations might result in excessive negative impact on soil, water and wind erosion processes. Especially dangerous for forest ecosystems on slopes is the process of rut formation under the influence of forest machine track driver. It is the track ruts that are concentrators of water and wind erosion. Besides, exceeding the

load bearing capacity of the soil might lead to landslides and sliding of the machine down the slope. The article presents theoretical substantiation of permissible average pressure of the forest machine mover on a slope when the depth of the formed rut is limited. The authors present new dependences allowing in practice, without iterations, to calculate: the bearing capacity of the soil under the influence of the track mover, depending on the physical and mechanical properties of the soil. They take into account the angle of the slope; the depth of the rut formed under the influence of the track mover of the forest machine operating on the slope; admissible average pressure of a track vehicle on the subsoil, limited by the depth of the rut formed; coefficient of resistance to movement of a track vehicle moving along a slope; coefficient of traction of a track vehicle with the subsoil surface taking into account sliced subsoil weakening.

Keywords: Mountain forests, forests on slopes, logging, winches, skidding, soils

1. 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, объём 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 трелёвочных установок (лесных кранов), самоходные лебёдки, лесные машины с интегрированными в их трансмиссию лебёдками.

В других странах мира (например, США, Япония, Новая Зеландия, Австрия) выпускается широкая линейка техники для работы в горных лесах. Каждый вариант этой техники имеет свои достоинства и недостатки.

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

2. Материалы и методы

Использованы справочные данные о физико-механических свойствах лесных почвогрунтов. Математические модели предложены на основе положений механики грунтов и теории движения автомобильного транспорта в условиях бездорожья. При получении итоговых зависимостей использованы методы аппроксимации численных данных.

3. Результаты

3.1. Влияние угла склона на несущую способность почвогрунта

С точки зрения воздействия движителя на грунт и его тягово-цепных свойств работа лесных машинах на пересечённой местности и склонах связана с отклонением вектора результирующей нагрузки от нормали к опорной поверхности [14]. Это явление, в свою очередь, вызывает снижение несущей способности грунтового основания под воздействием движителя [15], [16]. Вначале рассмотрим вопрос о количественной оценке данного снижения.

Известно, что несущая способность грунтового основания под воздействием движителя определяется по формуле [16]

$$p_s = p_{s0} \alpha, \quad (1)$$

где p_{s0} — несущая способность грунтового основания без учёта глубины распространения деформаций, α — коэффициент учёта глубины распространения деформаций в грунтовом основании.

Несущая способность грунтового основания без глубины распространения деформаций оценивается по уравнению [16]

$$p_{s0} = 0,5J_1B_1N_1b\gamma + N_2\gamma h + J_3B_3N_3C, \quad (2)$$

где γ — удельный вес грунта, C — удельное сцепление частиц грунтового основания, h — глубина колеи, образовавшейся под воздействием движителя (здесь учтено постепенное «укрепление» грунта по мере уплотнения), J_1 , J_3 — коэффициенты, учитывающие соотношение сторон пятна контакта с грунтовым основанием [15], [16]:

$$J_1 = \frac{l}{l + 0,4b}, \quad J_3 = \frac{l + b}{l + 0,5b}, \quad (3)$$

где l — средняя длина пятна контакта, b — средняя ширина пятна контакта, N_1 , N_2 , N_3 — коэффициенты, учитывающие влияние угла внутреннего трения частиц грунтового основания на его несущую способность [15], [16]:

$$N_1 = \frac{1 - \text{III}^4}{\text{III}^5}, \quad N_2 = \frac{1}{\text{III}^2}, \quad N_3 = \frac{2 \cdot (1 + \text{III}^2)}{\text{III}^3}, \quad \text{III} = \text{tg} \frac{\pi - 2\varphi}{4}, \quad (4)$$

B_1 , B_2 — коэффициенты, учитывающие влияние отклонения вектора результирующей нагрузки от нормали к опорной поверхности на несущую способность [15], [16]:

$$B_1 = \frac{\pi - 4\beta \text{tg} \varphi}{\pi + 4\beta \text{tg} \varphi}, \quad B_3 = \frac{3\pi - 2\beta}{3\pi + 2\beta}, \quad (5)$$

где β — угол отклонения вектора результирующей нагрузки от нормали к опорной поверхности.

Известно уравнение для расчёта коэффициента учёта глубины распространения деформаций в грунтовом основании [16]:

$$\alpha = 1 + \frac{0,5hH^*}{H \cdot (H - h - 0,25H^* \exp(-0,1|\beta|))}, \quad (6)$$

где H — глубина распространения деформаций в грунтовом основании, H^* — вспомогательное обозначение [16]:

$$H^* = \frac{\sqrt{2}}{2} b \operatorname{tg} \varphi \cos \frac{3\varphi}{4} \exp\left(\left(\frac{\pi}{4} + \frac{3\varphi}{4}\right) \operatorname{tg} \frac{3\varphi}{4}\right), \quad (7)$$

Расчёты показывают, что отклонение вектора от нормали приводит к существенному снижению несущей способности грунта под воздействием движителя, что особо ярко выражено на несвязных грунтах (песках), где несущая способность при $\beta = 30^\circ$ снижается практически в два раза по сравнению с $\beta = 0^\circ$.

Формулы (1)–(7) неоднократно проверены экспериментально и позволяют получить оценку несущей способности, хорошо согласующуюся с практическими результатами в области изучения проходимости лесных машин. Однако их использование в математических моделях связано со сложностями в проведении расчётов, с усложнением алгоритмов и программ для численного решения уравнений для оценки глубины колеи и тягово-сцепных свойств движителей лесных машин, что сужает область их практического применения при обосновании параметров и режимов работы движителей гусеничных машин, отвечающих условиям нашего исследования. Решим задачу о получении приближения оценки несущей способности основания, для этого осуществим вычислительный эксперимент. Выявим факторы, оказывающие наиболее существенное влияние на несущую способность грунта, с целью получить приближенные зависимости, пригодные для практического использования.

Введём обозначения:

$$q_s = p_s(\beta)|_{\beta=0}, \quad (8)$$

$$\delta_\beta = \frac{p_s(\beta)|_{\beta=\text{var}}}{p_s(\beta)|_{\beta=0}} \quad (9)$$

и получим функцию несущей способности в виде:

$$p_s = q_s \delta_\beta. \quad (10)$$

Результаты расчётов несущей способности q_s без учёта уклона получены при случайных равномерно распределённых величинах: $C = 0,005 \text{ МПа} \dots 0,05 \text{ МПа}$, $\varphi = 5^\circ \dots 30^\circ$, $\gamma = 0,015 \text{ МН/м}^3 \dots 0,025 \text{ МН/м}^3$, $b = 0,4 \text{ м} \dots 0,7 \text{ м}$, $\beta = 0^\circ$, $h = 0,01 \text{ м} \dots 0,39 \text{ м}$, $H = 2b$, $l = 5b$ (1000 сочетаний). В результате аппроксимации результатов расчётов при помощи метода наименьших квадратов получено уравнение, позволяющее определить q_s практически функционально точно ($R^2 > 0,98$):

$$q_s = 5,22C + \frac{109C + 1,5B}{10000} \varphi^2. \quad (11)$$

Аналогично выполнены расчёты и оценка коэффициента δ_s , учитывающего снижение несущей способности при отклонении вектора нагрузки от нормали к опорной поверхности. Данные получены при $C = 0,005 \text{ МПа} \dots 0,05 \text{ МПа}$, $\varphi = 5^\circ \dots 30^\circ$, $\gamma = 0,015 \text{ МН/м}^3 \dots 0,025 \text{ МН/м}^3$, $b = 0,4 \text{ м} \dots 0,7 \text{ м}$, $\beta = 1^\circ \dots 30^\circ$, $h = 0,01 \text{ м} \dots 0,39 \text{ м}$, $H = 2b/\cos\beta$, $l = 5b$. В результате аппроксимации результатов расчётов получено уравнение, позволяющее определить δ_β практически функционально точно ($R^2 > 0,98$):

$$\delta_\beta = 1 - \frac{56 + \varphi}{10000} \beta. \quad (12)$$

Таким образом, на основе выражений (10)—(12) получим формулу, позволяющую на практике рассчитать несущую способность грунта под воздействием гусеничного движителя с учётом отклонения вектора результирующей нагрузки:

$$p_s = \left(5,22C + \frac{109C + 1,5B}{10000} \varphi^2 \right) \cdot \left(1 - \frac{56 + \varphi}{10000} \beta \right). \quad (13)$$

Полученное уравнение (13) используем при разработке математической модели для расчёта тягово-цепных свойств гусеничного движителя, работающего на склоне.

3.2. Обоснование допустимого среднего давления движителя на почвогрунт при ограничении глубины образующейся колеи

Известно уравнение для расчёта глубины колеи, образующейся под воздействием движителя [17], [18]:

$$h = \frac{p_s}{p_s - p} \cdot \frac{Jpab}{E \sqrt{1 - \frac{Jp}{E}}} \operatorname{arctg} \frac{H - h}{ab \sqrt{1 - \frac{Jp}{E}}}, \quad (14)$$

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.

Уравнение (14) сложно в использовании на практике, поскольку его решение возможно лишь итерационным путём. Зададимся целью получить упрощённую зависимость, позволяющую определить глубину колеи h .

Введём обозначения:

$$A = \frac{p_s}{p_s - p} \cdot \frac{Jpab}{E \sqrt{1 - \frac{Jp}{E}}}, \quad (15)$$

$$C = ab \sqrt{1 - \frac{Jp}{E}} \quad (16)$$

и исследуем правую часть уравнения (14):

$$f(h) = A \operatorname{arctg} \frac{H-h}{C}. \quad (17)$$

Приближим функцию $f(h)$ методом интерполяции:

$$f(h) \approx g(h), \quad (18)$$

причём

$$g(h) = \sum_{i=0}^n a_i h^i, \quad (19)$$

где a_i — числовые коэффициенты, n — степень интерполяционного полинома.

Примем $n = 2$, тогда

$$g(h) = a_0 + a_1 h + a_2 h^2. \quad (20)$$

По условию интерполяции имеет место равенство

$$g(h_i) = A \operatorname{arctg} \frac{H-h_i}{C}, \quad (21)$$

следовательно, с учётом формулы (20) запишем:

$$a_0 + a_1 h_i + a_2 h_i^2 = A \operatorname{arctg} \frac{H-h_i}{C}. \quad (22)$$

Примем узлы интерполяции: $h_0 = 0$, $h_1 = H/2$, $h_2 = H$, тогда

$$\begin{cases} a_0 = A \operatorname{arctg} \frac{H}{C} \\ a_0 + a_1 \frac{H}{2} = A \operatorname{arctg} \frac{H}{2C} \\ a_0 + a_1 \frac{H}{2} + a_2 \frac{H^2}{4} = 0 \end{cases} \quad (23)$$

Решая систему уравнений (23) относительно a_0 , a_1 , a_2 , получим:

$$\begin{cases} a_0 = A \operatorname{arctg} \frac{H}{C} \\ a_1 = \frac{A \left(4 \operatorname{arctg} \frac{H}{2C} - 3 \operatorname{arctg} \frac{H}{C} \right)}{H} \\ a_2 = -\frac{2A \left(2 \operatorname{arctg} \frac{H}{2C} - \operatorname{arctg} \frac{H}{C} \right)}{H^2} \end{cases} \quad (24)$$

После подстановки формулы (2.23) в выражения (2.16), (2.17), (2.19) получим уравнение

$$h = A \operatorname{arctg} \frac{H}{C} + \frac{A \left(4 \operatorname{arctg} \frac{H}{2C} - 3 \operatorname{arctg} \frac{H}{C} \right)}{H} h - \frac{2A \left(2 \operatorname{arctg} \frac{H}{2C} - \operatorname{arctg} \frac{H}{C} \right)}{H^2} h^2, \quad (25)$$

имеющее два действительных корня, из которых физическому смыслу решаемой задачи ($h \geq 0$ м) удовлетворяет следующий:

$$h = \frac{H \left(H + A \left(3 \operatorname{arctg} \frac{H}{C} - 4 \operatorname{arctg} \frac{H}{2C} \right) - \sqrt{\left(H + A \left(\operatorname{arctg} \frac{H}{C} - 4 \operatorname{arctg} \frac{H}{2C} \right) \right)^2 + 4HA \operatorname{arctg} \frac{H}{C}} \right)}{4A \left(\operatorname{arctg} \frac{H}{C} - 2 \operatorname{arctg} \frac{H}{2C} \right)}. \quad (26)$$

Более компактную запись (26) получим в виде:

$$h = \frac{H \left(H + A(3x_1 - 4x_2) - \sqrt{(H + A(x_1 - 4x_2))^2 + 4H Ax_1} \right)}{4A(x_1 - 2x_2)}, \quad (27)$$

где обозначено:

$$x_1 = \operatorname{arctg} \frac{H}{ab \sqrt{1 - \frac{Jp}{E}}}, \quad x_2 = \operatorname{arctg} \frac{H}{2ab \sqrt{1 - \frac{Jp}{E}}}, \quad A = \frac{p_s}{p_s - p} \cdot \frac{Jpab}{E \sqrt{1 - \frac{Jp}{E}}} \quad (28)$$

Следует отметить, что при неограниченной толщине деформируемого слоя (для слабонесущих почвогрунтов) из формулы (27) следует оценка:

$$h_m = \lim_{H \rightarrow \infty} h = Ax_1 = \frac{p_s}{p_s - p} \cdot \frac{Jpab}{2E \sqrt{1 - \frac{Jp}{E}}} \quad (29)$$

Для завершения формирования математической модели, позволяющей рассчитать глубину колеи, образующейся под воздействием гусеничного движителя, работающего на склоне, приведём уравнения для расчёта параметров J, a [15], [16]:

$$J = \frac{0,03 + \frac{l}{b}}{0,6 + 0,43 \frac{l}{b}} \quad (30)$$

$$a = 0,64 \frac{H + b}{H} \quad (31)$$

Значения глубины колеи, полученные по предлагаемому уравнению (27), сопоставлены с результатами решения уравнения (14) на рисунке 1 (расчёт выполнен при $E = 1$ МПа, $p_s = 0,1$ МПа, $b = 0,6$ м, $\beta = 15^\circ$, $H = 2b/\cos\beta$, $l = 5b$).

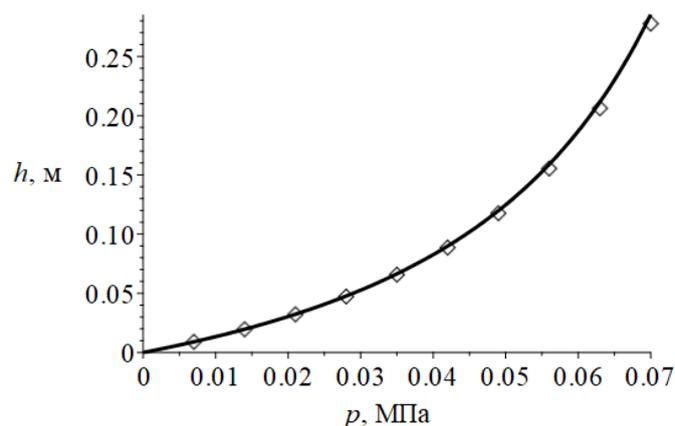


Рисунок 1. Сопоставление результатов решения уравнения (14) (маркеры) и значений глубины колеи по предлагаемому уравнению (27) (сплошная линия)

Figure 1. Comparison of the results of equation (14) solution (markers) and the rut depth values according to the proposed equation (27) (solid line)

График показывает хорошую сходимость результатов, полученных по уравнению (14), апробированному ранее, и по предлагаемому уравнению (27). При изменении исходных данных к решению в пределах, характерных для гусеничных лесных машин, сходимость аналогична.

Для обоснования параметров движителей гусеничных лесных машин, обеспечивающих надёжную работу техники на склонах, вначале примем критерий допустимой глубины колеи. Известны результаты исследований, показывающие, что глубина колеи свыше 0,2 м неприемлема с точки зрения экологического воздействия на почвогрунт, кроме того, при колее свыше 0,2 м существенно снижаются показатели проходимости техники. Выполним расчёт давления $p = p_{adm}$, при котором расчётное значение глубины колеи h по формуле (27) не превысит 0,2 м. Угол склона оставим переменной величиной $\beta = var$, прочие параметры для расчёта: $b = 0,6$ м, $l = 5b$, $H = 2b/\cos\beta$. Рассмотрим три категории прочности почвогрунта, физико-механические свойства которых изменяются в соответствии с данными таблицы 1.

Таблица 1. Физико-механические свойства почвогрунта по категориям прочности [17—22]

Table 1. Physical and mechanical properties of the soil by strength categories [17—22]

Параметры	Категории прочности		
	III (слабый)	II (средней прочности)	I (прочный)
E , МПа	0,4	1	3
G , МПа	0,74	1,99	6,53
C , кПа	0,005	0,012	0,024
φ , °	11	15	16
q_{s2} , МПа	0,047	0,095	0,233

На рисунке 2 проиллюстрировано соотношение допустимого среднего давления гусеничного движителя, ограниченного глубиной колеи 0,2 м, и несущей способности почвогрунта в зависимости от угла наклона опорной поверхности.

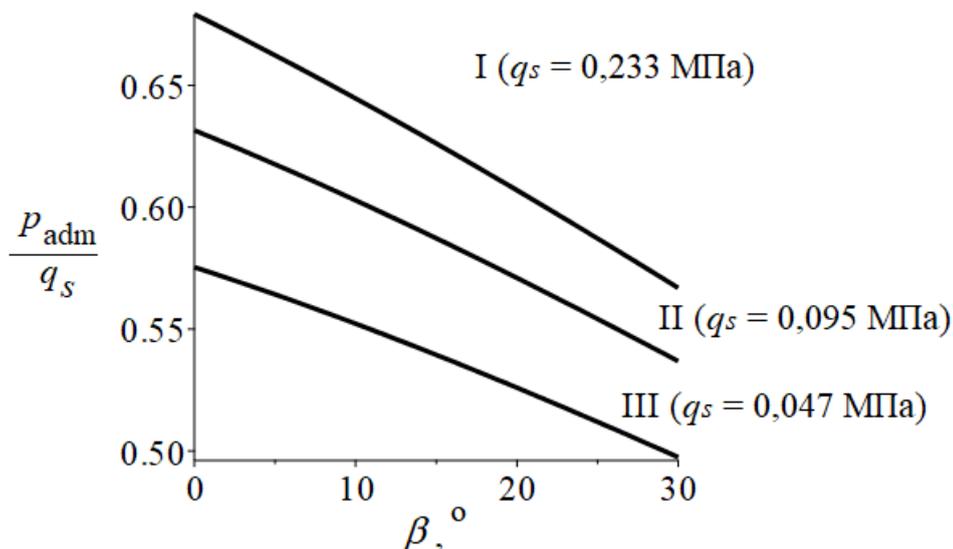


Рисунок 2. Соотношение допустимого среднего давления гусеничного движителя, ограниченного глубиной колеи 0,2 м, и несущей способности почвогрунта в зависимости от угла наклона

Figure 2. Ratio of the permissible average pressure of the track mover, limited by the rut depth of 0.2 m, and the bearing capacity of the soil, depending on the inclination angle

Поскольку в общем случае угол наклона опорной поверхности является переменной величиной на участке, где работает лесная техника, следует задаться его верхней оценкой. Исходя из рекомендаций производителей, ограничивающих максимальный наклон

поверхности движения машин, примем предельно допустимое значение $\beta = 30^\circ$. Тогда получим оценки среднего давления гусеничного движителя, допустимого по критерию глубины образующейся колеи, представленные в таблице 2.

Таблица 2. Среднее давление гусеничного движителя, допустимое по критерию глубины образующейся колеи на склоне 30°

Table 2. Average pressure of the track mover, admissible according to the criterion of the depth of the formed rut on a slope of 30°

Показатель	Категория прочности почвогрунта		
	III (слабый)	II (средней прочности)	I (прочный)
Допустимое среднее давление p_{adm} , МПа	0,024	0,051	0,132
Несущая способность грунта q_s , МПа	0,047	0,095	0,233
Соотношение давления и несущей способности p_{adm}/q_s	0,51	0,54	0,57

В случае, если задаётся количественная характеристика прочности почвогрунта (несущая способность q_s), среднее давление гусеничного движителя, допустимое по глубине колеи, можно оценить при помощи графика, построенного на основе данных таблицы 2 (рисунок 3), либо рассчитать по формуле, полученной в результате аппроксимации табличных данных:

$$p_{adm} = q_s \cdot (0,642 + 0,035 \ln q_s). \quad (32)$$

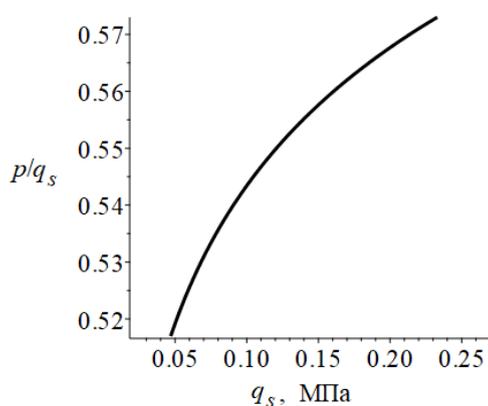


Рисунок 3. Среднее давление гусеничного движителя, допустимое по критерию глубины образующейся колеи на склоне 30°

Figure 3. Average pressure of the track mover, admissible according to the criterion of the depth of the formed rut on a slope of 30°

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

Применим полученные уравнения и оценки допустимого среднего давления при расчёте тягово-цепных свойств движителей гусеничных машин.

Сила сопротивления движению машины, возникающая со стороны деформируемого грунта, определяется по уравнению [15—17], [23]

$$F_R = b \int_0^h p(h)dh. \quad (33)$$

Для расчёта определённого интеграла в выражении (33) понадобится аналитическая зависимость $p(h)$, что неудобно с точки зрения математических преобразований (выразить p через h по формулам (14), (27) затруднительно). Выполним замену [17], [23]:

$$b \int_0^h p(h)dh = bhp - b \int_0^p h(p)dh, \quad (34)$$

что позволит использовать уже имеющуюся зависимость (27) для расчёта F_R [17], [18]:

$$F_R = bhp - b \int_0^p h(p)dh. \quad (35)$$

Далее определяется коэффициент сопротивления движению [17], [18]:

$$\varphi_R = \frac{h}{l} - \frac{1}{pl} \int_0^p h(p)dh. \quad (36)$$

Численное интегрирование выражений (35), (36) с учётом формулы (27) не представляет сложностей с точки зрения проведения расчётов.

Обобщим полученные данные и представим результаты расчёта коэффициента сопротивления относительно соотношения среднего и допустимого давления движителя на почвогрунт. На рисунке 4 представлены результаты численного интегрирования (36) при угле склона $\beta = 30^\circ$ для различных категорий прочности почвогрунта.

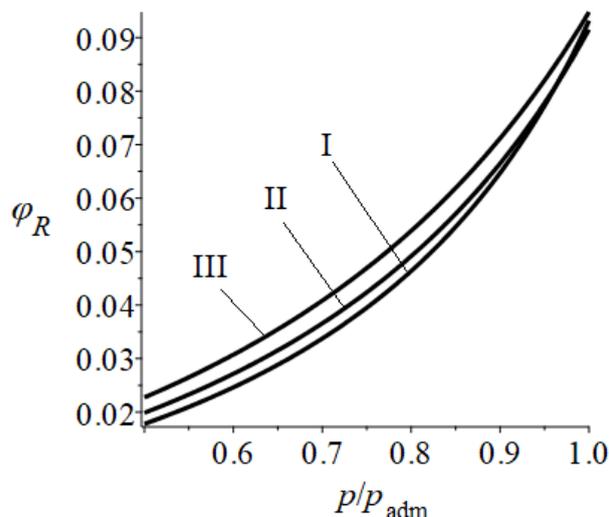


Рисунок 4. Коэффициент сопротивления движению гусеничной машины, вызванного образованием колеи, в зависимости от соотношения среднего и допустимого давления движителя на грунт

Figure 4. Coefficient of resistance to tracked machine movement caused by rutting, depending on the ratio of the average and permissible pressure of the vehicle on the soil

Результаты расчётов обобщим в таблице 3.

Таблица 3. Коэффициент сопротивления движению гусеничной машины, вызванного образованием колеи, в зависимости от соотношения среднего и допустимого давления движителя на грунт (на склоне 30°, курсив — на горизонтальной поверхности)

Table 3. Coefficient of resistance to track machine movement caused by rutting, depending on the ratio of the average and permissible pressure of the mover on the soil (on a slope of 30°, in italics - on a horizontal surface)

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

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

$$\varphi_R = \varphi_{R0} \delta_{R\beta}, \quad (37)$$

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

$$\varphi_{R0} = 0,0306 - 0,0246q_s - 0,0829 \frac{p}{p_{\text{adm}}} + 0,115 \left(\frac{p}{p_{\text{adm}}} \right)^2. \quad (38)$$

$$\delta_{R\beta} = 1 + 0,016\beta. \quad (39)$$

В итоге запишем:

$$\varphi_R = \left(0,0306 - 0,0246q_s - 0,0829 \frac{p}{p_{\text{adm}}} + 0,115 \left(\frac{p}{p_{\text{adm}}} \right)^2 \right) (1 + 0,016\beta), \quad (40)$$

Сила сцепления движителя с грунтом определяется по уравнению [15—17], [23]

$$F_T = b \int_0^l \tau_x(x) dx, \quad (41)$$

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

Функция распределения τ_x известна [15], [17], [23]:

$$\tau_x(x) = \frac{1}{\frac{1}{\tau_{\text{max}}} + \frac{t_{\text{гр}}}{Gj(x)}}, \quad (42)$$

где $t_{\text{гр}}$ — 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 [15—17], [23]:

$$j(x) = Sx, \quad (43)$$

где S — коэффициент буксования движителя.

Максимальное сопротивление грунта сдвигу следует определять с учётом его физико-механических и прочностных свойств [14—17], [23]:

$$\tau_{\text{max}} = C\xi(j) + p \tan \varphi, \quad (44)$$

где $\xi(j)$ — функция, учитывающая снижение сопротивления грунта при срезе [15—17], [23]:

$$\xi(j) = \begin{cases} 1, & j - j_0 \leq 0 \\ 1 - \frac{j - j_0}{t_{\text{гр}}}, & j - j_0 > 0 \\ 0, & j - j_0 \geq t_{\text{гр}} \end{cases}, \quad (45)$$

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

Известно выражение для оценки j_0 [14—17], [23]:

$$j_0 = \frac{\tau_0 t_{\text{гр}}}{G} \left(\sqrt{\frac{G}{C}} - 1 \right), \quad (46)$$

где τ_0 — максимальное сопротивление грунта сдвигу без учёта среза [15—19]:

$$\tau_0 = C + p \tan \varphi. \quad (47)$$

При вычисленном значении F_T рассчитывается коэффициент сцепления движителя с грунтом [14—17], [23]:

$$\mu_T = \frac{F_T}{pbl} = \frac{1}{pl} \int_0^l \tau_x(x) dx. \quad (48)$$

Обратим внимание на ступенчатый характер функции $\zeta(j)$, характеризующей снижение сопротивления сдвигу при развитии деформаций среза почвогрунта. Ввиду переменного характера $j(x)$ по длине пятна контакта, интегрирование выражений (41), (48) сложно. Для исследования выражений (41), (48) применим метод численного интегрирования.

На рисунке 5 представлены результаты расчёта коэффициента сцепления для различных категорий прочности почвогрунта при $S = \text{var}$, $p = p_{\text{adm}}$ (см. таблицу 2).

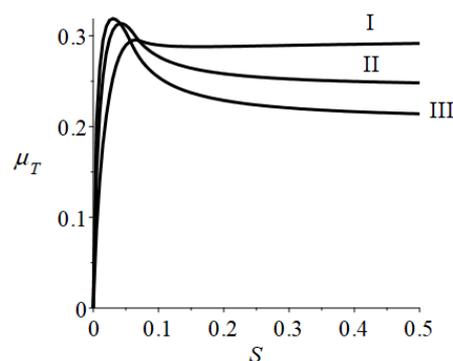


Рисунок 5. Связь коэффициента сцепления гусеничного движителя с опорной поверхностью и коэффициента буксования

Figure 5. Relationship between the traction coefficient of the tracked mover and the skidding coefficient

Согласно рекомендациям [17], [18], [24], следует исходить из верхней оценки коэффициента буксования $S = 0,2$ (наличие буксования обусловлено как сопротивлением грунта, так и конструктивными особенностями движителя). Результаты расчётов показывают, что для гусеничного движителя при $S > 0,1$ коэффициент сцепления изменяется незначительно, в связи с чем примем оценку [17], [18], [24] в нашем исследовании.

Проведём вычисления коэффициента сцепления по формуле (41) для различных категорий почвогрунта при изменении давления в пределах $p = 0,5p_{adm} \dots p_{adm}$ при $S = 0,2$; результаты представлены на рисунке 6.

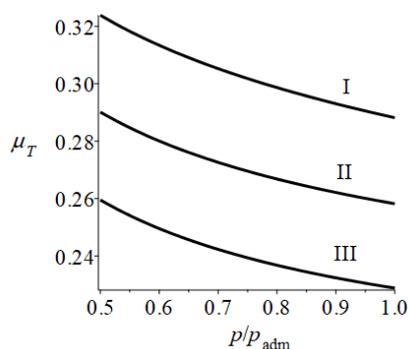


Рисунок 6. Коэффициент сцепления гусеничного движителя в зависимости от отношения среднего давления к допустимому для категории прочности почвогрунта

Figure 6. Caterpillar traction coefficient as a function of the ratio of average pressure to the permissible pressure for the soil strength category

Тогда получим оценки коэффициента сцепления гусеничного движителя в зависимости от отношения среднего давления к допустимому для различных категорий прочности почвогрунта, представленные в таблице 4.

Таблица 4. Коэффициент сцепления гусеничного движителя в зависимости от отношения среднего давления к допустимому

Table 4. Caterpillar traction coefficient as a function of the ratio of average pressure to permissible pressure

Соотношение среднего и допустимого давления p/p_{adm}	Категория прочности почвогрунта		
	III (слабый)	II (средней прочности)	I (прочный)
0,50	0,260	0,290	0,324
0,75	0,239	0,270	0,302
1,00	0,229	0,258	0,288

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

$$\mu_T = 0,253 - 0,066 \frac{p}{p_{adm}} + 0,925q_s - 2,11q_s^2. \quad (49)$$

3.4. Обоснование технологических параметров, связанных с тягово-сцепными свойствами гусеничной машины, работающей на склоне

Рассмотрим порядок обоснования технологических параметров, связанных с тягово-сцепными свойствами гусеничной машины. Для обеспечения проходимости гусеничной машины на склоне необходимо выполнение условий [17], [18], [25—29]:

$$\begin{cases} F_T \geq F_R - T \\ N \geq \frac{F_R v}{\eta} \\ p \leq p_{adm} \end{cases}, \quad (50)$$

где v — заданная скорость движения, N — мощность двигателя машины, η — коэффициент полезного действия трансмиссии, T — сила, буксирующая машину.

При работе на склоне запишем:

$$F_T = \mu_T G \cos \beta, \quad (51)$$

$$F_R = \varphi_R G \cos \beta + G \sin \beta + P, \quad (52)$$

где G — вес гусеничной машины, связанный со средним давлением движителя на грунт:

$$G = 2b\ell p. \quad (53)$$

Тогда, после несложных преобразований, запишем на основе формулы (50):

$$\begin{cases} \mu_T \cos \beta \geq \varphi_R \cos \beta + \sin \beta - \frac{T}{G} \\ \frac{N}{G} \geq \frac{v}{\eta} \left(\varphi_R \cos \beta + \sin \beta + \frac{P}{G} \right) \\ p \leq p_{adm} \end{cases}, \quad (54)$$

Если гусеничная машина движется самостоятельно, без буксировки, то можем записать:

$$\begin{cases} \mu_T \cos \beta \geq \varphi_R \cos \beta + \sin \beta \\ K_{\Sigma} = \frac{N}{M} \geq \frac{vg}{\eta} (\varphi_R \cos \beta + \sin \beta), \\ p \leq p_{adm} \end{cases}, \quad (55)$$

где g — ускорение свободного падения, M — масса гусеничной машины, K_{Σ} — коэффициент энергонасыщенности машины.

Решение системы неравенств (55) позволит определить максимальный угол склона, вдоль которого способна перемещаться машина. На рисунке 7 приведены результаты расчёта максимального значения угла β , удовлетворяющего первому неравенству системы (55) при среднем давлении $p \leq p_{adm}$. Графики построены относительно частного среднего и допустимого по колее давления на грунт. В таблице 5 приведены числовые результаты расчётов.

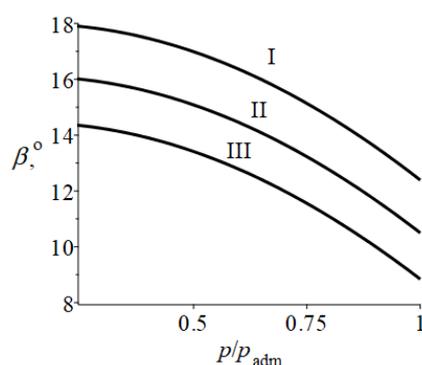


Рисунок 7. Оценка максимального угла склона в зависимости от соотношения среднего и допустимого давления гусеничного движителя на грунт

Figure 7. Evaluation of the maximum slope angle depending on the ratio of the average and permissible pressure of the tracked mover on the ground

Таблица 5. Оценка максимального угла склона в зависимости от соотношения среднего и допустимого давления гусеничного движителя на почвогрунт

Table 5. Evaluation of the maximum slope angle depending on the ratio of the average and permissible pressure of the track mover on the soil

Соотношение среднего и допустимого давления p/p_{adm}	Категория прочности почвогрунта		
	III (слабый)	II (средней прочности)	I (прочный)
0	14,3	16,0	17,9
0,5	13,4	15,1	17,0
0,75	11,6	13,2	15,1
1	8,8	10,5	12,4

В результате аппроксимации расчётных данных получим следующую зависимость для оценки максимального угла склона:

$$\beta_0 = 12,3 + 49,2q_s + 1,69 \frac{p}{p_{adm}} - 108q_s^2 - 7,23 \left(\frac{p}{p_{adm}} \right)^2. \quad (56)$$

Решение второго неравенства системы (55) позволяет установить нижнюю оценку коэффициента энергонасыщенности гусеничной машины, при котором возможно поступательное движение вдоль склона, в зависимости от соотношения среднего и допустимого давления движителя. При этом угол преодолеваемого склона определяется по уравнению (56). Результаты расчётов представлены в таблице 6 и на рисунке 8. В таблице 6 $K_{Э}$ указан в [кВт/т], данные получены при $v = 5$ км/ч, $\eta = 0,9$.

Таблица 6. Оценка коэффициента энергонасыщенности гусеничной машины, при котором возможно поступательное движение вдоль склона, в зависимости от соотношения среднего и допустимого давления движителя

Table 6. Evaluation of the energy ratio of the track machine when forward movement along the slope is possible depending on the ratio of the average and permissible pressure of the mover

Соотношение среднего и допустимого давления p/p_{adm}	Категория прочности почвогрунта		
	III (слабый)	II (средней прочности)	I (прочный)
0,25	4,04	4,44	4,86
0,5	3,81	4,22	4,65
0,75	3,59	4,01	4,45
1	3,38	3,81	4,26

Энергонасыщенность техники существенно выше значений, указанных в таблице 6, не рациональная с точки зрения использования мощности двигателя: большая мощность не будет реализована на преодоление сопротивления движению, поскольку при увеличении угла склона не будет выполняться ограничение по сцеплению движителя с опорной поверхностью. Приближенная зависимость для оценки коэффициента энергонасыщенности имеет вид:

$$K_{Э} = 4,12 + 4,24q_s - 0,84 \frac{p}{p_{adm}}. \quad (57)$$

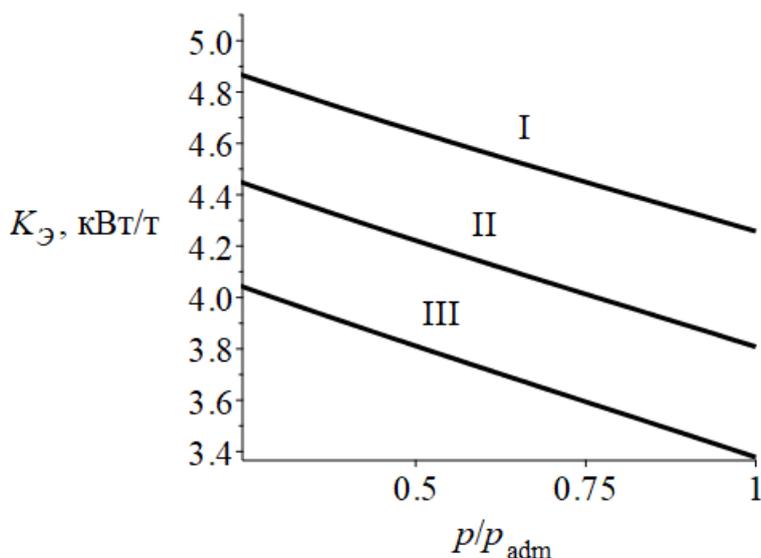


Рисунок 8. Оценка коэффициента энергонасыщенности гусеничной машины, при котором возможно поступательное движение вдоль склона, в зависимости от соотношения среднего и допустимого давления движителя

Figure 8. Evaluation of the energy ratio of the track machine when forward movement along the slope is possible depending on the ratio of the average and permissible pressure of the mover

На более крутых склонах, которые машина не способна преодолеть самостоятельно по сцеплению движителя с опорной поверхностью, возникает необходимость в буксировке. На практике это обстоятельство должен определить оператор по характеру работы машины [30—34]. При помощи первого неравенства системы (54) получим оценку соотношения силы, буксирующей гусеничную машину на склоне, и силы тяжести самой машины. Результаты решения при $p = p_{adm}$ представлены на рисунке 9.

Аппроксимация результатов расчётов приводит к получению уравнения

$$\frac{T}{G} = -0,155 + 0,0185\beta - 0,326q_s. \quad (58)$$

Результаты расчёта по уравнению (58) проиллюстрированы на рисунке 9.

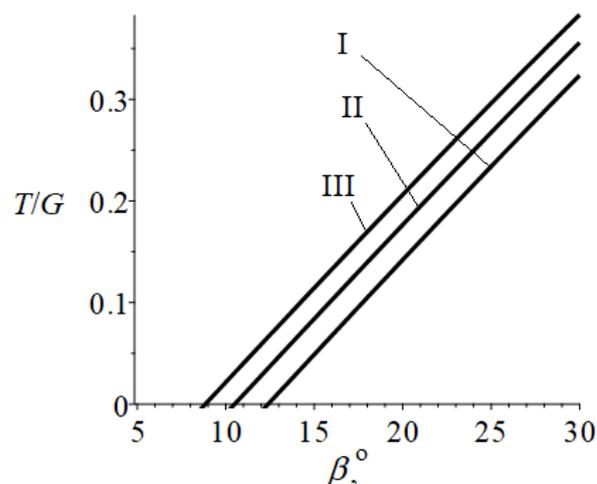


Рисунок 9. Соотношение силы, требующейся для буксировки машины на крутом склоне, и веса машины

Figure 9. Ratio of the force required to tow the machine on a steep slope to the weight of the machine

4. Обсуждение и заключение

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

- несущую способность грунтовой поверхности, находящейся под воздействием гусеничного движителя, в зависимости от физико-механических свойств грунта с учётом угла склона;
- глубину колеи, образующейся под воздействием гусеничного движителя лесной машины, работающей на склоне;
- допустимое среднее давление гусеничного движителя на грунт, ограниченное глубиной образующейся колеи;
- коэффициент сопротивления движению гусеничной машины, движущейся вдоль склона;
- коэффициент сцепления гусеничного движителя с грунтовой поверхностью с учётом ослабления почвогрунта при срезе.

Полученные математические модели позволяют получать результаты, важные для практики. Например, гусеничная машина массой $M = 15$ т, работает на уклоне до $\beta = 20^\circ$, несущая способность почвогрунта $q_s = 0,09$ МПа. Геометрические параметры движителя: ширина пятна контакта $b = 0,6$ м, длина пятна контакта $l = 5b = 3$ м. Вес машины составляет $G = 0,147$ МН; среднее давление движителя на почвогрунт $p = 0,041$ МПа, что меньше допустимого значения $p_{adm} = 0,05$ МПа по формуле (32). Коэффициент энергонасыщенности по формуле (57) составляет 3,82 кВт/т. Таким образом, мощность двигателя машины следует

принять ориентировочно 57,3 кВт (существенно бóльшая мощность не будет реализована). Уклон, который машина способна преодолеть по сцеплению, по формуле (56) составляет $\beta_0 = 12,4^\circ$, что меньше заданного значения, следовательно, в паре с машиной должна работать лебёдка, причём тяговое усилие T по формуле (58) должно составлять не менее $T = 0,0273 \text{ МН} = 27,3 \text{ кН}$.

5. Авторский вклад

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

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

Список литературы

1. Пути повышения эффективности работы лесных машин / И. В. Григорьев, О. А. Куницкая, С. Е. Рудов, А. Б. Давтян // Энергия: экономика, техника, экология. 2020. № 1. С. 55—63.
2. Перспективы создания лесозаготовительных комплексов на базе отечественных строительных и сельскохозяйственных машин / И. В. Григорьев, О. А. Куницкая, А. А. Просужих, А. Б. Давтян, С. Е. Рудов // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2020. № 10. С. 3—10.
3. Современные подходы к повышению энергоэффективности и экономичности лесных машин / А. Ю. Мануковский, М. В. Зорин, А. А. Просужих, О. А. Куницкая, И. В. Григорьев // Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности: Сб. науч. ст. по итогам Шестой междунар. науч. конф. Казань, 2020. С. 138—140.
4. Куницкая О. А. Проактивный сервис для лесных машин // Повышение эффективности лесного комплекса: Материалы Шестой Всерос. национал. научно-практич. конф. с междунар. участием. Петрозаводск, 2020. С. 86—87.
5. Организационно-технические решения для повышения коэффициента технической готовности лесных машин / О. А. Куницкая, А. А. Просужих, А. Б. Давтян, М. Ф. Григорьев, А. И. Григорьева // Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе: Материалы междунар. научно-практич. конф. Воронеж, 2020. С. 162—167.
6. Рудов С. Е., Куницкая О. А. Теоретические исследования экологической совместимости колёсных лесных машин и мерзлотных почвогрунтов лесов криолитозоны // Транспортные и транспортно-технологические системы: Материалы Междунар. научно-техн. конф. / Отв. ред. Н. С. Захаров. Тюмень, 2020. С. 323—326.
7. Моделирование процесса динамического уплотнения почвогрунта / И. В. Григорьев, О. А. Куницкая, М. Ф. Григорьев, А. И. Григорьева // IX Международная конференция

по математическому моделированию, посвящённая 75-летию Владимира Николаевича Врагова: Тез. докл. / Северо-Восточный федеральный университет, Академия наук Республики Саха (Якутия). 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. студ. научно-практич. конф. с междунар. участием в рамках «Северного форума — 2020» (29—30 сентября 2020 г., Якутск) и Международной научной онлайн летней школы — 2020 (6—20 июля 2020 г., Якутск). Якутск, 2020. С. 138—148.
9. Modeling the effect of wheeled tractors and skidded timber bunches on forest soil compaction / I. Grigorev, O. Kunickaya, A. Burgonutdinov, E. Tikhonov, V. Makuev, S. Egipko, E. Hertz, M. Zorin // *Journal of Applied Engineering Science*. 2021. Vol. 19, no. 2. P. 439—447.
10. Pressure control systems for tyre preservation in forestry machinery and forest soils / O. Kunickaya, E. Hertz, I. Kruchinin, E. Tikhonov, N. Ivanov, N. Dolmatov, M. Zorin, I. Grigorev // *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*. 2021. Vol. 18, no. 3. P. 95—102.
11. Экспериментальные исследования производительности форвардера с учётом его эксплуатационных характеристик, параметров лесосеки и физико-механических свойств почвогрунта / О. Н. Бурмистрова, А. А. Просужих, С. Е. Рудов, О. А. Куницкая, И. В. Григорьев // *Resources and Technology*. 2021. Т. 18, № 1. С. 94—124.
12. Обоснование исходных требований математической модели взаимодействия колёсных транспортных средств на пневматиках низкого давления с лесными почвогрунтами / О. Н. Бурмистрова, Е. В. Тетеревлева, С. Е. Рудов, И. В. Григорьев, О. А. Куницкая // *Системы. Методы. Технологии*. 2020. № 2 (46). С. 94—99.
13. Методика и результаты экспериментальных исследований взаимодействия колёсных транспортных средств на пневматиках низкого давления с лесными почвогрунтами / О. Н. Бурмистрова, Е. В. Тетеревлева, С. Е. Рудов, И. В. Григорьев, О. А. Куницкая // *Системы. Методы. Технологии*. 2020. № 1 (45). С. 66—71.
14. *Хитров Е. Г., Бартенев И. М.* Влияние угла поперечного наклона поверхности качения на тягово-сцепные свойства колёсного движителя // *Лесотехнический журнал*. 2016. № 4 (24). С. 225—232.
15. *Агейкин Я. С.* Проходимость автомобилей. М.: Машиностроение, 1981. 232 с.
16. *Ларин В. В.* Методы прогнозирования опорной проходимости многоосных колёсных машин на местности: Дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.03. М., 2007. 530 с.
17. *Хахина А. М.* Методы прогнозирования и повышения проходимости колёсных лесных машин: Дис. ... д-ра техн. наук: 05.21.01. СПб., 2018. 318 с.
18. *Хитров Е. Г.* Комплексное обоснование параметров и режимов работы движителей лесных машин: Дис. ... д-ра техн. наук: 05.21.01. Воронеж, 2020. 319 с.
19. Расчёт тяговых и сцепных свойств колёсного скиддера с использованием данных зарубежных коллег / С. Е. Рудов, Е. Г. Хитров, М. Е. Рудов, В. В. Устинов // *Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика*. 2015. Т. 3, № 1 (12). С. 223—228.
20. *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, pp. 1005—1012.
21. Исследование коэффициента фильтрации лесной почвы (случай дерново-подзолистой почвы) / А. В. Калистратов, В. А. Иванов, Р. К. Коротков, Е. Г. Хитров, Г. В. Григорьев // *Системы. Методы. Технологии*. 2014. № 2 (22). С. 190—193.

22. Экспериментальное определение времени релаксации напряжений лесного грунта / И. В. Григорьев, А. И. Никифорова, А. А. Пельмский, Е. Г. Хитров, А. М. Хахина // Учёные записки Петрозаводского государственного университета. 2013. № 8 (137). С. 77—80.
23. Лухминский В. А. Совершенствование моделей и методов прогнозирования проходимости гусеничных лесных машин: Дис. ... канд. техн. наук: 05.21.01. СПб., 2018. 179 с.
24. Review of terramechanics models and their applicability to real-time applications / R. He, C. Sandu, A. K. Khan, A. G. Guthrie, P. Schalk Els, H. A. Hamersma // Journal of Terramechanics. 2019. Vol. 81. P. 3—22.
25. Impulse control technology for improving steering control systems of the tracked vehicles / R. Dobretsov, I. Grigorev, E. Tikhonov, A. Mikheev, A. Khakhina, T. Storodubtseva, S. Shiryaev, A. Burgonutdinov // International Review of Automatic Control. 2021. Vol. 14, no. 3. P. 172—178.
26. Добрецов Р. Ю., Григорьев И. В., Куницкая О. А. Шасси гусеничного трелёвочного трактора с «диагональной» системой управления поворотом // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2020. № 1. С. 42—48.
27. Адаптация принципа низкочастотного импульсного управления поворотом к трансмиссиям лесных и транспортно-тяговых гусеничных машин / Р. Ю. Добрецов, И. В. Григорьев, О. А. Куницкая, Н. Л. Фам // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2020. № 11. С. 29—35.
28. Добрецов Р. Ю., Григорьев И. В. Квазибесступенчатые трансмиссии для лесных гусеничных машин // Лесной вестник. Forestry Bulletin. 2018. Т. 22, № 1. С. 68—77.
29. Добрецов Р. Ю., Григорьев И. В. Перспективные трансмиссии лесных гусеничных машин // Повышение эффективности лесного комплекса: Материалы IV Всерос. научно-практич. конф. с междунар. участием. Петрозаводск, 2018. С. 57—58.
30. Увеличение подвижности гусеничных и колёсных машин / Р. Ю. Добрецов, И. В. Григорьев, С. Е. Рудов, Е. В. Тетеревлева, Ю. М. Чемшикова // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2019. № 11. С. 4—10.
31. Куницкая О. А., Григорьев И. В. Оценка эффективности работы операторов лесных машин // Транспортные и транспортно-технологические системы: Материалы Междунар. научно-техн. конф. / Отв. ред. Н. С. Захаров. Тюмень, 2019. С. 184—188.
32. Куницкая О. А., Григорьев И. В., Нгуен Т. Н. Современные методы и формы обучения операторов лесных машин // Инновации в химико-лесном комплексе: тенденции и перспективы развития: Сб. материалов Всерос. научно-практич. конф. / Отв. ред.: Ю. А. Безруких, Е. В. Мельникова. Красноярск, 2020. С. 277—280.
33. Григорьев И. В., Куницкая О. А., Фам Н. Л. Применение мобильных технологий для мониторинга, контроля и управления процессами сервиса лесных машин // Инновации в химико-лесном комплексе: тенденции и перспективы развития: Сб. материалов Всерос. научно-практич. конф. / Отв. ред.: Ю. А. Безруких, Е. В. Мельникова. Красноярск, 2020. С. 143—146.
34. Григорьев И. В., Рудов С. Е. Особенности эксплуатации колёсных лесных машин в сложных почвенно-грунтовых и рельефных условиях // Forest engineering: Материалы научно-практич. конф. с междунар. участием. Якутск, 2018. С. 67—71.

References

1. Grigorev I. V., Kunitskaya O. A., Rudov S. E., Davtyan A. B. Ways to increase the efficiency of forest machines. *Energy: Economics, Technology, Ecology*, 2020, no. 1, pp. 55—63. (In Russ.)

2. Grigorev I. V., Kunitskaya O. A., Proshikh A. A., Davtyan A. B., Rudov S. E. Prospects for creating logging complexes on the basis of domestic construction and agricultural machinery. *Repair. Restoration. Modernization*, 2020, no. 10, pp. 3—10. (In Russ.)
3. Manukovsky A. Yu., Zorin M. V., Proshikh A. A., Kunitskaya O. A., Grigorev I. V. Modern approaches to improving energy efficiency and efficiency of forest machines. *Priority directions of innovative activity in industry. collection of scientific articles of the sixth international scientific conference*. Kazan, 2020, pp. 138—140. (In Russ.)
4. Kunitskaya O. A. Proactive service for forest machines. *Increasing the efficiency of the forestry complex. Proceedings of the Sixth All-Russian National Scientific and Practical Conference with international participation*. Petrozavodsk, 2020, pp. 86—87. (In Russ.)
5. Kunitskaya O. A., Proshikh A. A., Davtyan A. B., Grigorev M. F., Grigoreva A. I. Organizational and technical solutions to increase the coefficient of technical readiness of forest machines. *Energy Efficiency and Energy Saving in Modern Production and Society. Materials of International Scientific-Practical Conference*. Voronezh, 2020, pp. 162—167. (In Russ.)
6. Rudov S. E., Kunitskaya O. A. Theoretical studies of ecological compatibility of wheeled forest machines and permafrost soils of cryolithozone forests. *Transport and transport-technological systems. Materials of the International Scientific and Technical Conference*. Ed. N. S. Zakharov. Tyumen, 2020, pp. 323—326. (In Russ.)
7. Grigorev I. V., Kunitskaya O. A., Grigorev M. F., Grigoreva A. I. Modeling of process of dynamic compaction of soil. *IX International Conference on Mathematical Modelling, devoted to 75th anniversary of Vladimir Nikolaevich Vragov. Theses of reports*. North-Eastern Federal University, Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia). Yakutsk, 2020, p. 144. (In Russ.)
8. Nikitina E. I., Kunitskaya O. A., Nikolaeva F. V. Project of logging organization in the conditions of Aldansky lesnichestvo with the use of multi-operational logging complexes. *Modern problems and achievements of agricultural science in the Arctic. Collection of scientific articles on the materials of All-Russian student scientific-practical conference with international participation in the framework of «Northern Forum — 2020» (September 29—30, 2020, Yakutsk) and International scientific online summer school — 2020 (July 6—20, 2020, Yakutsk)*. Yakutsk, 2020, pp. 138—148. (In Russ.)
9. Grigorev I., Kunitskaya 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, vol. 19, no. 2, pp. 439—447.
10. Kunitskaya 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, vol. 18, no. 3, pp. 95—102.
11. Burmistrova O. N., Proshikh A. A., Rudov S. E., Kunitskaya O. A., Grigorev I. V. Experimental studies of forwarder productivity taking into account its operating characteristics, logging parameters, and physical and mechanical properties of soil. *Resources and Technology*, 2021, vol. 18, no. 1, pp. 94—124. (In Russ.)
12. Burmistrova O. N., Teterlevleva E. V., Rudov S. E., Grigorev I. V., Kunitskaya O. A. Justification of initial requirements of mathematical model of interaction of wheeled vehicles on low-pressure pneumatics with forest soils. *Sistem. Methods. Technologies*, 2020, no. 2 (46), pp. 94—99. (In Russ.)
13. Burmistrova O. N., Teterlevleva E. V., Rudov S. E., Grigorev I. V., Kunitskaya O. A. Methodology and results of experimental studies of interaction of wheeled vehicles on low-pressure pneumatics with forest soils. *Sistem. Methods. Technologies*, 2020, no. 1 (45), pp. 66—71. (In Russ.)

14. Khitrov E. G., Bartenev I. M. Influence of angle of cross slope of rolling surface on traction and traction properties of wheeled mover. *Forest Engineering Journal*, 2016, no. 4 (24), pp. 225—232. (In Russ.)
15. Ageikin Y. S. *Drivability of cars*. Moscow, Mashinostroenie, 1981. 232 p. (In Russ.)
16. Larin V. V. *Methods of predicting the supportability of multi-axle wheeled vehicles on the ground*: Diss. ... dokt. in Technical Sciences: 05.05.03. Moscow, 2007. 530 p. (In Russ.)
17. Khakhina A. M. *Methods to predict and improve the passability of wheeled forest machines*: Diss. ... dokt. in Technical Sciences: 05.21.01. St. Petersburg, 2018. 318 p. (In Russ.)
18. Khitrov E. G. Complex substantiation of parameters and operating modes of forest machine engines: Diss. ... dokt. in Technical Sciences: 05.21.01. Voronezh, 2020. 319 p. (In Russ.)
19. Rudov S. E., Khitrov E. G., Rudov M. E., Ustinov V. V. Calculation of traction and coupling properties of wheeled skidder using data of foreign colleagues. *Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice*, 2015, vol. 3, no. 1 (12), pp. 223—228. (In Russ.)
20. 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, pp. 1005—1012.
21. Kalistratov A. V., Ivanov V. A., Korotkov R. K., Khitrov E. G., Grigorev G. V. Study of forest soil filtration coefficient (case of sod-podzolic soil). *Systems. Methods. Technologies*, 2014, no. 2 (22), pp. 190—193. (In Russ.)
22. Grigorev I. V., Nikiforova A. I., Pelymsky A. A., Khitrov E. G., Khakhina A. M. Experimental determination of stress relaxation time of forest soil. *Scientific Notes of Petrozavodsk State University*, 2013, no. 8 (137), pp. 77—80. (In Russ.)
23. Lukhminsky V. A. Improvement of models and methods of forecasting the permeability of tracked forest machines: Diss. ... kand. of Technical Sciences: 05.21.01. St. Petersburg, 2018. 179 p. (In Russ.)
24. He R., Sandu C., Khan A. K., Guthrie A. G., Schalk Els P., Hamersma H. A. Review of terramechanics models and their applicability to real-time applications. *Journal of Terramechanics*, 2019, vol. 81, pp. 3—22.
25. Dobretsov R., Grigorev I., Tikhonov E., Mikheev A., Khakhina A., Storodubtseva T., Shiryayev S., Burgonutdinov A. Impulse control technology for improving steering control systems of the tracked vehicles. *International Review of Automatic Control*, 2021, vol. 14, no. 3, pp. 172—178.
26. Dobretsov R. Y., Grigorev I. V., Kunitskaya O. A. Chassis of caterpillar skidder tractor with «diagonal» turn control system. *Repair. Restoration. Modernization*, 2020, no. 1, pp. 42—48. (In Russ.)
27. Dobretsov R. Y., Grigorev I. V., Kunitskaya O. A., Pham N. L. Adaptation of the principle of low-frequency pulse control of turning to transmissions of forestry and transport-traction crawler machines. *Repair. Restoration. Modernization*, 2020, no. 11, pp. 29—35. (In Russ.)
28. Dobretsov R. Y., Grigorev I. V. Quasi-stage transmissions for forestry tracked machines. *Forestry Bulletin. Forestry Bulletin*, 2018, vol. 22, no. 1, pp. 68—77. (In Russ.)
29. Dobretsov R. Y., Grigorev I. V. Prospective transmissions of forest tracked machines. *Increasing the efficiency of the forestry complex. Proceedings of IV All-Russian scientific-practical conference with international participation*. Petrozavodsk, 2018, pp. 57—58. (In Russ.)
30. Dobretsov R. Y., Grigorev I. V., Rudov S. E., Teterlevleva E. V., Chemshikova Yu. M. Increase mobility of tracked and wheeled machines. *Repair. Restoration. Modernization*, 2019, no. 11, pp. 4—10. (In Russ.)

31. Kunitskaya O. A., Grigorev I. V. Assessment of the efficiency of forest machine operators. *Transport and transport-technological systems. Materials of the International Scientific and Technical Conference*. Ed. N. S. Zakharov. Tyumen, 2019, pp. 184—188. (In Russ.)
32. Kunitskaya O. A., Grigorev I. V., Nguyen T. N. Modern methods and forms of training forest machine operators. *Innovations in the chemical and forestry complex: trends and prospects for development. Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference*. Ed.: Yu. A. Bezrukikh, E. V. Melnikova. Krasnoyarsk, 2020, pp. 277—280. (In Russ.)
33. Grigorev I. V., Kunitskaya O. A., Pham N. L. Application of mobile technologies for monitoring, control and management of forest machine service processes. *Innovations in the chemical and forestry complex: trends and prospects for development. Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference*. Ed.: Yu. A. Bezrukikh, E. V. Melnikova. Krasnoyarsk, 2020, pp. 143—146. (In Russ.)
34. Grigorev I. V., Rudov S. E. Features of the operation of wheeled forest machines in complex soil and terrain conditions. *Forest engineering. materials of scientific and practical conference with international participation*. Yakutsk, 2018, pp. 67—71. (In Russ.)

© До Туан Ань, Григорьев Г. В., Каляшов В. А., Гурьев А. Ю., Григорьева О. И.,
Хитров Е. Г., 2022