

Обоснование безопасного и устойчивого маневрирования колёсного движителя лесных машин в сложных геотехнических условиях работы

В.Я. Шапиро^{1a}, С.И. Савченко^{2b}, И.В. Григорьев^{3c}, Е.А. Тихонов^{4d}, Н.О. Задраускайте^{5e}, А.Ю. Калита^{6f}

¹ Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова, Институтский пер., 5, Санкт-Петербург, Россия

² Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, ул. Тимирязева, д. 8, Воронеж, Россия

³ Арктический государственный агротехнологический университет, ш. Сергеляхское, 3 км, д. 3, Якутск, Россия

⁴ Петрозаводский государственный университет, пр. Ленина, д. 33, Петрозаводск, Россия

⁵ Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, набережная Северной Двины, д. 17, Архангельск, Россия

⁶ Тихоокеанский государственный университет, ул. Тихоокеанская, 136, Хабаровск, Россия

^a shapiro54vlad@mail.ru, ^b savchenko.stas2020@yandex.ru, ^c silver73@inbox.ru.ru, ^d tihonov@petrsu.ru,

^e n.zadrauskaite@narfu.ru, ^f Alexgrushina@mail.ru

^a <https://orcid.org/0000-0002-6344-1239>, ^b <https://orcid.org/0000-0002-8740-4838>,

^c <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>, ^d <https://orcid.org/0000-0003-2136-3268>,

^e <https://orcid.org/0000-0002-4248-7860>, ^f <https://orcid.org/0000-0002-5571-8074>

Статья поступила 17.06.2025, принята 15.09.2025

К сложным геотехническим условиям эксплуатации лесных машин принято относить слабонесущие (переувлажнённые почвогрунты) склоны. При работе на слабонесущих почвогрунтах наблюдается процесс интенсивного образования колеи, который приводит к быстрой потере работоспособности трелёвочных волоков. Образование колеи, как известно, является следствием неравномерного износа поверхности движения, в результате которого в межколеинном пространстве образуется выступ, который из-за деформации почвогрунта под движителем машины может превышать начальный уровень поверхности движения. При достижении высоты межколеинного выступа величины клиренса машины работоспособность волока является исчерпанной. При этом требования нормативной документации по организации лесосечных работ, в частности требования к проценту площади лесосеки, занятой трелёвочными волоками и технологическими коридорами, не позволяют создать новый трелёвочный волок рядом с потерявшим работоспособность. На практике с целью срезания межколеинного выступа на слабонесущих почвогрунтах лесные машины по трелёвочным волокам движутся в режиме почти постоянного разгона направленного поворота (галсами). Это позволяет разрушать межколеинный выступ, но приводит к повышенному расходу топлива и увеличению среднего расстояния, проходимого лесной машиной, т. е. к снижению производительности. В статье показано, что в сложных геотехнических условиях работы лесных машин на переувлажнённых почвогрунтах и образовании вследствие этого глубокой колеи для эффективного и безопасного маневрирования колёсного движителя и сохранения его устойчивости в границах волока необходимо произвести предварительную оценку возникающих импульсов массы и силы. Совместное выполнение предложенных в статье критериев по выходу движителя из глубокой колеи и сохранении при этом его устойчивости в границах трассы движения будет способствовать повышению работоспособности трелёвочного волока, а также эффективности и безопасности лесосечных / лесохозяйственных работ в целом.

Ключевые слова: маневрирование лесных машин, лесные машины, трелёвочные системы, деформация почвогрунта, колеобразование, геотехнические факторы.

Justification of safe and stable maneuvering of a forestry machine wheeled propeller in difficult geotechnical operating conditions

V.Ya. Shapiro^{1a}, S.I. Savchenko^{2b}, I.V. Grigoriev^{3c}, E.A. Tikhonov^{4d}, N.O. Zadrauskaite^{5e}, A.Yu. Kalita^{6f}

¹ St. Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov; 5, Institutsky Lane, St. Petersburg, Russia

² Voronezh State Forestry Engineering University named after G.F. Morozov; 8, Timiryazev St., Voronezh, Russia

³ Arctic State Agrotechnological University; 3 km, Bld. 3, Sergelyakhskoye Shosse, Yakutsk, Russia

⁴ Petrozavodsk State University; 33, Lenin Ave., Petrozavodsk, Russia

⁵ Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov; 17, Severnaya Dvina Emb., Arkhangelsk, Russia

⁶ Pacific State University; 136, Tikhookeanskaya St., Khabarovsk, Russia

^a shapiro54vlad@mail.ru, ^b savchenko.stas2020@yandex.ru, ^c silver73@inbox.ru.ru, ^d tihonov@petrsu.ru,

^e n.zadrauskaite@narfu.ru, ^f Alexgrushina@mail.ru

^a <https://orcid.org/0000-0002-6344-1239>, ^b <https://orcid.org/0000-0002-8740-4838>,

^c <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>, ^d <https://orcid.org/0000-0003-2136-3268>,

^e <https://orcid.org/0000-0002-4248-7860>, ^f <https://orcid.org/0000-0002-5571-8074>

Received 17.06.2025, accepted 15.09.2025

Difficult geotechnical conditions for the operation of forest machinery include low-bearing (waterlogged soils) slopes. When working on low-bearing soils, the process of intensive track formation is observed, which leads to a rapid loss of performance of the skidding trails. The formation of a rut, as it is known, is a consequence of uneven wear of the movement surface, as a result of which a protrusion forms in the inter-track space, which, due to the deformation of the soil under the wheeled propeller, may exceed the initial level of the movement surface. When the height of the inter-track projection is reached, the clearance value of the machine is exhausted. At the same time, the requirements of regulatory documentation on the organization of logging operations, in particular the requirements for the percentage of the felling area occupied by skidding trails and technological corridors, do not allow the creation of a new skidding trail next to one that has lost its operability. In practice, in order to cut the inter-track protrusion on weak-bearing soils, forestry machines move along skidding trails in a mode of almost constant multi-directional turns (in tacks). This makes it possible to destroy the inter-track protrusion, but it leads to increased fuel consumption and an increase in the average distance traveled by a forestry machine, i.e., to a decrease in productivity. The article shows that in difficult geotechnical conditions of operation of forest machinery on waterlogged soils and the formation of deep ruts as a result, for effective and safe maneuvering of the wheeled propeller and maintaining its stability within the boundaries of the portage, it is necessary to make a preliminary assessment of the resulting mass and force impulses. The joint implementation of the criteria proposed in the article for the engine to exit the deep track and, at the same time, maintain its stability within the boundaries of the traffic route will help improve the efficiency of the skidding portage, as well as the efficiency and safety of logging / forestry operations in general.

Keywords: maneuvering of forest vehicles, forest vehicles, skidding systems, soil deformation, rutting, geotechnical factors.

Введение. Работа лесных машин в тёплое время года в большей части случаев характеризуется сложными геотехническими условиями эксплуатации [1–3]. Это связано с тем, что более 60 % территории лесного фонда Российской Федерации находится на почвогрунтах III и IV категории [4–6]. Переувлажнение почвогрунтов приводит к резкой потере их несущей способности, в результате чего под воздействием движителей лесных машин на трелёвочных волоках быстро образуется колея, которая с течением времени часть становится очагом водной эрозии и заболачивания [7–9].

При выполнении лесосечных и/или лесохозяйственных работ в сложных геотехнических условиях поверхности движения, в первую очередь по переувлажненным почвогрунтам с образованием глубокой колеи, операторы направляют машины при движении по волоку галсами, с целью срезания нароста почвогрунта, образующегося в межколеинном пространстве [10], т. е. движитель лесной машины или трелёвочной системы на её базе осуществляет маневрирование [11].

Данная техническая операция является вынужденной и в ряде случаев необходимой для поддержания трелёвочного волока или технологического коридора в работоспособном состоянии [12, 13].

Как известно, в сложных геотехнических условиях работы лесных машин глубина колеи h_k может достигать значений 0,35–0,45 м, что значительно превышает нормативную величину $h_n = 0,1$ м, при которой работоспособность трелёвочного волока (технологического коридора) максимальная.

Наряду с этим при такой глубине колеи интенсивность процесса маневрирования возрастает, т. е. растёт угол θ отклонения движителя от заданного по технологической карте на разработку лесосеки прямолинейного направления движения.

Движение все чаще происходит галсами, и значения угла θ могут достигать 20–30 и более градусов.

Первые колёсные пары лесной машины, погружаясь на такую глубину h_k , приводят к образованию массива почвогрунта между колеями (так называемого межко-

лейного пространства) объёмом V_k с массой M_k такими, что в ряде случаев техника, выработав высоту клиренса, «садится» на своё днище, делая невозможным её дальнейшее продвижение по трассе волока.

Материалы и методы исследования. Использованы справочные данные о физико-механических свойствах мёрзлых и оттаивающих почвогрунтов. Расчёты выполнены на основе механики разрушений. Использованы методы аппроксимации численных данных.

Результаты исследования. Размеры сдвигаемого массива составляют: ширина L_u равна ширине L_b колёсной базы за минусом удвоенной ширины $L_{ш}$ шин, высота равна глубине колеи h_k , а длина – длине пятна контакта L_n .

Принимая во внимание значения параметров: $L_u \approx 1,4$ м (при $L_b = 3$ м и $L_{ш} = 0,8$ м), $h_k = 0,3–0,5$ м и $L_n = 0,4–0,5$ м, сдвигаемый объём V_k может достигать $0,3$ м³, а масса M_k превысить $0,3$ т при плотности ρ влажного почвогрунта более 1000 кг/м³.

Такие параметры сдвигаемого массива требуют формирования в его краевой части в границах волока (технологического коридора) соответствующих касательных напряжений τ от действия сосредоточенной нагрузки Q , равной весу лесной машины или трелёвочной системы на её базе.

В процессе маневрирования лесной машины или трелёвочной системы на её базе с критическими углами поворота возникает опасность формирования предельных моментов их опрокидывания M_o , превышающих величину M_y момента удержания на склоне.

В этой связи актуальной является задача установления границ диапазона допустимых отклонений угла маневрирования лесной машины или трелёвочной системы на её базе, в пределах которых обеспечивается их устойчивость и стабилизация работоспособности трелёвочного волока или технологического коридора.

В основу математической модели для определения величины τ положены результаты исследований [1–5].

Пусть задана подвижная система координат $xOyz$ с центром в точке O – приложения нагрузки Q .

Ось z направим перпендикулярно вниз к поверхности трассы движения, ось x – вдоль неё и ось y – перпендикулярно направлению движения лесной машины или трелёвочной системы на её базе.

Сосредоточенная сила Q , направленная вдоль оси z , оказывает вертикальное давление на почвогрунт $q_\theta = Q/S_n$, где S_n – площадь пятна контакта. Если работы производят на склонах с углом наклона α к линии горизонта, то в качестве вертикальной силы принимают составляющую веса в виде $Q \cdot \cos \alpha$.

Сила бокового распора формирует в направлении оси y горизонтальные напряжения сдвига $\tau_c = \nu / (1 - \nu) \cdot q_\theta$, где ν – коэффициент Пуассона.

При маневрировании движителя процесс деформирования почвогрунта целесообразно рассмотреть в цилиндрической системе координат $zr\theta$ с вертикальной z , радиальной r и тангенциальной θ координатами, соотношения для определения которых представлены в [11].

Дополнительные касательные напряжений $\tau_{r\theta}$ определяются в виде:

$$\tau_{r\theta} = 0,018 \cdot Q \cdot \cos \alpha \cdot (1 - 2\nu) \cdot (7,0178\theta + 0,633) \cdot e^{-4,372r}. \quad (1)$$

Суммируя горизонтальные напряжения сдвига τ_c с величиной $\tau_{r\theta}$, получим результирующую величину касательных напряжений τ в направлении массива между колёсами:

$$\tau = \tau_c + \tau_{r\theta}. \quad (2)$$

При погружении колеса радиусом R в почвогрунт на глубину колеи h_k площадь сектора S_k взаимодействия колеса с массивом почвогрунта равна:

$$S_k = \frac{R^2}{2} (\mu - \sin \mu), \quad (3)$$

где центральный угол $\mu = 2 \arccos (1 - h_k / R)$.

Сила сдвига F_c будет равна произведению величины τ на S_k :

$$F_c = (\tau_c + \tau_{r\theta}) \frac{R^2}{2} (\mu - \sin \mu). \quad (4)$$

За время t воздействия силы F_c на участок сдвигаемого массива почвогрунта возникает импульс силы сдвига:

$$I_c = F_c \cdot t. \quad (5)$$

Масса сдвигаемого массива почвогрунта с учётом его плотности ρ равна:

$$M_k = \rho L_u h_k L_n. \quad (6)$$

Импульс массы тела I_m при его перемещении со скоростью V равен:

$$I_m = M_k \cdot V. \quad (7)$$

Критерием выполнения сдвига массива почвогрунта между колёсами в момент маневрирования движителя принимается условие превышения импульса силы сдвига, действующей на участок массива, над импульсом его массы:

$$I_c > I_m, \text{ Н} \cdot \text{с}. \quad (8)$$

Как видим в соотношения для расчёта импульсов I_c и I_m входит величина глубины колеи h_k , которую определим как [11]:

$$h_k = a \sqrt{\frac{q_\theta}{2\tau}} (1 - \gamma) (1 + \sin 2\theta), \quad \gamma = \nu / (1 - \nu), \quad (9)$$

где a – радиус пятна контакта.

Величина предельного касательного напряжения τ на площадках сдвига зависит от q_θ и параметров паспорта прочности грунта – величины сцепления C и угла внутреннего трения ϕ . Указанные параметры C и ϕ наряду с коэффициентом Пуассона ν , как установлено в ходе исследований [11–15], существенно зависят от влажности почвогрунта W .

Численные расчёты произведены при следующих принятых исходных данных параметров:

– вес трелёвочной системы является переменной величиной и изменяется в пределах $Q = 6 - 24$ т, радиус колеса $R = 0,625$ м, скорость движения $V = 0,6$ м/с, время взаимодействия $t = 8$ с;

– пятно контакта: длина $L_n = 0,42$ м, ширина $B_n = 0,73$ м, площадь $S_n = 0,3066$ м², радиус $a = 0,31$ м, площадь сектора взаимодействия – $S_k = 0,37$ м² (1/3 площади колеса);

– угол наклона склона $\alpha = 15^\circ$, угол поворота движителя варьировался в пределах $\theta = 5 - 25^\circ$.

Грунт представляет собой суглинок, влажность которого изменялась от состояния предела пластичности $W = W_n = 28$ % до состояния предела текучести $W = W_m = 43$ %, что соответствует значению коэффициента пластичности, равному 15 [16–18].

Плотность грунта ρ при $W_n = 28$ % принималась равной $\rho = 1100$ кг/м³, соответствующей коэффициенту пористости 0,7. При иной влажности W плотность корректировалась через коэффициент пропорциональности λ_w :

$$\lambda_w = \frac{1 + W / 100}{1 + W_n / 100}. \quad (10)$$

В результате произведённых расчётов установлено, что при вариации веса Q , влажности W и угла θ в выше обозначенных пределах глубина колеи h_k изменяется от 0,20 м до 0,45 м, при этом установлены широкие диапазоны изменений значений импульсов:

$$I_c = 33,05 - 401,74 \text{ Н} \cdot \text{с}, \quad I_m = 80,65 - 181,46 \text{ Н} \cdot \text{с}. \quad (11)$$

На рис. 1 показано влияние глубины колеи h_k , м на формирование значений импульсов I_m и I_c , Н · с.

Как видим, до глубины колеи $h_k = 0,30$ м формируемый импульс силы не превосходит значений импульса массы. При дальнейшем росте h_k условие (8) выполняется.

Полученные результаты позволяют ввести безразмерный критерий эффективного сдвига, равный отношению импульсов:

$$G = \frac{I_c}{I_m}, \quad (12)$$

тогда условие (8) соответствует выполнению критерия:

$$G > 1. \quad (13)$$

В частности, при $Q = 14$ т, $W = 33$ % и $\theta = 25^\circ$ глубина колеи составляет $h_k = 0,34$ м, значения импульсов достигают $I_c = 160,16$ Н·с, $I_m = 137,1$ Н·с. Критерий (13) достигает уровня $G = 1,17$, что соответствует условию реализации сдвига массива почвогрунта между колеями.

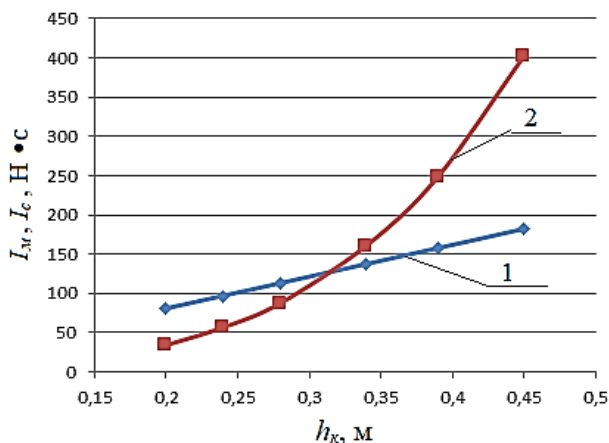


Рис. 1. Влияние глубины колеи на значения импульсов массы и силы: 1 – значения импульсов I_m ; 2 – значения импульсов I_c

Для этих же исходных данных, но при маневрировании с углом поворота $\theta = 5^\circ$, несмотря на то, что глубина колеи снизилась до $h_k = 0,26$ м, критерий сдвига уменьшился до уровня $G = 0,72$, т. е. сдвиг массива почвогрунта обеспечить не представляется возможным при таком незначительном маневрировании.

Очевидно, что необходимость осуществления резкого маневрирования движителя с большими углами поворота (более 20°) снижает его устойчивость на трассе, в связи с чем возникает опасность его опрокидывания при выходе из колеи.

Величину опрокидывающего момента M_o определим как:

$$M_o = F_c \cdot h_k. \quad (14)$$

Величина удерживающего момента M_y определяется нагрузкой на почвогрунт и шириной пятна контакта:

$$M_y = Q \cdot B_n / 2. \quad (15)$$

Анализ переменных, входящих в формулы (14) и (15) для определения моментов, показывает, что существенным параметром для величин M_o и M_y как и для импульсов I_c и I_m является глубина колеи h_k .

Рис. 2 отражает влияние h_k , м на значения моментов M_o и M_y , кН·м.

Как видим, при изменении глубины колеи h_k от 0,2 до 0,45 м величина момента удержания M_y возрастает от 22 до 97 кН·м. В то же время величина момента опрокидывания M_o возрастает от 7 до 181 кН·м.

Этот вывод свидетельствует о высокой вероятности в данных геотехнических условиях работы лесной машины потери устойчивости движителя в момент его резкого маневрирования при попытке выхода из глубокой колеи.

Это коррелируется с результатами исследований в области защитных конструкций лесных машин [19–21].

Анализ графических данных показывает, что существует предельный уровень глубины колеи (для данного примера расчёта и его иллюстрации на рис. 2) – это $h_k = 0,33$ м, до достижения которого удерживающий момент превосходит момент опрокидывания и движитель будет сохранять устойчивость в момент маневрирования.

При превышении глубиной колеи обозначенного предельного уровня величина момента M_o возрастает по закону параболы и вероятность потери устойчивости резко увеличивается.

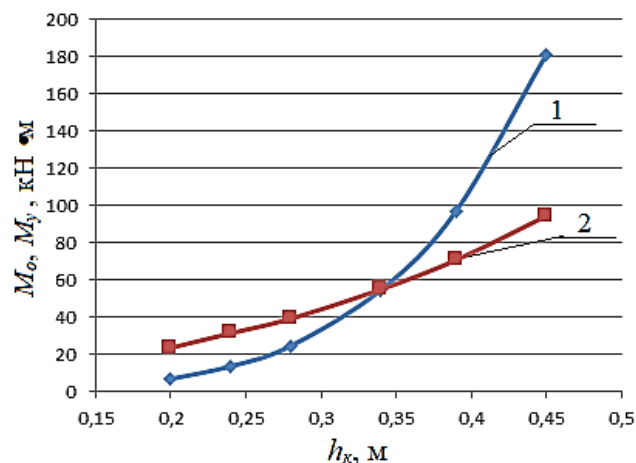


Рис. 2. Влияние глубины колеи на значения моментов удержания и опрокидывания движителя в границах колеи: 1 – значения моментов M_o ; 2 – значения моментов M_y

Введём критерий устойчивости движителя:

$$U = M_y / M_o > 1. \quad (16)$$

В табл. 1 приведены результаты численного моделирования процесса сдвига движителем массива грунта между колеями в момент маневрирования с двумя существенно различными углами поворота θ и обеспечения его устойчивости в границах волока. Результаты расчётов получены при $Q = 14$ т, $W = 33$ %.

Как следует из анализа данных табл. 1, при малом маневрировании сдвиг массива почвогрунта в межколейном пространстве обеспечить не удастся, но при этом устойчивость движителя достаточно высокая.

При маневрировании с большим углом поворота выполняются оба критерия (13) и (16).

Таблица 1. Результаты численного моделирования

θ , °	h_k , м	I_m , Н·с	I_c , Н·с	G	M_o , кН·м	M_y , кН·м	U
5	0,26	104,8	75,05	0,72	19,51	54,88	2,81
25	0,34	137,1	160,16	1,17	54,45	54,88	1,01

Исследуем детально влияние наиболее важных факторов – угла маневрирования, влажности почвогрунта и веса лесной машины или трелёвочной системы на её базе – на процесс изменения устойчивости движителя.

При фиксированных $Q = 14$ т, $W = W_n = 28$ % изучено влияние угла поворота θ° на величину критерия U (рис. 3).

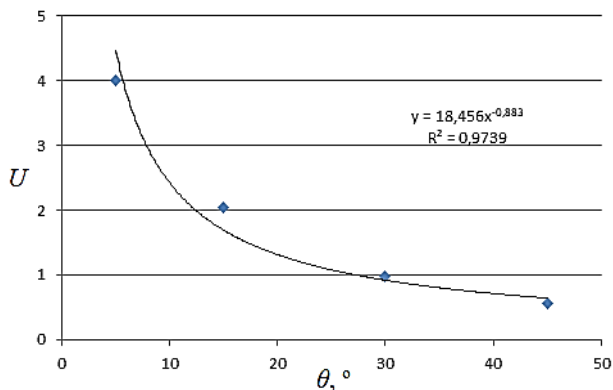


Рис. 3. Влияние угла поворота двигателя на его устойчивость

Как видим, для данного веса лесной машины или трелёвочной системы на её базе в почвогрунтах с умеренной влажностью, не превышающей своего предела пластичности, маневрирование с углами поворота до 25° обеспечивает устойчивое положение двигателя в границах волока (технологического коридора).

При этом до значений угла поворота 15° имеет место резкое снижение устойчивости, после чего дальнейшее снижение носит асимптотический характер.

Примем угол $\theta = 25^\circ$ постоянным и исследуем (рис. 4) влияние показателя влажности W , % в пределах её изменения от состояния пластичности до состояния текучести на величину критерия устойчивости U .

Анализ данных рис. 4 показывает, что при превышении W показателя 32 % положение двигателя характеризуется неустойчивым состоянием, и по мере приближения влажности к своему пределу текучести $W_m = 43\%$ характер неустойчивости только возрастает.

Исследования показали, что наряду с факторами угла поворота θ и влажности W вес лесной машины или трелёвочной системы на её базе Q также оказывает существенное влияние на величину критерия U .

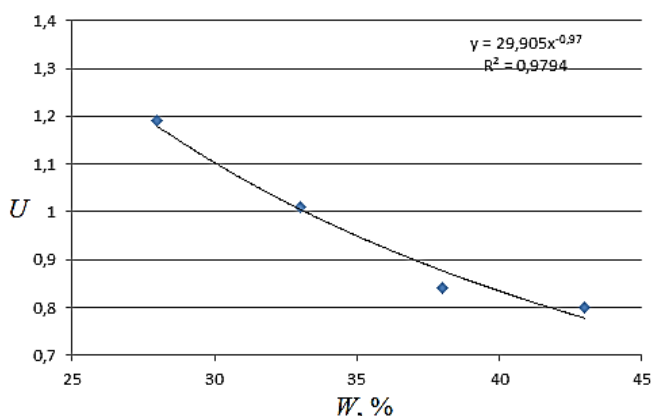


Рис. 4. Влияние влажности почвогрунта на устойчивость двигателя

На рис. 5 при $\theta = 25^\circ$ и влажности $W = 33\%$ отражено указанное влияние.

Крутое снижение устойчивости с ростом веса лесной машины или трелёвочной системы на её базе в диапазоне от 6 до 10 т ограничивает маневрирование двигателя при большой нагрузке.

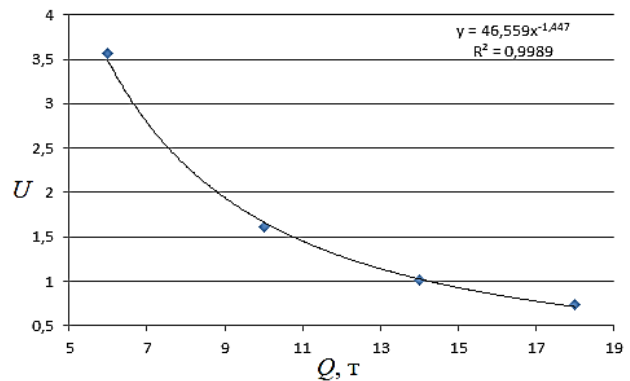


Рис. 5. Влияние веса лесной машины или трелёвочной системы на её базе на её устойчивость

В табл. 2 для различных значений угла θ и веса Q представлены результаты расчётов по определению критерия сдвига массива G (числитель) и критерия устойчивости U (знаменатель).

Таблица 2. Расчётные значения критериев сдвига и устойчивости: G (числитель), U (знаменатель)

Угол $\theta, ^\circ$	Вес лесной машины или трелёвочной системы на её базе $Q, т$			
	6	12	18	24
5	0,24/10,59	0,59/3,42	0,97/2,00	1,38/1,38
15	0,31/6,46	0,78/1,91	1,27/1,12	1,80/0,81
30	0,44/3,02	1,07/1,00	1,74/0,60	2,43/0,43

Совместное влияние при влажности грунта $W = 33\%$ веса лесной машины или трелёвочной системы на её базе $Q, т$ и угла θ° на значение критерия сдвига G (ось аппликата) отражено на рис. 6, а, а критерия устойчивости U – на рис. 6, б.

Как следует из анализа данных рис. 6, совместное влияние веса лесной машины или трелёвочной системы на её базе и угла его поворота на критерии G и U прямо противоположное.

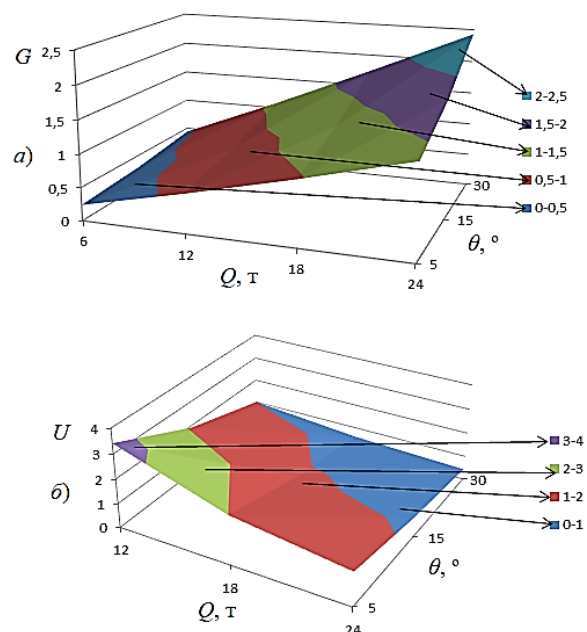


Рис. 6. Совместное влияние веса лесной машины или трелёвочной системы на её базе и угла его поворота на показатели критериев сдвига и устойчивости

Если с ростом значений Q и θ условия для сдвига массива почвогрунта в межколейном пространстве и, соответственно, проходимости движителя улучшаются, то для показателя его устойчивости – наоборот, ухудшаются.

В этом случае необходимо принимать компромиссное решение посредством определения рациональных параметров веса лесной машины или трелёвочной системы на её базе и её маневрирования с целью обеспечения как работоспособности трелёвочного волока, так и устойчивости движителя в его пределах.

Если обратиться к данным табл. 2, то для данного примера расчёта можно установить всего три сочетания параметров Q и θ , когда оба критерия – (13) по обеспечению сдвига почвогрунта в межколейном пространстве и (16) по обеспечению устойчивости движителя выполняются:

$$Q = 12 \text{ т } \theta = 30^\circ; 2) Q = 18 \text{ т } \theta = 15^\circ; 3) Q = 24 \text{ т } \theta = 5^\circ. \quad (17)$$

Заключение. Таким образом, выполненные исследования позволяют заключить, что в сложных геотехнических условиях работы лесных машин на пере-

увлажнённых почвогрунтах и образовании вследствие этого глубокой колеи для эффективного и безопасного маневрирования колёсного движителя и сохранения его устойчивости в границах волока необходимо произвести предварительную оценку возникающих импульсов массы и силы.

С этой целью для оценки импульсов необходимо использовать установленные соотношения (5) и (7), а для оценки моментов – соотношения (14) и (15).

Совместное выполнение предложенных критериев (13) и (16) по выходу движителя из глубокой колеи и сохранении при этом его устойчивости в границах трассы движения будет способствовать повышению работоспособности трелёвочного волока, а также эффективности и безопасности лесосечных / лесохозяйственных работ в целом.

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

Литература

- Должиков И.С., Куницкая О.А., Швецов А.С. Актуальная типизация природно-производственных условий лесозаготовительного и лесохозяйственного производства // Лесная инженерия, материаловедение и дизайн. Мат-лы 89-й науч.-техн. конф. профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с международным участием). – Минск, 2025. – С. 121–124.
- Теоретическое обоснование тягово-сцепных свойств гусеничного движителя лесной машины для условий многолетней мерзлоты / В.М. Дьяченко, И.С. Должиков, Е.Г. Хитров [и др.] // Resources and Technology. – 2025. – Т. 22, № 1. – С. 1–41.
- Конечно-разностная схема для расчёта прогиба дорожного мата под воздействием движителя лесной машины / М.В. Зорин, Е.Г. Хитров, О.А. Куницкая [и др.] // Лесной вестник. Forestry Bulletin. – 2025. – Т. 29, № 1. – С. 96–111.
- Никифорова А.И., Хитров Е.Г., Пельмский А.А., Григорьева О.И. Определение осадки при движении лесозаготовительной машины по двуслойному основанию // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. – 2014. – № 2 (139). – С. 87–91.
- Никифорова А.И., Григорьева О.И. Моделирование воздействия движителей лесных машин на почвы лесосек // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2015. – Т. 3, № 5–4 (16–4). – С. 320–323.
- Влияние переменных коэффициентов сопротивления движению и сцепления на производительность форвардера / О.Н. Бурмистрова, А.А. Просужих, Е.Г. Хитров [и др.] // Деревообрабатывающая промышленность. – 2021. – № 1. – С. 3–16.
- Григорьев И.В., Григорьева О.И. Основные направления обеспечения экологической безопасности лесозаготовительного производства // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2015. – Т. 3, № 2–1 (13–1). – С. 202–205.
- Григорьев И.В., Григорьева О.И. Повышение экологической эффективности лесохозяйственного производства // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2014. – Т. 2, № 3–4 (8–4). – С. 51–55.
- Оценка экологической безопасности работы лесных машин / А.И. Никифорова, О.И. Григорьева, Д.С. Киселев [и др.] // Природные ресурсы и экология Дальневосточного региона. Мат-лы Междунар. науч.-практ. форума. – 2013. – С. 134–138.
- Куницкая О.А., Никитина Е.И., Николаева Ф.В. Особенности лесозаготовки в Республике Саха Якутия // Управление земельными ресурсами, землеустройство, кадастр, геодезия и картография. Проблемы и перспективы развития : сборник материалов Всеросс. науч.-практ. конф. с междунар. участием, посвященной 255-летию Землеустройству Якутии и Году науки и технологий. – Якутск, 2021. – С. 308–313.
- Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Лепилин Д.В., Жукова А.И. Моделирование уплотнение почвогрунта в боковых пологах трелёвочного волока с учетом изменчивости трассы движения // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. – 2010. – № 6 (111). – С. 61–64.
- Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Жукова А.И. Особенности динамического уплотнения почвы при ее циклическом нагружении // Актуальные проблемы современной науки. – 2006. – № 3 (29). – С. 301–309.
- Особенности учёта состояния массива мерзлых грунтов при циклическом взаимодействии с трелёвочной системой / С.Е. Рудов, В.Я. Шапиро, И.В. Григорьев [и др.] // Лесотехнический журнал. – 2019. – Т. 9, № 1 (33). – С. 116–128.
- Исследование процесса разрушения мёрзлых и оттаивающих почвогрунтов при воздействии трелёвочной системы / С.Е. Рудов, В.Я. Шапиро, И.В. Григорьев [и др.] // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2020. – № 2, (374). – С. 101–117.
- Моделирование взаимодействия лесных машин с почвогрунтом при работе на склонах / С.Е. Рудов, В.Я. Шапиро, И.В. Григорьев [и др.] // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2021. – № 6 (384). – С. 121–134.
- Зеркаль О.В., Фоменко И.К. Оценка влияния анизотропии свойств грунтов на устойчивость склонов // Инженерные изыскания. – 2013. – № 9. – С. 44–50.

17. Мирный А.Ю. Исследования дилатансии в дисперсных грунтах и методы ее количественной оценки // Инженерная геология. – 2019. – Т. 14, № 2. – С. 34–43.
18. Калабина М.В., Царапов М.Н. Прочностные свойства оттаивающих грунтов // Современное состояние, проблемы и перспективы развития отраслевой науки. Мат-лы Всеросс. конф. с междунар. участием. – 2017. – С. 542–546.
19. Скобцов И.Г., Куницкая О.А. Требования стандартов по безопасности при работе на лесных машинах // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. – 2022. – № 1. – С. 51–56.
20. Скобцов И.Г., Куницкая О.А. Обзор конструктивных решений защитных устройств кабин лесных машин // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. – 2022. – № 1. – С. 60–69.
21. Скобцов И.Г., Куницкая О.А. Исследование динамических нагрузок, действующих на кабину лесной машины при различных вариантах возникновения аварийных ситуаций // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. – 2022. – № 3. – С. 28–39.
22. Скобцов И.Г., Куницкая О.А. Краткий обзор методов расчёта конструкций кабин лесных машин с учетом пластических деформаций // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. – 2023. – № 3. – С. 16–26.
- scientific research of the XXI century: theory and practice. – 2014. – Vol. 2. – № 3–4 (8–4). – pp. 51–55.
9. Environmental safety assessment of forest machinery / Nikiforova A.I., Grigoreva O.I., Kiselev D.S. // Natural resources and ecology of the Far Eastern region. Materials of the International Scientific and Practical Forum. 2013. pp. 134–138.
10. Kunitskaya O.A., Nikitina E.I., Nikolaeva F.V. Features of logging in the Republic of Sakha Yakutia // Land management, land management, cadastre, geodesy and cartography. Problems and prospects of development. Collection of materials of the All-Russian scientific and practical conference with international participation dedicated to the 255th anniversary of the Land Management of Yakutia and the Year of Science and Technology. – Yakutsk, 2021. pp. 308–313.
11. Shapiro V.Ya., Grigoriev I.V., Lepilin D.V., Zhukova A.I. Modeling soil compaction in the lateral lanes of a skidding portage taking into account the variability of the traffic route // Scientific Notes of Petrozavodsk State University. 2010. – № 6 (111). – pp. 61–64.
12. Shapiro V.Ya., Grigoriev I., Zhukova A.I. Features of dynamic soil compaction under its cyclic loading // Actual problems of modern science. – 2006. – № 3(29). – pp. 301–309.
13. Features of accounting for the state of a frozen soil mass during cyclic interaction with a skidding system / Rudov S.E., Shapiro V.Ya., Grigoriev I.V. // Forestry engineering magazine. – 2019. – Vol. 9, № 1(33). – pp. 116–112.
14. Rudov S.E., Shapiro V.Ya., Grigoriev I.V., Kunitskaya O.A., Grigorieva O.I. Investigation of the process of destruction of frozen and thawing soils under the influence of a skidding system // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Forest magazine. – 2020. – № 2 (374). – pp. 101–117.
15. Rudov S.E., Shapiro V.Ya., Grigoriev I.V., Kunitskaya O.A., Grigorieva O.I. Modeling the interaction of forest machines with soil when working on slopes // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Forest magazine. – 2021. – № 6 (384). – pp. 121–134.
16. Zerkal O.V., Fomenko I.K. Assessment of the influence of anisotropy of soil properties on slope stability // Engineering surveys. – 2013. – № 9. – pp. 44–50.
17. Mirny A.Y. Studies of dilatancy in dispersed soils and methods of its quantitative assessment // Engineering geology. – 2019. – Vol. 14. – № 2. – pp. 34–43.
18. Kalabina M.V., Tsarapov M.N. Strength properties of thawing soils // Current state, problems and prospects of development of branch science. Materials of the All-Russian conference with international participation. – 2017. pp. 542–546.
19. Skobtsov I.G., Kunitskaya O.A. Requirements of safety standards when working on forest machinery // Occupational safety and health in logging and woodworking industries. – 2022. – № 1. – pp. 51–56.
20. Skobtsov I.G., Kunitskaya O.A. Review of constructive solutions for protective devices of cabins of forest machinery // Occupational safety and health in logging and woodworking industries. – 2022. – № 1. – pp. 60–69.
21. Skobtsov I.G., Kunitskaya O.A. Investigation of dynamic loads acting on the cabin of a forestry machine in various emergency situations // Occupational safety and health in logging and woodworking industries. – 2022. – № 3. – pp. 28–39.
22. Skobtsov I.G., Kunitskaya O.A. A brief overview of methods for calculating cabin structures of forestry machines taking into account plastic deformations // Occupational safety and health in logging and woodworking industries. – 2023. – № 3. – pp. 16–26.

References

1. Dolzhikov I.S., Kunitskaya O.A., Shvetsov A.S. Actual typification of natural and industrial conditions of logging and forestry production // Forest engineering, materials science and design. Proceedings of the 89th Scientific and Technical Conference of faculty, researchers and postgraduates (with international participation). – Minsk, 2025. – pp. 121–124.
2. Theoretical substantiation of traction-coupling properties of a tracked propulsion system of a forest vehicle for permafrost conditions / V.M. Dyachenko, I.S. Dolzhikov, E.G. Khitrov // Resources and Technology. – 2025. – Vol. 22, № 1. – pp. 1–41.
3. Finite difference scheme for calculating the deflection of a road mat under the influence of a forest vehicle propulsor / M.V. Zorin, E.G. Khitrov, O.A. Kunitskaya // Lesnoy vestnik. Forestry Bulletin. – 2025. – Vol. 29, № 1. – pp. 96–111.
4. Determination of precipitation during the movement of a logging machine on a two-layer base / A.I. Nikiforova, E.G. Khitrov, A.A. Pelymsky, O.I. Grigoreva // Scientific notes of Petrozavodsk State University. – 2014. – № 2 (139). – pp. 87–91.
5. Nikiforova A.I., Grigoreva O.I. Modeling of the impact of forest machinery propellers on the soils of logging areas // Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice. – 2015. – Vol. 3, № 5–4 (16–4). – pp. 320–323.
6. Influence of variable coefficients of resistance to movement and coupling on forwarder performance / O.N. Burmistrova, A.A. Prosuzhikh, E.G. Khitrov [et al.] // The woodworking industry. – 2021. – № 1. – pp. 3–16.
7. Grigorev I.V., Grigoreva O.I. The main directions of ensuring the environmental safety of logging production // Current directions of scientific research of the XXI century: theory and practice. – 2015. – Vol. 3. – № 2–1 (13–1). – pp. 202–205.
8. Grigorev I.V., Grigoreva O.I. Improving the environmental efficiency of forestry production // Current directions of