

Моделирование процесса образования колеи в массиве оттаивающего почвогрунта на склонах при динамическом взаимодействии с колесной лесной машиной

В.А. Каляшов^{1а}, В.Я. Шапиро^{2б}, И.В. Григорьев^{3с}, О.А. Куницкая^{3д}, О.И. Григорьева^{2е}

¹ Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, ул. 2-я Красноармейская, 4, Санкт-Петербург, Россия

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

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

^а vit832@yandex.ru, ^б shapiro54vlad@mail.ru, ^с silver73@inbox.ru, ^д ola.ola07@mail.ru, ^е grigoreva_o@list.ru

^а <https://orcid.org/0000-0002-8145-7058>, ^б <https://orcid.org/0000-0002-6344-1239>, ^с <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>,

^д <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>, ^е <https://orcid.org/0000-0001-5937-0813>

Статья поступила 26.01.2022, принята 07.02.2022

В Российской Федерации значительная часть территории лесного фонда расположена на вечной мерзлоте. К таким территориям относятся республики Саха (Якутия) и Коми, Магаданская и Мурманская области, Ямало-Ненецкий и Чукотский автономные округа, значительные территории Сибири и Дальнего Востока. Многие перечисленные регионы обладают большими запасами спелых и перестойных эксплуатационных лесов, причем значительная их часть расположена в труднодоступных местах с точки зрения не только слабо развитой дорожной сети, но и рельефа местности. В настоящее время основной объем заготовок древесины в России производится при помощи современных машинных комплексов, в основном включающих колесные лесные машины различной компоновки и назначения (харвестеры, форвардеры, скиддеры и т. д.). При помощи специальных технических решений, таких как интегрированные в трансмиссию лебедки или самоходные лебедки (T-winch, ROB), эти машины с успехом могут эксплуатироваться и на достаточно крутых склонах. При этом проблема негативного воздействия колесных лесных машин и трелевочных систем на их базе не только остается актуальной, но и приобретает еще большую остроту, поскольку экосистемы горных лесов, лесов на склонах сопок и т. д. относятся к наиболее ранимым, подверженным водной и ветровой эрозии. В статье представлена разработанная математическая модель, которая позволяет осуществлять надежный прогноз глубины образованной колеи при динамическом взаимодействии колесной лесной машины (трелевочной системы) с почвогрунтом поверхности движения на лесосеке.

Ключевые слова: леса на склонах; лесозаготовка; лесные машины; трелевочные системы; уплотнение почвогрунта; деформация почвогрунта.

Simulation of rut formation in thawing soil on slopes during dynamic interaction with a wheeled forestry machine

V.A. Kalyashov^{1а}, V.Ya. Shapiro^{2б}, I.V. Grigorjev^{3с}, O.A. Kunitskaya^{3д}, O.I. Grigorjeva^{2е}

¹ St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering; 4, 2nd Krasnoarmeyskaya St., St. Petersburg, Russia

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

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

^а vit832@yandex.ru, ^б shapiro54vlad@mail.ru, ^с silver73@inbox.ru, ^д ola.ola07@mail.ru, ^е grigoreva_o@list.ru

^а <https://orcid.org/0000-0002-8145-7058>, ^б <https://orcid.org/0000-0002-6344-1239>, ^с <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>,

^д <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>, ^е <https://orcid.org/0000-0001-5937-0813>

Received 26.01.2022, accepted 07.02.2022

In the Russian Federation, a significant part of the forest fund is located on permafrost. The territories include Sakha Republic (Yakutia), Komi Republic, Magadan Region, Yamalo-Nenets Autonomous District, Chukotka Autonomous District, Murmansk Region, large areas of Siberia and the Far East. Many listed regions have large reserves of mature and overmature commercial forests, and the most part of these reserves is located in places difficult to access, not only in relation to the development of road networks, but also on the relief of the area. At present the overwhelming majority of timber harvesting in Russia is performed by means of modern machinery complexes, which mainly include wheeled forestry machines of different layout and purpose (harvesters, forwarders, skidders, etc.). With the help of special technical solutions, such as winches integrated into the transmission, or self-propelled winches (T-winch, ROB), these machines can be successfully operated even on fairly steep slopes. The problem of negative effect of wheeled forest machines and

skidding systems based on them is not only still actual, but also becomes even more urgent, as the ecosystems of mountain forests, forests on the slopes of hills, etc. are the most vulnerable and exposed to water and wind erosion. The article presents a developed mathematical model, which allows a reliable prediction of the depth of the formed rut during dynamic interaction of a wheeled forest machine (skidder system) with the soil of the driving surface on the logging site. The work was performed within the framework of the scientific school "Innovative developments in the field of logging industry and forestry" of the Arctic State Agrotechnological and Logistic University. The research was carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation No. 22-26-00009, <https://rscf.ru/project/22-26-00009/>.

Keywords: forests on slopes, logging, forestry machines, skidding systems, soil compaction, soil deformation.

Введение. Вопросы повышения эффективности проведения лесосечных работ на склонах гор и сопок с соблюдением баланса экономического эффекта и сохранением экосистемы этих лесов, обеспечения оптимальных условий для последующего восстановления являются актуальными в настоящее время, особенно для регионов Сибири и Дальнего Востока [1–5]. В этих регионах значительная часть запасов спелых и перестойных эксплуатационных лесов произрастает на вечной мерзлоте, что вносит свою существенную специфику в процесс лесосечных работ, транспорта леса и лесовосстановления [6–10].

Лесосечные работы на склонах различной конфигурации при существенных (более 20°) углах наклона α их поверхности к условной линии горизонта характеризуются особыми геотехническими условиями взаимодействия колесных лесных машин, или трелевочных систем на их базе, с краевой частью массива почвогрунта.

Математические модели однократного и циклического действия статической нагрузки колесной лесной машины (трелевочной системы) на участок волока разработаны и реализованы в работах [11–13; 20; 21], в которых установлены закономерности развития процесса разрушения почвогрунта и получены основные соотношения для определения глубины колеи. Отметим, что процессы разрушения почвогрунтов и колееобразования под воздействием движителей лесных машин являются одними из основных критериев оценки экологичности выполнения лесосечных работ в целом [24–27].

Аналогичные задачи применительно к условиям работ на мерзлых и оттаивающих грунтах подробно рассмотрены в [14; 15].

Динамические процессы взаимодействия на равнинных участках исследованы в работах [16; 22; 23], а статические при лесозаготовках на склонах — в [17].

В основу настоящих исследований положена динамическая модель [16], в которой детально изучены особенности колебательных процессов движения колесной лесной машины (трелевочной системы) с тремя степенями свободы: вертикальными, продольно-угловыми и поперечно-угловыми перемещениями кузова. В итоге определены факторы и критерии усиления воздействия колесной лесной машины (трелевочной системы) на почвогрунт.

Основываясь на полученных результатах, рассмотрим задачу динамического взаимодействия колесной лесной машины (трелевочной системы) с почвогрунтом при лесосечных работах на склонах.

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

Результаты исследования. На рис. 1 представлена схема двухосной колесной лесной машины (трелевочной системы), которая оказывает динамическое воздействие на массив оттаивающего почвогрунта на склоне.

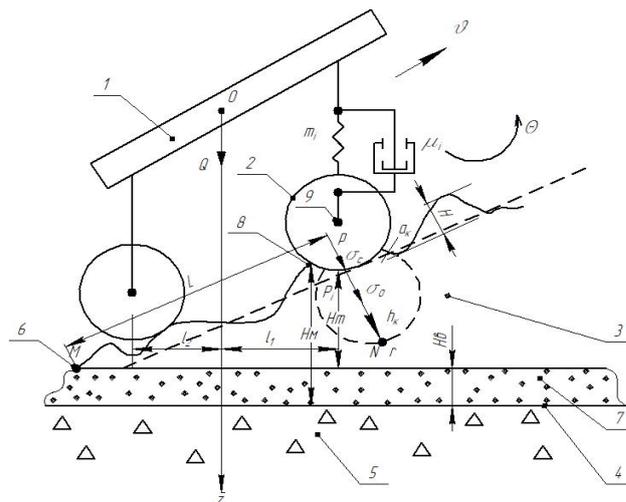


Рис. 1. Схема динамической двухосной колесной лесной машины (трелевочной системы) при определении глубины колеи

Колесная лесная машина (трелевочная система) 1 весом Q с центром тяжести в точке O оказывает усилие в направлении оси z , формируя в процессе своего движения динамическую нагрузку σ_0 , которая через шины 2 колесной пары в точке P передается массиву оттаивающего почвогрунта 3, мощность слоя которого равна H_t .

Место P приложения нагрузки отстоит от границы 4 с мерзлым почвогрунтом 5 на расстоянии H_m , а от подошвы 6 склона в точке M — на расстоянии L . Поскольку мерзлый почвогрунт 5 является водонепроницаемым, в непосредственной близости от его границы 4 формируется слой воды 7 мощностью H_b .

Модель статического взаимодействия на склоне подробно рассмотрена в работе [18], в которой показано влияние влажности грунта W вблизи с водонепроницаемой границей 4 с зоной мерзлоты 5 на характеристики прочности массива — величины сцепления C и угла внутреннего трения ϕ , а также модуля общей деформации E .

Исследования [19] показали, что минимальная влажность почвогрунта (на верхних участках склона) после оттока влаги будет стремиться к нижнему пределу пластичности или величине на границе раскатывания (W_p), тогда как максимальная влажность на нижних участках склона будет стремиться к верхнему пределу пластичности или величине на границе текучести (W_T).

В этой связи в [18] введен коэффициент относительной влажности $K_w = \frac{W}{W_r}$ для более объективной оценки параметров C и φ , которые определяют паспорт прочности почвогрунта при построении кругов Мора, и модуля общей деформации E , который определяет его упругие и деформационные свойства.

В табл. 1 представлены характеристики упругости и прочности почвогрунта в зависимости от показателя относительной влажности K_w .

Таблица 1. Зависимость физико-механических свойств почвогрунта от величины его относительной влажности

K_w	C , кПа	E , МПа	φ°
0,5	45	108	32
0,6	30	75	24
0,7	19	41	18
0,8	11	29	13
0,9	6	24	10

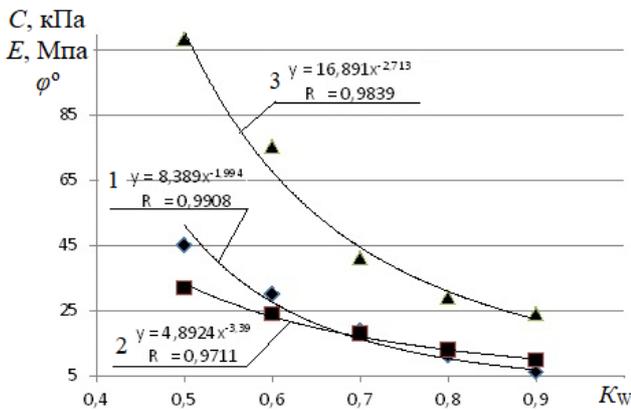


Рис. 2. Влияние роста влажности почвогрунта на снижение показателей его упругих и прочностных свойств: 1 — C , кПа; 2 — φ° ; 3 — E , МПа

Для условий лесосечных работ на склонах это означает, что существуют такие диапазоны увеличения влажности почвогрунта на отдельных, особенно нижних участках волока, для которых будет отмечаться существенное снижение упругих, деформационных и прочностных свойства краевой части массива. Очевидно, что на этих участках следует ожидать более глубокую колею h_k , чем при работе на верхней части склона.

Так, как следует из анализа данных рис. 2, кратное снижение показателей свойств почвогрунта наблюдается по достижении и превышении K_w значений 0,7, что при величине предела текучести почвогрунта $W_T = 40\%$ соответствует уровню влажности W более 28%.

Под действием силы Q в точке P формируется контактная площадка радиусом a_k , на которой действует начальное динамическое давление σ_o , определяющее в глубине массива 3 радиальную (нормальную к плоскости склона) σ_r и тангенциальную σ_θ (ортогональную σ_r) компоненты тензора напряжений:

$$\sigma_r = \frac{\sigma_o}{(r/a)^n}; \sigma_\theta = \gamma \sigma_r, \gamma = \frac{\nu}{1-\nu}, \quad (1)$$

Обработка данных табл. 1 проиллюстрирована рис. 2, где приведены линии: 1 — величины сцепления C , 2 — угла внутреннего трения φ и 3 — модуля общей деформации E .

Для всех трех параметров использована единая ось ординат, масштаб которой соответствует единицам измерения показателей табл. 1, а по оси абсцисс отложены значения коэффициента K_w .

Графики степенных функций содержат как ниспадающие, так и асимптотические участки кривых, что наблюдается на графиках рис. 2.

где $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ — радиальная координата, γ — коэффициент бокового распора, ν — коэффициент Пуассона, $n = k - \frac{\nu}{2}$ — коэффициент затухания напряжений, зависящий от формы поверхности силового контакта (штампа) с краевой частью массива почвогрунта.

Для штампа сферической формы $k=3$, цилиндрической — 2, для плоского штампа — 1. В выполненных расчетах принято $n=2$.

Величина a_k в соответствии с [18] определяется соотношением:

$$a_k = \sqrt[3]{\frac{3Q \cdot \cos \alpha (1 - \nu^2) \cdot R}{4E}}, \quad (2)$$

где R — радиус колеса, м.

Тогда главное касательное напряжение (напряжение сдвига) σ_s в главных осях полярно-цилиндрической системы координат z, r, θ , привязанной к точке P , равно

$$\sigma_s = 0,5(\sigma_r - \sigma_\theta) \cdot (1 + \sin 2\theta), \quad (3)$$

и при его сравнении с величиной предела прочности на сдвиг

$$\tau = C + \sigma_o \cdot \operatorname{tg} \varphi,$$

формируется условие для выполнения критерия разрушения в точке N на границе с колеей.

Выполнив необходимые преобразования, в итоге получим соотношение для определения глубины колеи h_k вследствие разрушающей динамической нагрузки колесной лесной машины (трелевочной системы):

$$h_k = a_k \left\{ \sigma_o \frac{(1-\gamma)(1+\sin 2\theta) - 2\operatorname{tg} \varphi}{2C} \right\}^{1/n}. \quad (4)$$

Величина динамической нагрузки σ_o связана со статическим давлением в шинах σ_c коэффициентом динамического усиления K_d , который зависит от целого ряда факторов взаимодействия колесной лесной машины (трелевочной системы) с массивом почвогрунта.

В табл. 2 приведены характеристики некоторых колесных лесных машин (трелевочных систем) и показатели давления σ_c в шинах колесных пар.

Перейдем к определению коэффициента динамичности K_d при воздействии колесной лесной машины (трелевочной системы) на почвогрунт.

Колесную лесную машину (трелевочную систему) будем рассматривать с симметричной подвеской, при-

чем все жесткости и вязкости имеют линейные характеристики с коэффициентами жесткости m_i и коэффициентами сопротивления шин μ_i , где индекс $i = 1, 2$.

Таблица 2. Характеристики колесных лесных машин (трелевочных систем) и давление шин на почвогрунт

Трелевочная система	Вес Q , m	σ_c , $кПа$	
		Штамп 1/число колесных пар	Штамп 2/ число колесных пар
I. 4-колесная	≤ 15	68 / 1	80 / 1
II. 6-колесная	16	72 / 1	40+40; 27 / 3
III. 8-колесная	19	35 / 2	56 / 2
IV. 10-колесная	≥ 20	35 / 2	37 / 3

При наезде на микронеровность профиля поверхности движения 8 колеса 2 движителя переместятся на величины p_i , а центр тяжести — на величину z . Перемещения во времени t , равные $p_i = f(t - \tau_i)$, являются случайными функциями воздействия от профиля поверхности движения к движителю, причем время запаздывания τ_i определяется как:

$$\tau_i = \frac{l_1 - l_i}{v}, \tag{5}$$

где l_1 — расстояние от линии центра тяжести динамической системы до линии оси 9 передней пары колес 2 (параметр базы системы); l_i — то же расстояние до оси в общем случае i -го колеса; v — скорость движения.

При рассмотрении задач взаимодействия и оценки уплотнения почвогрунта под действием динамических нагрузок необходимо определить частотные характеристики колебательного процесса, а именно скорости колебаний $\dot{z}(t)$, поскольку с квадратом этой величины связаны как кинетическая энергия динамического воздействия, так и возникающие напряжения динамического удара движителя по почвогрунту [16].

Изображение скорости линейных вертикальных колебаний представляет собой произведение передаточной функции скорости $W(s)$ на изображение $F(s)$ функции воздействия $f(t)$. Для симметричной подрессоренной системы передаточная функция равна:

$$W_z(s) = \frac{c}{m_p} \frac{\sum_{i=1}^{2n} (\mu_i s + m_i)}{s^2 + a_1 s + a_2}, \tag{6}$$

где $c = \sum_{i=1}^{2n} e^{-\tau_i s}$; m_p — подрессоренная масса системы, которая в расчетах принята равной весу Q ; $a_1 = \frac{1}{m_p} \sum_{i=1}^{2n} \mu_i$; $a_2 = \frac{1}{m_p} \sum_{i=1}^{2n} m_i$.

Пусть профиль поверхности движения представляет собой внешнее синусоидальное воздействие, описанное в виде:

$$f(t) = H \sin \omega_1 t, \tag{7}$$

где H — максимальная амплитуда отклонения профиля поверхности движения от условной горизонтальной плоскости, проведенной через самую низкую точку

профиля; ω_1 — частота внешнего воздействия (вынужденных колебаний) профиля поверхности движения.

Тогда изображение этого воздействия определяется как:

$$F(s) = H \frac{\omega_1}{s^2 + \omega_1^2}. \tag{8}$$

В конечном итоге, с учетом выражений (1)–(4), получено соотношение для определения $\dot{z}(s)$:

$$\dot{z}(s) = \frac{cH}{m_p} \frac{\omega_1 \sum_{i=1}^{2n} (\mu_i s + m_i)}{s^2 + \omega_1^2 s^2 + a_1 s + a_2}. \tag{9}$$

Для перехода от передаточной функции к частотной характеристике достаточно принять $s = i\omega$. Вещественная часть комплексного выражения (5) будет являться действительной амплитудно-частотной характеристикой скорости вертикальных колебаний, которую обозначим как $A_z(i\omega)$:

$$A_z(i\omega) = \frac{H\omega_1}{m_p} \sqrt{\frac{K_\omega^2 + C_\omega^2}{M_\omega^2 + N_\omega^2}}, \tag{10}$$

где K_ω , C_ω , M_ω и N_ω — коэффициенты, определяемые из следующих соотношений:

$$\begin{aligned} K_\omega &= \sum_{i=1}^{2n} [\omega m_i \sin(\tau_i \omega) - \mu_i \omega^2 \cos(\tau_i \omega)]; \\ C_\omega &= \sum_{i=1}^{2n} [\omega m_i \cos(\tau_i \omega) - \mu_i \omega^2 \sin(\tau_i \omega)]; \\ M_\omega &= (\omega_1^2 - \omega^2)(a_2 - \omega^2); \\ N_\omega &= (\omega_1^2 - \omega^2)a_1 \omega. \end{aligned} \tag{11}$$

Отношение величины $A_z(i\omega)$ к H , которое приводит к введению параметра \bar{A}_z , в статистической динамике сельскохозяйственных машин именуют коэффициентом демпфирования. Введенный коэффициент демпфирования обуславливает оптимальный подбор собственных колебаний системы по отношению к вынужденным колебаниям и позволяеткратно уменьшить ампли-

туду скорости, что приводит к снижению силового динамического воздействия на почвогрунт.

На этом основании величину $K_\omega = (1 + \bar{A}_z \cdot \cos\alpha)^2$ обоснованно можно считать коэффициентом динамического усиления скорости амплитудных колебаний системы.

Расчеты с применением соотношений (5)-(11) показывают, что при значениях безразмерного частотного параметра $\frac{\omega}{\omega_1} \leq 0,8$ коэффициент K_ω близок к значениям 1-1,05, т.е. динамическим усилением можно пренебречь.

Однако при отношении частот $\frac{\omega}{\omega_1} > 0,8$ и, особенно в предельном состоянии $\frac{\omega}{\omega_1} \rightarrow 1$, динамическое усиление весьма значительное, подчиняется экспоненциальному закону, а коэффициент динамического усиления возрастает кратно в 2-3 и более раз

Эти выводы сделаны при следующих исходных (базовых) данных системы взаимодействия:

- а) $\vartheta = 10 \text{ км/ч} = 2,78 \text{ м/с}$, $l_1 = 1,85 \text{ м}$, $l_2 = -l_1 = -1,85 \text{ м}$, $\omega_1 = \pi = 3,14$; $H = 0,2 \text{ м}$;
- б) $m_1 = m_2 = 100 \cdot 10^{-3} \text{ кН/м}$, $\mu_1 = \mu_2 = 2 \cdot 10^{-2} \text{ кНс/м}$;
- в) $Q = 20 \text{ 670 кг}$, $R = 0,45 \text{ м}$, $\sigma_c = 35 \text{ кПа}$;
- г) $\alpha = 15^\circ$, $W_T = 40 \%$, $L = 5 \text{ м}$, $H_b = 0,5 \text{ м}$, $H_T = 10 \text{ м}$.

Параметрам последнего пункта (12 г) соответствуют следующие показатели физико-механических свойств почвогрунта:

$$K_w = 0,75, W = 30 \%, E = 37,44 \text{ МПа}, \\ C = 15,05 \text{ кПа}, \varphi = 13,22^\circ$$

Отметим, что жесткость рессоры в выполненных расчетах изменялась в диапазоне от 100 до $400 \cdot 10^{-3} \text{ кН/м}$, а коэффициент сопротивления шин μ от 1 до $5 \cdot 10^{-2} \text{ кНс/м}$.

При расчетах была зафиксирована угловая координата $\theta = \text{const} = 10^\circ$, тем самым влияние маневрирования системы на процесс образования колеи на различных участках волока при движении по склону в данной работе не рассматривалось.

Динамические нагрузки, передаваемые от шин к почвогрунту, должны учитывать соотношение акустических жесткостей λ_i материалов взаимодействия, равных произведению их плотностей на скорости продольных волн.

Из этого следует, что величину K_ω необходимо умножить на коэффициент акустического преломления $K_\lambda = \frac{2}{1 + \frac{\lambda_1}{\lambda_2}}$, где: λ_1 – акустическая жесткость материала шины, равная, в частности, $\lambda_1 = 1,2 \cdot 1800 = 2160 \text{ т/м}^2 \cdot \text{с}$; λ_2 – акустическая жесткость почвогрунта, которая, например, для ряда почвогрунтов равна $\lambda_2 = 1,5 \cdot 1100 = 1650 \text{ т/м}^2 \cdot \text{с}$. Для данного примера имеем $K_\lambda = 0,87$, т.е. динамические усилия, передаваемые от шин в почвогрунт снижаются на 15-20% в том случае, когда коэффициент $K_\lambda < 1$. По мере роста несущей способности почвогрунта и его акустической жесткости параметр K_λ растет, достигая 1, а для крепких почвогрунтов и пре-

вышая ее. В этом случае происходит усиление динамического воздействия колесной лесной машины (трелевочной системы) на почвогрунт.

Объединяя оба критерия, введем интегральный коэффициент динамичности системы $K_d = K_\omega K_\lambda$, который учитывает как колебательный процесс так и эффект акустического преломления:

$$K_d = K_\omega K_\lambda = (1 + \bar{A}_z \cdot \cos\alpha)^2 \cdot \frac{2}{1 + \frac{\lambda_1}{\lambda_2}} \quad (13)$$

Умножение установленного в (13) коэффициента K_d на показатели давления в шинах (таблица 2) обеспечивает достоверную оценку динамической нагрузки σ_0 , которая входит в соотношение (4) для определения глубины колеи h_k .

Таким образом, при оценке глубины колеи обеспечивается учет колебательного процесса при движении колесной лесной машины (трелевочной системы) с определенным весом и давлением в шинах, с заданной скоростью, соотношением акустических жесткостей материалов взаимодействия, параметрами склона и состоянием массива оттаивающего почвогрунта на отдельных его участках.

Результаты моделирования процесса образования колеи представлены ниже графически на рис. 3–8, где на осях ординат (в случае одномерных функций) или оси аппликат (двумерная функция на рис. 4) отложены значения параметра h_k , м.

На рисунке 3 а и 3 б отражено влияние соответственно относительной частоты $\frac{\omega}{\omega_1}$ (ось абсцисс) и амплитуды H (ось абсцисс, м) на глубину колеи h_k .

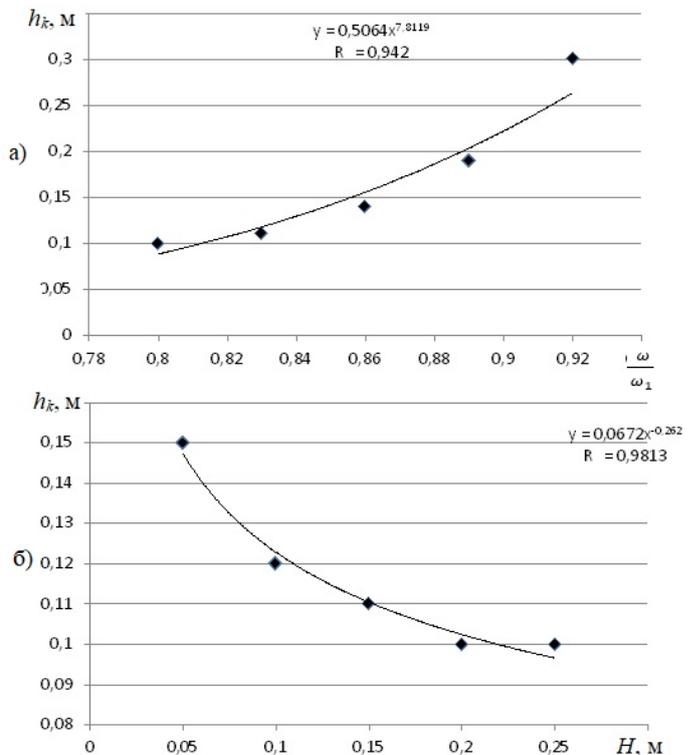


Рис. 3. Влияние характеристик профиля поверхности движения на глубину колеи

Как видим, влияние характеристик профиля поверхности движения разнонаправленное, причем наиболее сильная зависимость — от изменения частотных характеристик: по мере приближения к области резонансного совпадения собственных и вынужденных колебаний глубина колеи возрастает кратно.

О таком сильном влиянии параметра H говорить не приходится: при 5-кратном его увеличении с 0,05 до 0,25 м глубина h_k снижается в 1,5 раза, с 0,15 до 0,1 м.

Уместно отметить, что на экспертном уровне принято, что наиболее эффективная эксплуатация колесных лесных машин (трелевочных систем на их базе) обеспечивается при глубине колеи h_k , не превышающей значение 0,1 м. Будем считать эту величину глубины нормативным значением.

Однако выдержать такой норматив при работах в сложных сезонно-климатических условиях на склонах оттаивающих почвогрунтах не представляется возможным, в связи с чем рациональным диапазоном глубины колеи будем считать $h_k = 0,1-0,15$ м (коэффициент вариации не более 50 %).

Совместное влияние характеристик профиля поверхности движения представлено на рис. 4, где на оси абсцисс H , м, оси ординат $\frac{\omega}{\omega_1}$.

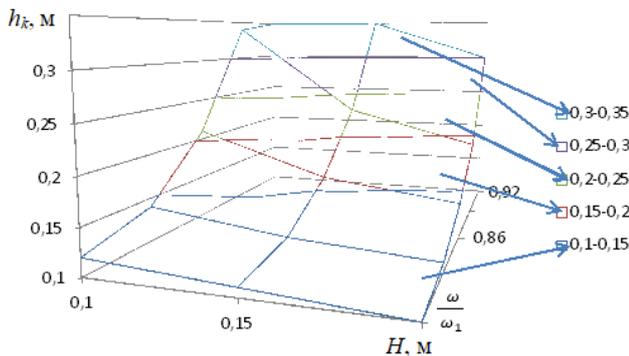


Рис. 4. Совместное влияние характеристик профиля поверхности движения на глубину колеи

Как видим, во всем многообразии сочетания характеристик профиля до 40 % их значений обеспечивают рациональный диапазон изменения параметра h_k от 0,1 до 0,15 м, что можно считать удовлетворительным результатом взаимодействия колесной лесной машины (трелевочной системы) с данным участком волока. При минимальных значениях H по мере приближения колебательного процесса системы к области резонанса глубина колеи существенно возрастает и может достигать значение 0,35 м и более.

На рис. 5 приведены результаты оценки влияния скорости движения колесной лесной машины (трелевочной системы) v (ось абсцисс, м/с) на параметр h_k .

С удовлетворительным значением коэффициента детерминации эта связь линейная и возрастающая. В указанном диапазоне изменения v глубина колеи выходит за пределы рациональных значений при $v > 11$ м/с, т. е. при достаточно больших скоростях. Можно сде-

лать вывод, что кинематические и амплитудные параметры движения колесной лесной машины (трелевочной системы) менее значимы по сравнению с колебательно-частотными характеристиками взаимодействия.

Исследуем (рис. 6) влияние параметра статического давления σ_c в шинах (ось абсцисс, кПа) на глубину колеи.

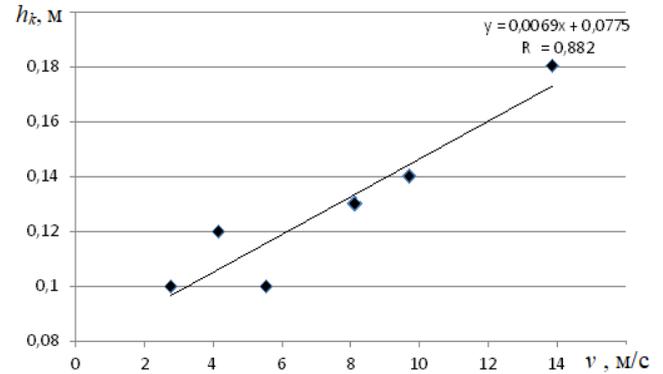


Рис. 5. Влияние скорости движения колесной лесной машины (трелевочной системы) на глубину колеи

Анализ данных рис. 6 показывает, что в достаточно узком диапазоне невысоких значений давления $\sigma_c = 27-42$ кПа удается выдерживать рациональную глубину колеи, однако при дальнейшем росте давления в шинах и увеличении динамического воздействия на почвогрунт глубина h_k растет по степенному закону с достаточно большим показателем степени, равным 1,77.

Особый интерес при решении задачи взаимодействия на склонах вызывает вопрос о влиянии местоположения (L) колесной пары на поверхности склона на глубину образованной колеи.

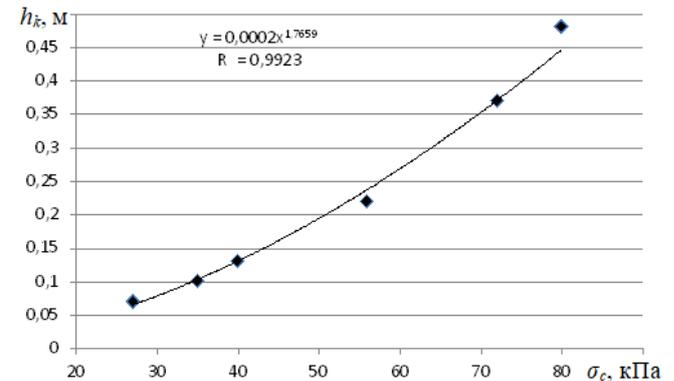


Рис. 6. Влияние давления в шинах на глубину колеи

При решении этой задачи (рис. 7) для двух состояний давления в шинах (линия 1 — $\sigma_c = 56$ кПа; линия 2 — $\sigma_c = 35$ кПа) получены зависимости h_k от L (ось абсцисс, м).

При низком давлении в шинах при любом расположении колесной лесной машины (трелевочной системы) глубина колеи не выходит за пределы рационального диапазона в 0,1–0,15 м, тогда как при более высоком давлении по мере приближения к подошве склона ближе, чем на 20 м, параметр h_k превышает 0,15 м.

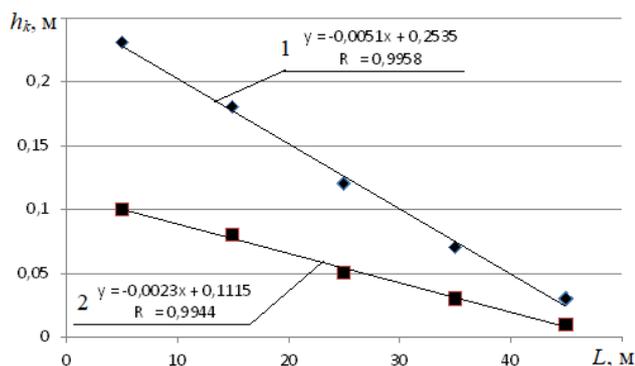


Рис. 7. Влияние местоположения колесной пары на глубину колеи: 1 — $\sigma_c = 56$ кПа; 2 — $\sigma_c = 35$ кПа

На завершающей стадии моделирования процесса взаимодействия приведем (рис. 8) график зависимости глубины колеи от угла α наклона поверхности склона (ось абсцисс, °) при давлении в шинах $\sigma_c = 35$ кПа (линия 1) и $\sigma_c = 56$ кПа (линия 2).

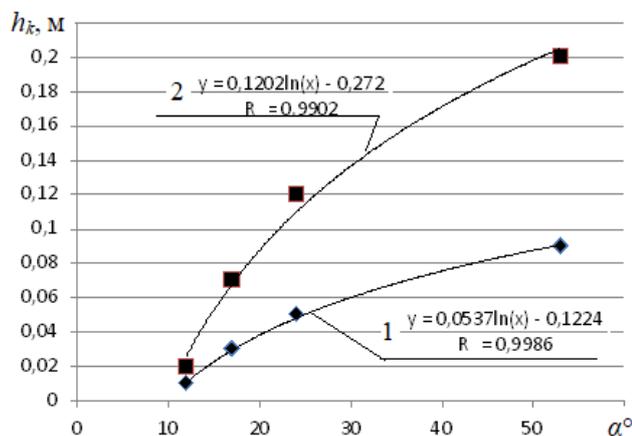


Рис. 8. Зависимость глубины колеи от угла наклона поверхности склона

Литература

1. Рябухин П.Б. Новые технологии лесозаготовок на горных лесосеках // Философия современного природопользования в бассейне реки Амур: материалы VI междунар. науч.-практической конф. (28 апр.-4 мая 2017 г.). Хабаровск, 2017. С. 14-18.
2. Рябухин П.Б., Рубанов С.Е. Новые технологии на горных лесозаготовках в ДФО // Философия современного природопользования в бассейне реки Амур: сб. докл. междунар. экологического семинара (4-11 мая 2014 г.). Хабаровск, 2014. С. 73-78.
3. Луценко Е.В., Кравец А.Д., Рябухин П.Б. Эффективные объемы лесозаготовительного производства в условиях горных лесных массивов Дальнего Востока // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2010. № 25. С. 160-162.
4. Рябухин П.Б., Абузов А.В. Горным лесоразработкам средосберегающее технологическое оборудование // Лесное хозяйство. 2008. № 6. С. 36-37.
5. Абузов А.В., Рябухин П.Б. Аэростатный транспорт для горных лесозаготовок в условиях Дальнего Востока: моногр. Хабаровск: Изд-во: Тихоокеанский гос. ун-т, 2013. 199 с.
6. Мохирев А.П. Обоснование мероприятий, повышающих доступность древесных ресурсов // Лесозаготовка и комплексное использование древесины: сб. ст. Всерос.

Как видим, при более низких значениях давления в шинах глубина колеи остается в нормативном диапазоне даже при работе на крутых склонах.

При более высоком давлении в шинах превышение нормативной глубины колеи $h_k = 0,1$ м наблюдаем при углах наклона $\alpha > 20^\circ$, тогда как верхняя граница рационального диапазона $h_k = 0,15$ м будет превышена только при эксплуатации колесных лесных машин (трелевочных систем) на достаточно крутых склонах с углом наклона $\alpha > 30^\circ$.

Таким образом, разработанная математическая модель позволяет осуществлять надежный прогноз глубины образованной колеи при динамическом взаимодействии колесной лесной машины (трелевочной системы) с почвогрунтом поверхности движения на лесосеке.

При этом учитывается ряд следующих факторов:

- геометрические параметры склона;
- особенности движения и закономерности колебательного процесса колесной лесной машины (трелевочной системы) с заданными значениями скорости и амортизационных характеристик элементов колесной пары;
- амплитудно-частотные параметры профиля поверхности движения и физико-механические свойства слагающих краевую часть массива почвогрунтов в границах волока;
- вес колесной лесной машины (трелевочной системы) и нормативные значения давления в шинах колесных пар;
- особенности процесса оттаивания на склоне краевой части массива почвогрунта на границе с зоной мерзлоты и их влияние на несущую способность волока при динамических нагрузках.

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

науч.-практической конф. (10 марта 2021 г.). Красноярск, 2021. С. 173-179.

7. Лышко А.С., Мохирев А.П., Медведев С.О. Перспективы транспортной инфраструктуры Арктики и Крайнего Севера // Современные машины, оборудование и IT-решения лесопромышленного комплекса: теория и практика: материалы Всерос. науч.-практической конф. (17 июня 2021 г.). Воронеж, 2021. С. 235-239.
8. Мохирев А.П., Брагина Н.А., Рукомойников К.П. Обработка статистических данных о климатических условиях северных лесопромышленных регионов // Лесной и химический комплексы - проблемы и решения: сб. материалов по итогам Всерос. науч.-практической конф. (18-19 сент. 200 г.). Красноярск, 2021. С. 37-41.
9. Лышко А.С., Медведев С.О., Мохирев А.П. Обоснование транспортно-логистических маршрутов на территории Арктики и Крайнего Севера Красноярского края // Инновации в химико-лесном комплексе: тенденции и перспективы развития: сб. материалов Всерос. науч.-практической конф. Красноярск, 2021. С. 79-82.
10. Медведев С.О., Лышко А.С., Мохирев А.П. Особенности транспортно-логистических маршрутов через территорию Арктики и Крайнего Севера Красноярского края // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2021. № 3-2 (54). С. 206-208.

11. Григорьев И.В., Макуев В.А., Шапиро В.Я., Рудов М.Е., Никифорова А.И. Расчет показателей процесса уплотнения почвогрунта при трелевке пачки хлыстов // Вестн. МГУЛ. Лесной вестн. 2013. № 2. С. 112-118.
12. Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Жукова А.И. Влияние сдвиговых деформаций на процесс циклического уплотнения почвы // Естественные и технические науки. 2006. № 1 (21). С. 174-180.
13. Шапиро В.Я., Григорьев И.В. Деформация и циклическое уплотнение почвогрунта между грунтозацепами крупногабаритных лесных шин // Техника и технология. 2006. № 2 (14). С. 94-100.
14. Рудов С.Е., Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Григорьева О.И. Особенности взаимодействия трелевочной системы с оттаивающим почвогрунтом // Лесной вестн. 2019. Т. 23. № 1. С. 52-61.
15. Рудов С.Е., Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Григорьева О.И. Оценка несущей способности мерзлого и оттаявшего грунта при неполной информации о состоянии его взаимодействия с трелевочной системой // Системы. Методы. Технологии. 2019. № 2 (42). С. 80-86.
16. Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Жукова А.И., Иванов В.А. Исследование механических процессов циклического уплотнения почвогрунта при динамических нагрузках // Вестн. КрасГАУ. 2008. № 1. С. 163-175.
17. Рудов С.Е., Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Григорьева О.И. Моделирование взаимодействия лесных машин с почвогрунтом при работе на склонах // Изв. высш. учеб. заведений. Лесной журнал. 2021. № 6 (384). С. 121-134.
18. Каляшов В.А., Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Григорьева О.И. Оценка работоспособности трелевочного волока на склоне массива, оттаивающего почвогрунта при циклических статических нагрузках // Resources and Technology. 2021. V. 18. № 2. P. 79-95.
19. Царапов М.Н. Формирование прочностных характеристик грунтов в процессе оттаивания // Вестн. Московского ун-та. Сер. 4: Геология. 2007. № 6. С. 31-34.
20. Jarkko L. Design Parameter Analysis of the Bogie Track Surface Pressure in Peatland Forest Operations. Master of Science Thesis. Tampere, Tampere University of Technology, 2018. 59 p.
21. Lepilin D., Laurén A., Uusitalo J., Tuittila E-S. Soil Deformation and Its Recovery in Logging Trails of Drained Boreal Peatlands // Canadian Journal of Forest Research. 2019. V. 49. № 7. P. 743-751.
22. Yao L., Wang Y., Zeng Z., Kan J. Vibration Analysis and Optimization of a Vertical Disc Stump Grinder // Advances in Mechanical Engineering. 2018. V. 10, iss. 2. P. 1-10.
23. Ding L., Yang H., Gao H., Li N., Deng Z., Guo J., Li N. Teramechanics Based Modeling of Sinkage and Moment for in-situ Steering Wheels of Mobile Robots on Deformable Terrain // Mechanism and Machine Theory. 2017. V. 116. P. 14-33.
24. Хитров Е.Г., Котенев Е.В., Андронов А.В., Чжан С.А., Никифорова В.А. Исследование экологичности и вопросы сертификации движителей лесных машин // Системы. Методы. Технологии. 2020. № 2 (46). С. 100-105.
25. Хитров Е.Г., Песков В.Б., Казаков Д.П., Божбов В.Е., Степанищева М.В. Метод решения задачи о вдавлении штампа-двигателя в неоднородный массив грунта // Системы. Методы. Технологии. 2018. № 2 (38). С. 116-120.
26. Рудов С.Е., Хитров Е.Г., Рудов М.Е., Устинов В.В. Расчет тяговых и сцепных свойств колесного скиддера с использованием данных зарубежных коллег // Актуальные направления науч. исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3. № 1 (12). С. 223-228.
27. Хитров Е.Г., Бартенев И.М. Расчет глубины колеи колесного движителя лесных тракторов на склонах // Лесотехнический журнал. 2016. Т. 6. № 4 (24). С. 233-239.

References

1. Ryabuhin P.B. New logging technologies in the mountain logging areas // Filosofiya sovremennogo prirodopol'zovaniya v bassejne reki Amur: materialy VI mezhdunar. nauch.-prakticheskoy konf. (28 apr.-4 maya 2017 g.). Habarovsk, 2017. P. 14-18.
2. Ryabuhin P.B., Rubanov S.E. New technologies in mountain logging in the Far Eastern Federal District // Filosofiya sovremennogo prirodopol'zovaniya v bassejne reki Amur: sb. dokl. mezhdunar. ekologicheskogo seminara (4-11 maya 2014 g.). Habarovsk, 2014. P. 73-78.
3. Lucenko E.V., Kravec A.D., Ryabuhin P.B. Effective volumes of logging production in the mountainous forests of the Far East // Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa. 2010. № 25. P. 160-162.
4. Ryabuhin P.B., Abuzov A.V. To the mountain forest-processing works the medium-saving technological equipment // Lesnoe hozyajstvo. 2008. № 6. P. 36-37.
5. Abuzov A.V., Ryabuhin P.B. Aerostat transport for mountain logging in conditions of the Far East: monogr. Habarovsk: Izd-vo: Tihookeanskij gos. un-t, 2013. 199 p.
6. Mohirev A.P. Rationale for measures that increase the availability of wood resources // Lesoeksploatatsiya i kompleksnoe ispol'zovanie drevesiny: sb. st. Vseros. nauch.-prakticheskoy konf. (10 marta 2021 g.). Krasnoyarsk, 2021. P. 173-179.
7. Lyshko A.S., Mohirev A.P., Medvedev S.O. Prospects of transport infrastructure in the Arctic and the Far North // Sovremennye mashiny, oborudovanie i IT-resheniya lesopromyshlennogo kompleksa: teoriya i praktika: materialy Vseros. nauch.-prakticheskoy konf. (17 iyunya 2021 g.). Voronezh, 2021. P. 235-239.
8. Mohirev A.P., Bragina N.A., Rukomojnikov K.P. Processing of statistical data on climatic conditions of northern timber regions // Lesnoj i himicheskij komplekсы - problemy i resheniya: sb. materialov po itogam Vseros. nauch.-prakticheskoy konf. (18-19 sent. 200 g.). Krasnoyarsk, 2021. P. 37-41.
9. Lyshko A.S., Medvedev S.O., Mohirev A.P. Justification of transport-logistic routes in the Arctic and the Far North of Krasnoyarsk Region // Innovacii v himiko-lesnom komplekse: tendencii i perspektivy razvitiya: sb. materialov Vseros. nauch.-prakticheskoy konf. Krasnoyarsk, 2021. P. 79-82.
10. Medvedev S.O., Lyshko A.S., Mohirev A.P. Features of transport and logistics routes through the Arctic and the far north of the Krasnoyarsk region // International journal of humanities and natural sciences. 2021. № 3-2 (54). P. 206-208.
11. Grigor'ev I.V., Makuev V.A., SHapiro V.YA., Rudov M.E., Nikiforova A.I. Calculation of indicators of compaction of soil during skidding a pack of logs // Moscow state forest university bulletin - Lesnoy vestnik. 2013. № 2. P. 112-118.
12. SHapiro V.YA., Grigor'ev I.V., ZHukova A.I. Influence of shear deformations on soil compaction // Natural and technical sciences. 2006. № 1 (21). P. 174-180.
13. SHapiro V.YA., Grigor'ev I.V. Deformation and cyclic compaction of soil between grousers of large-sized forest tires // Tekhnika i tekhnologiya. 2006. № 2 (14). P. 94-100.
14. Rudov S.E., SHapiro V.YA., Grigor'ev I.V., Kunickaya O.A., Grigor'eva O.I. Features of interaction of skidding system with thawing soil // Forestry Bulletin. 2019. V. 23. № 1. P. 52-61.
15. Rudov S.E., SHapiro V.YA., Grigor'ev I.V., Kunickaya O.A., Grigor'eva O.I. Assessment of carrying capacity of frozen and thawed soil with incomplete information about the state of its interaction with the skidding system // Systems. Methods.

- Technologies. 2019. № 2 (42). P. 80-86.
16. SHapiro V.YA., Grigor'ev I.V., ZHukova A.I., Ivanov V.A. Research of mechanical processes of cyclic compaction of soil under dynamic loads // The Bulletin of KrasGAU. 2008. № 1. P. 163-175.
 17. Rudov S.E., SHapiro V.YA., Grigor'ev I.V., Kunickaya O.A., Grigor'eva O.I. Modeling of interaction of forest machines with the soil when working on slopes // Bulletin of higher educational institutions. Lesnoy zhurnal (Forestry journal). 2021. № 6 (384). P. 121-134.
 18. Kalyashov V.A., SHapiro V.YA., Grigor'ev I.V., Kunickaya O.A., Grigor'eva O.I. Assessment of skid steer performance on the slope of thawing soil massif under cyclic static loads // Resources and Technology. 2021. V. 18. № 2. P. 79-95.
 19. Carapov M.N. Formation of Strength Characteristics of Soils during Thawing // Moscow University Bulletin. Series 4. Geology. 2007. № 6. P. 31-34.
 20. Jarkko L. Design Parameter Analysis of the Bogie Track Surface Pressure in Peatland Forest Operations. Master of Science Thesis. Tampere, Tampere University of Technology, 2018. 59 p.
 21. Lepilin D., Laurén A., Uusitalo J., Tuittila E-S. Soil Deformation and Its Recovery in Logging Trails of Drained Boreal Peatlands // Canadian Journal of Forest Research. 2019. V. 49. № 7. P. 743-751.
 22. Yao L., Wang Y., Zeng Z., Kan J. Vibration Analysis and Optimization of a Vertical Disc Stump Grinder // Advances in Mechanical Engineering. 2018. V. 10, iss. 2. P. 1-10.
 23. Ding L., Yang H., Gao H., Li N., Deng Z., Guo J., Li N. Teramechanics Based Modeling of Sinkage and Moment for in-situ Steering Wheels of Mobile Robots on Deformable Terrain // Mechanism and Machine Theory. 2017. V. 116. P. 14-33.
 24. Hitrov E.G., Kotenev E.V., Andronov A.V., CHzhan S.A., Nikiforova V.A. Study of environmental friendliness and certification issues of forest machine engines // Systems. Methods. Technologies. 2020. № 2 (46). P. 100-105.
 25. Hitrov E.G., Peskov V.B., Kazakov D.P., Bozhbov V.E., Stepanishcheva M.V. Method for solving the problem of indentation of a die-driver in a heterogeneous array of soil // Systems. Methods. Technologies. 2018. № 2 (38). P. 116-120.
 26. Rudov S.E., Hitrov E.G., Rudov M.E., Ustinov V.V. Calculation of traction and traction properties of a wheeled skidder using the data of foreign colleagues // Aktual'nye napravleniya nauch. issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika. 2015. V. 3. № 1 (12). P. 223-228.
 27. Hitrov E.G., Bartenev I.M. Calculation of rut depth of forest tractor wheel propeller on slopes // Forestry Engineering Journal. 2016. V. 6. № 4 (24). P. 233-239.