

Особенности деформирования почвогрунта в колее волока при взаимодействии колёсной лесной машины с препятствиями

В.Я. Шапиро^{1а}, И.В. Григорьев^{2б}, Е.В. Сибиряткин^{3с}, Е.А. Тихонов^{4д}, Т.Н. Стородубцева^{3е}, С.И. Ревяко^{5ф}

¹ Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова, г. Санкт-Петербург, Институтский переулок, 3, Россия

² Арктический государственный агротехнологический университет, ш. Сергеляхское, 3 км, 3, Якутск, Россия

³ Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, Россия, г. Воронеж, ул. Тимирязева, д. 8

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

⁵ Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт им. А.К. Кортунова – филиал ФГБОУ ВО «Донской государственный аграрный университет», г. Новочеркасск, ул. Пушкинская, 111, Россия

^а shapiro54vlad@mail.ru, ^б silver73@inbox.ru, ^с jey-sib@mail.ru, ^д tihonov@petrsu.ru, ^е tamara-tns@yandex.ru,

^ф revyako77@mail.ru

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

^с <https://orcid.org/0009-0007-0475-612X>, ^д <https://orcid.org/0000-0003-2136-3268>,

^е <https://orcid.org/0000-0002-4925-8542>, ^ф <https://orcid.org/0000-0001-7362-5042>

Статья поступила 07.04.2026, принята 23.03.2026

Натурные наблюдения за работой колёсных форвардеров и результаты обследования трелёвочных волоков показали, что в местах наезда на пни и съезда с них колёс форвардера, при работе в тёплое время года образуются значительные углубления, вызванные дополнительной ударной нагрузкой движителя на почвогрунт. Более крупные впадины после пней в направлении грузового хода форвардеров убедительно свидетельствуют о том, что чем тяжелее колёсная лесная машина, и, соответственно, больше дополнительное динамическое воздействие колёсного движителя на почвогрунт, тем больше его деформация. Чем крупнее пни, тем интенсивнее ударная нагрузка, и больше данные углубления. По колеям трелёвочного волока пни располагаются в случайном порядке, вызывая не только дополнительные повреждения почвогрунта рядом с ними, но и дополнительные динамические нагрузки на ходовую часть и раму форвардеров, что приводит к их более частым поломкам, увеличению потерь от простоев и затрат на ремонт. Кроме этого, с ростом углублений перед пнями растёт и расход топлива на преодоление данных препятствий. В результате выполненных исследований разработана математическая модель взаимодействия колёсной лесной машины с краевой частью массива почвогрунта, содержащей определённые препятствия в виде пней, камней и т. п. В ходе реализации математической модели и использовании полученных расчётных соотношений установлено, что наличие различных по высоте препятствий в границах трелёвочного волока по пути движения колёсной лесной машины приводит к возникновению ударных нагрузок на поверхности почвогрунта, уровень которых в 2 раза и более превосходит уровень статических нагрузок. В статье разработана математическая модель и получены расчётные соотношения, позволяющие установить, что наличие определённых препятствий (пней, камней и т. п.) различной высоты в границах трелёвочного волока по пути движения колёсной лесной машины приводит к возникновению ударных нагрузок на краевую часть почвогрунта, уровень которых в 2–3 раза превосходит уровень статических нагрузок. Несмотря на то, что высокие нагрузки обуславливают упрочнение массива почвогрунта, при состоянии его высокой влажности наблюдается существенный рост глубины колеи, достигающий и превосходящий глубину клиренса лесной машины даже для условий воздействия первой колёсной пары. 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 № 26-16-00047, <https://rscf.ru/project/26-16-00047/>

Ключевые слова: лесозаготовки; колёсные лесные машины; трелёвочные системы; деформация почвогрунта; древесные пни; трелёвочные волоки.

Characteristics of soil deformation in the wheel rut of a skid trail during the interaction of a wheeled forestry machine with obstacles

V.Ya. Shapiro^{1а}, I.V. Grigoriev^{2б}, E.V. Sibiryatkin^{3с}, E.A. Tikhonov^{4д}, T.N. Storodubtseva^{3е}, S.I. Revyako^{5ф}

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

² Arctic State Agrotechnological University; 3 km, Bld. 3, Sergelyakhskoye Highway, Yakutsk, Russia

³ Voronezh State Forestry Engineering University named after G.F. Morozov; 8, Timiryazev St., Russia, Voronezh

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

⁵ Novocherkassk Engineering and Reclamation Institute named after A.K. Kortunov, Branch of the Don State Agrarian University; 111, Pushkinskaya St., Novocherkassk, Russia

^a shapiro54vlad@mail.ru, ^b silver73@inbox.ru, ^c jey-sib@mail.ru, ^d tihonov@petrsu.ru, ^e tamara-tns@yandex.ru,

^f revyako77@mail.ru

^a <https://orcid.org/0000-0002-6344-1239>, ^b <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>,

^c <https://orcid.org/0009-0007-0475-612X>, ^d <https://orcid.org/0000-0003-2136-3268>,

^e <https://orcid.org/0000-0002-4925-8542>, ^f <https://orcid.org/0000-0001-7362-5042>

Received 07.04.2026, accepted 23.03.2026

Field observations of wheeled forwarders in operation and the results of examining skid trails have shown that in areas where the forwarder's wheels strike and roll off stumps during warm weather, significant depressions are formed due to the additional impact load of the drive mechanism on the soil. Larger depressions left behind stumps in the direction of a forwarder's loaded travel convincingly show that the heavier the wheeled forestry machine, and consequently the greater the additional dynamic impact of its wheeled drive mechanism on the soil, the greater the soil deformation. The larger the stumps, the more intense the impact load, and the larger these depressions become. Along the ruts of a skid trail, stumps are arranged randomly, causing not only additional damage to the surrounding soil but also additional dynamic loads on the undercarriage and frame of forwarders. This leads to more frequent breakdowns, increased downtime losses, and higher repair costs. Moreover, as the depressions in front of stumps grow, fuel consumption to overcome these obstacles also increases. As a result of the research conducted, a mathematical model has been developed for the interaction between a wheeled forestry machine and the edge portion of a soil mass containing specific obstacles such as stumps, stones, and the like. Through the implementation of this mathematical model and the use of the derived calculation relationships, it has been established that the presence of obstacles of varying heights within the boundaries of a skid trail along the path of a wheeled forestry machine leads to the generation of impact loads on the soil surface, the magnitude of which is twice or more than the level of static loads. The article presents a developed mathematical model and provides calculation relationships that allows one to determine that the presence of specific obstacles (stumps, stones, etc.) of varying heights within the boundaries of a skid trail along the path of a wheeled forestry machine results in impact loads on the edge portion of the soil. The level of these impact loads is 2–3 times higher than the level of static loads. Despite the fact that high loads lead to strengthening of the soil mass, under conditions of high soil moisture, there is a significant increase in rut depth, reaching or even exceeding the ground clearance of the forestry machine, even under the impact of the first wheel pair.

Keywords: logging, wheeled forestry machines, skidding systems, soil deformation, tree stumps, skidding lugs.

Введение. Поверхность движения лесных машин изначально, до первого прохода, имеет определённый микрорельеф (особенно в лесах естественного происхождения), обусловленный наличием случайным образом расположенных камней, пней, кочек, и т. п. [1, 2]. При прокладке сети трелёвочных волоков и технологических коридоров стараются избегать наиболее крупные их из них [3–5]. Но они не всегда видны, и в большей части случаев скрыты под слоем опада и живым напочвенным покровом [6].

При разрубке трасс трелёвочных волоков, магистральных и пасечных, пни должны спиливаться заподлицо с землей, чтобы не мешать движению лесных машин и трелёвочных систем. Но при машинной заготовке древесины (в настоящее время обычно харвестерами) и, соответственно, разрубке трасс пасечных трелёвочных волоков лесозаготовительной машиной, выполнить это требование далеко не всегда возможно технически [7–9]. Кроме того, в связи с тем, что плотность и прочность почвогрунта естественного сложения и пней (камней) существенно различаются [10], начиная с первого прохода движения лесной машины по трелёвочному волоку (особенно в тёплое время года) наблюдается эффект существенно различного деформирования поверхности движения и образования крупных неровностей по длине колеи (рис. 1). В результате чего профиль поверхности колеи напоминает гребёнку, неровности которой расположены случайным образом. Особенно быстро этот эффект проявляется при работе колёсных лесных машин.

Как показали результаты измерения образующихся в колеях трелёвочных волоков неровностей, углубления в поверхности колеи перед твёрдыми препятствия-

ми и после них могут достигать величины клиренса лесной машины.



Рис. 1. Фотография трелёвочного волока с образовавшимися из-за твёрдых включений неровностями (обведены красным)

Можно обоснованно полагать, что процесс образования волока «гребёнки» связан с тем, что под воздействием нормальной нагрузки от движителя машины и касательной силы тяги поверхность почвогрунта, не имеющая крупных твёрдых включений (сопоставимых по размеру с колёсом лесной машины) деформируется и идёт нормальный процесс образования колеи. При подходе колёса лесной машины к крупному, твёрдому включению (пню, камню) оно начинает закатываться на это препятствие, и касательная сила тяги начинает сгребать под колесо почвогрунт, в сторону противоположную направлению движения машины. При съезде колёса с твёрдого включения на поверхности колеи почвогрунт за ним получает дополнительную вертикальную динамическую нагрузку от резкого схода колеса в колею. Это приводит образованию за препятствием в колее глубокой деформации (рис. 2).



Рис. 2. Фотография глубокой деформации поверхности колеи после твёрдого препятствия на его поверхности

С каждым проходом лесной машины (трелёвочной системы) этот эффект усиливается до тех пор, пока глубины деформаций после твёрдых препятствий не сравняются с величиной клиренса лесной машины.

Поскольку лесные машины в подавляющем большинстве случаев перемещаются по сети трелёвочных волоков челночным ходом, при обратном движении по волоку, при наезде (подъёме) на препятствие, повышенная касательная сила тяги колёса лесной машины реализует эффект копания, что ещё более увеличивает глубину деформации поверхности колеи возле образующегося препятствия.

Натурное обследование трелёвочного волока в сосняке-брусничнике, на лесосеке, разработанной по скандинавской технологии, показало, что глубины деформаций после твёрдых препятствий в колее больше в сторону грузового хода форвардеров (рис. 3).

Также результаты натурного обследования колеи волока показали, что после глубокой просадки движителя при сходе с твёрдого препятствия поверхность колеи плавно поднимается и выходит на уровень, характерный для нормального (безударного) деформирования поверхности, при котором преобладают результаты статического давления колёсного движителя на почвогрунт.

Результатом образования колеи «гребёнки» являются повышенный расход топлива, связанный с необходимостью заезда на образовавшиеся случайным образом в колее препятствия, повышенные динамические нагрузки на раму и подвеску лесной машины, снижение комфорта работы оператора, обрывы корней оставляемых на доращивание деревьев при выборочных рубках (рис. 2), образование очагов водной эрозии, за счёт больших углублений, в которых накапливается вода, повышение сложности подготовки вырубki к последующему искусственному или комбинированному лесовосстановлению.

Цель исследования: разработка математической модели, учитывающей динамические нагрузки на почвогрунт, вызываемые препятствиями различной высоты в колеех трелёвочного волока по пути движения колёсной лесной машины.

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. Будем считать, что груженная колёсная лесная машина при нагрузке Q на её первую ось, двигаясь в пределах трелёвочного волока, взаимодействует с краевой частью массива почвогрунта, содержащего некоторое препятствие (пень, камень и т. п.) высотой h .

При свободном падении с указанной высоты h грузом Q и массой M создаёт силовое воздействие F на почвогрунт, которое за единицу времени t обуславливает формирование импульса массы $I_m = MV$, где V – динамическая скорость удара.

Скорость V , исходя из закона сохранения потенциальной и кинетической энергии взаимодействия, будет равна $V = \sqrt{2gh}$, где g – ускорение свободного падения.

Отнеся силу F к величине S пятна контакта шины с почвогрунтом, установим величину вертикального динамического давления p , равного:

$$p = \frac{Q\sqrt{2gh}}{S}. \quad (1)$$

Введём коэффициент динамического усиления давления K_0 , равный отношению величины p к статическому $p_c = Q/S$ давлению, которое испытывал бы почвогрунт при взаимодействии с колёсом лесной машины в условиях отсутствия какого-либо препятствия на своём пути.

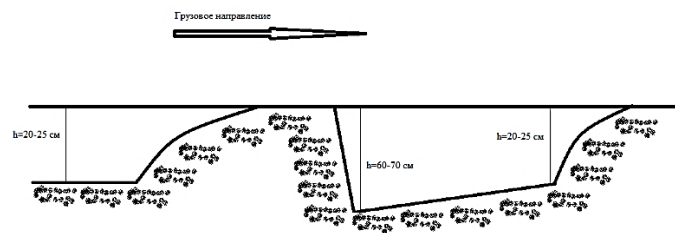


Рис. 3. Результаты натурного обследования поверхности колеи трелёвочного волока в сосняке-брусничнике

На рис. 4 применительно к условиям эксплуатации колёсной лесной машины (форвардера) АМКДОП

2662-01 с радиусом передних колёс $R = 0,41$ м (диаметром 32 дюйма), при максимальной нагрузке на переднюю ось $Q=7$ т (общая нагрузка составляет 14 т), длине пятна контакта $L = 0,442$ м, его ширине $B = 0,7$ м ($S = 0,31$ м²) показано влияние высоты препятствия h , м, на коэффициент K_δ .

Как следует из данных рис. 4, если высота препятствия превышает значения $h = 0,2–0,25$ м уровень динамического давления более, чем в 2 раза превосходит нагрузки при условии отсутствия препятствия, а по достижении $h = 0,5$ м – более, чем в 3 раза.

Такой уровень давлений может обусловить кратный рост глубины колеи h_k (что наглядно показывают рис. 1, 3) с достижением её значений $0,6–0,7$ м. Уместно отметить, что клиренс форвардера, характеристики которого приняты к расчёту, составляет $H_{кл} = 0,54$ м.

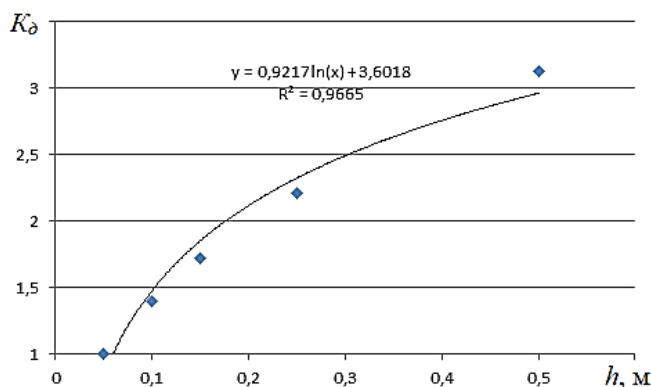


Рис. 4. Влияние высоты препятствия на коэффициент динамического усиления давления

Процесс образования колеи глубиной h_k в результате ударного взаимодействия колёса лесной машины с почвогрунтом базируется на решении задачи его контактного разрушения механизмом сдвига при нагрузках различного уровня интенсивности [11–13].

Величину давления сдвига q в соответствии с положениями деформирования массива сплошной среды с внутренним трением определим как:

$$q = \gamma p = \frac{\nu}{1-\nu} p, \quad (2)$$

где γ – коэффициент бокового расширения, ν – коэффициент Пуассона.

Величина предела прочности почвогрунта на сдвиг τ в соответствии со стандартом [14] равна:

$$\tau = C + ptg\varphi, \quad (3)$$

где C – величина сцепления грунта, а φ – его угол внутреннего трения.

Сравнительный анализ соотношений (1) и (3) свидетельствует о том, что с ростом высоты препятствия h и соответственно уровня динамического давления p прочностная характеристика почвогрунта τ также возрастает, что необходимо учитывать при оценках глубины колеи h_k .

Как установлено в работах [15–17], влажность W почвогрунта оказывает существенное влияние как на

параметры паспорта прочности почвогрунта, так и его упругопластические характеристики – модуль общей деформации E и коэффициент Пуассона ν .

Так, в табл. 1 на основании данных [18–20] представлены показатели средних значений параметров C , φ , E и ν для четырёх состояний (категорий) почвогрунта, в частности суглинка, по критерию его влажности W .

На рис. 5 представлены расчётные зависимости величины τ , кПа, от показателя влажности W , %, для трёх значений коэффициента динамичности: кривая 1- $K_\delta = 1$ ($h = 0,05$ м), кривая 2- $K_\delta = 2$ ($h = 0,2$ м), кривая 3- $K_\delta = 3$ ($h = 0,5$ м).

Таблица 1. Показатели физико-механических свойств почвогрунта

Категория	W, %	Состояние почвогрунта	C, кПа	φ , °	E, кПа	ν
I	186	сухой	20,3	24,7	3000	0,16
II	24	увлажнённый	15,1	21,4	1000	0,24
III	32	влажный	10,9	17,5	700	0,32
IV	41	переувлажнённый	6,5	13,3	400	0,41

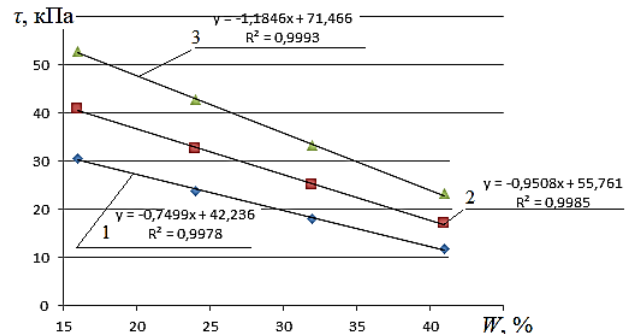


Рис. 5. Зависимость характеристики прочности почвогрунта от состояния его влажности при различном уровне препятствия: 1 – $K_\delta = 1$ ($h = 0,05$ м), 2 – $K_\delta = 2$ ($h = 0,2$ м), 3 – $K_\delta = 3$ ($h = 0,5$ м)

Как следует из анализа графических данных на рис. 5, при минимальных препятствиях и отсутствии динамического усиления давления (кривая 1) величина τ снижается практически в 3 раза (от 30 до 10 кПа) по мере изменения состояния влажности почвогрунта от сухого до переувлажнённого. При увеличении высоты препятствия в диапазоне от 0,2 до 0,5 м интенсивность указанного снижения τ уменьшается в среднем в 2 раза.

Таким образом, ударные нагрузки по сравнению со статическими меняют характер сопротивления почвогрунта их разрушающему воздействию за счёт относительного увеличения прочности краевой части массива.

Поместим трёхмерную систему координат $Oxyz$ в точку взаимодействия индентора (шины лесной машины) с массивом почвогрунта и направим ось Oz вертикально вниз в направлении глубины колеи.

Величина давления сдвига q_z с ростом координаты z снижается в соответствии с законом:

$$q_z = \frac{q}{\left(\frac{z}{a}\right)^n}, \quad a = \sqrt[3]{\frac{QR(1-\nu^2)}{4E}}, \quad n = 1-\gamma/2, \quad (4)$$

где a – радиус зоны контактного сближения индентора в пределах пятна контакта при его ударном взаимодействии с почвогрунтом [1].

Максимальную глубину z , на которой выполняется критерий разрушения грунта сдвигом, а именно $q_z \geq \tau$, принимаем за глубину колеи h_k .

Основываясь на соотношениях (1)–(4), величина h_k определена как:

$$h_k = a \left[\frac{\gamma p}{c + p \tan \phi} \right]^{1/n}. \quad (5)$$

Таким образом, на расчётную глубину колеи влияют:

1) Параметры форвардера – радиус колёса R и размеры пятна контакта S , общий вес груза, нагрузка Q и величина давления p на переднюю ось;

2) Влажность почвогрунта W ;

3) Параметры паспорта прочности почвогрунта – C и ϕ ;

4) Упругопластические свойства почвогрунта – E и ν ;

5) Высота препятствия h .

В итоге с учётом исходной высоты h препятствия в результате ударного взаимодействия первой колёсной пары лесной машины с почвогрунтом образуется общая глубина колеи $H = h + h_k$. Отнесём глубину H к высоте клиренса форвардера $H_{кл} = 0,54$ м и исследуем зависимость параметра $\lambda = H/H_{кл}$ от состояния влажности почвогрунта и, следовательно, его прочностных способностей сопротивляться ударным нагрузкам.

На рис. 6 представлены зависимости λ , %, от W , % при трёх уровнях препятствий: линия 1 – $h = 0,15$ м, линия 2 – $h = 0,25$ м, линия 3 – $h = 0,4$ м. Расчёты произведены при нагрузке $Q = 7$ т.

Отметим, что общим для полученных кривых является установленный с достаточно высоким коэффициентом детерминации экспоненциальный характер зависимостей λ от W , причём более интенсивный рост относительной глубины наблюдается при превышении показателя влажности отметки $W = 30$ –33 %.

Как видим, при относительно небольшой высоте препятствия (линия 1 рис. 6) для первых трёх категорий влажности почвогрунта параметр λ не превышает 50 %.

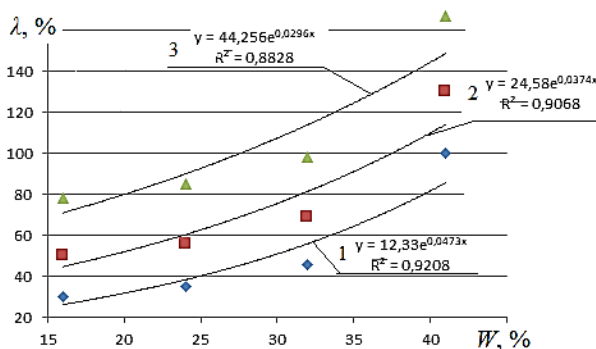


Рис. 6. Зависимость относительной глубины колеи от влажности почвогрунта при различных уровнях препятствия: 1 – $h = 0,15$ м, 2 – $h = 0,25$ м, 3 – $h = 0,4$ м

Однако для переувлажнённого состояния почвогрунта показатель λ достигает 100 %, что указывает на то, что при такой влажности и, соответственно, низкой прочности почвогрунта максимальная загрузка форвардера, равная 14 т, при нагрузке на первую ось – 7 т приведет к тому, что лесная машина может погрузиться на глубину клиренса.

Уместно отметить, что при незначительных показателях высоты препятствий до 0,05 м (коэффициент динамичности $K_d = 1$) параметр λ во всем диапазоне изменения влажности почвогрунта W возрастает от 11 до 57 %.

Качественные оценки результатов расчётов при $h = 0,25$ м (кривая 2 рис. 6) совпадают с условиями кривой 1 при некоторых количественных отличиях.

По мере достижения препятствия высоты $h = 0,4$ м (кривая 3 рисунка 6) имеют место более существенные количественные и качественные изменения.

В этом случае нагрузка на первую ось, равная 7 т, приводит во всем диапазоне изменения влажности почвогрунта от 16 до 41 % к погружению колёс лесной машины на глубину либо близкую к клиренсу, либо его превосходящую. Как следствие, это приводит к тому, что необходимо снижать уровень нагрузки Q и величину динамического давления p .

Оценим влияние указанные факторы нагрузки на возможность снижения относительной глубины колеи и параметра λ .

Так при $h = 0,4$ м и значениях λ , соответствующих данным рисунка 6 (кривая 3), уменьшение нагрузки Q на первую ось с 7 до 3 т и динамического давления p с 63,3 до 27,15 кПа обеспечивает снижение величины λ для сухих почвогрунтов первой категории на 3 %, второй категории – на 6 %, третьей – 15 % и четвёртой категории переувлажнённых почвогрунтов – на 48 %.

Однако полученный результат трудно признать удовлетворительным, поскольку уровень образованной глубины колеи H остаётся достаточно высоким для реализации прохода всех осей форвардера без того, чтобы ему не погрузиться на глубину клиренса.

При наличии на пути форвардера препятствий больших размеров (h более 0,3 м) требуются соответствующие технические мероприятия.

Например, можно выделить среди них использование 4-осного форвардера АМКОДОР 2682-01 с радиусом передних и задних спаренных колёс $R = 0,33$ м (диаметром 26 дюйма) при максимальной общей нагрузке 15 т и нагрузке на переднюю ось $Q = 3,75$ т. Спаренные колёса позволяют использовать колёсные моногусеницы, и тем самым кратно увеличить площадь пятна контакта. В дополнение к этому при необходимости возможно использование шин низкого давления.

Целью отмеченных мероприятий является снижение уровня ударного давления на почвогрунт до $p \leq 20$ кПа и при необходимости – до 10–12 кПа.

На рис. 7 при $h = 0,4$ м представлена зависимость λ , %, от W , %. Расчёты выполнены для условий эксплуатации форвардера АМКОДОР 2682-01 с достижением величины равномерного ударного давления на все оси $p = 17$ кПа.

Сравним график на рис. 7 ($p = 17$ кПа) с кривой 3 рис. 6 ($p = 63,3$ кПа), т. е. когда величина ударного давления снижена более, чем в 3,5 раза.

Можно заключить, что для почвогрунтов сухих и увлажнённых при $W < 30$ % существенная высота препятствия и обусловленное этим увеличение ударной нагрузки приводит к относительно небольшому росту глубины колеи. Объяснение этого результата лежит в анализе и сопоставлении величин p и прочности τ , зависящей от уровня p .

Для влажных и особенно переувлажнённых почвогрунтов снижение τ происходит сильнее, чем уменьшение величины p , в связи с чем наблюдается резкое увеличение глубины колеи.

На рис. 8 представлено совместное влияние высоты препятствия h , м, и влажности почвогрунта W , %, на суммарную абсолютную глубину колеи H , м, при проходе первой колёсной пары 3-осного форвардера с максимальной его нагрузкой 14 т.

Полученные графические данные показывают, что ограничение по весу и необходимость реализации мероприятий по снижению ударного воздействия на трассу волока возникают при высоте препятствий от 0,25 м и состоянии влажности более 30 %.

Влажные и переувлажнённые почвогрунты имеют место в период межсезонных работ, а также в нижних частях склонов зоны криолита при нахождении трассы волока вблизи с водонепроницаемой границей вечной мерзлоты. Эти обстоятельства диктуют необходимость районирования пасек по критерию состояния влажности почвогрунтов и наличия различных препятствий в границах трелёвочных волоков/технологических коридоров.

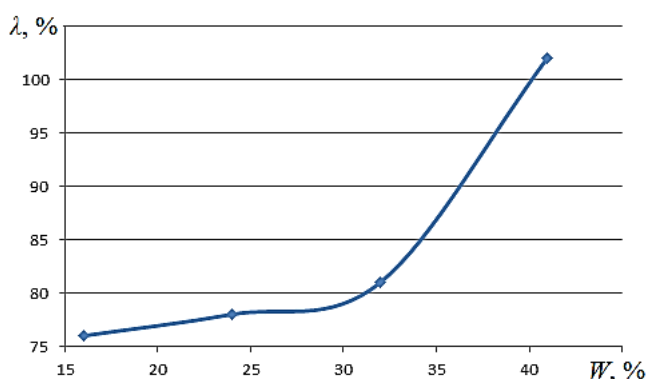


Рис. 7. Зависимость относительной глубины колеи от влажности почвогрунта при большой высоте препятствия

Литература

- Мучкаева Г.М., Бudevич Е.А., Шоль Н.Р., Самойлов В.В. К вопросу о математическом исследовании микропрофиля поверхности лесосеки // *Деревообрабатывающая промышленность*. 2019. № 2. С. 3–9.
- Григорьева О.И. Приборные комплексы для изучения поверхности лесосек // *Повышение эффективности лесного комплекса*. Мат-лы IV Всероссийской науч.-практ. конференции с междунар. участием. 2018. С. 47–49.
- Куницкая О.А., Швецов А.С., Должиков И.С., Григорьева О.И. Анализ технологических возможностей валочно-трелёвочно-процессорных машин // *Современные проблемы развития Европейского Севера – 2025*. Мат-лы Всеросс. науч.-практ. конф. Ухта, 2025. С. 121–123.
- Зорин М.В., Хитров Е.Г., Куницкая О.А., Елисеев П.С., Юдилевич А.М., Клубничкин В.Е. Конечно-разностная схема для расчёта прогиба дорожного мата под воздействием движителя лесной машины // *Лесной вестник. Forestry Bulletin*. 2025. Т. 29. № 1. С. 96–111.
- Зорин М.В., Новгородов Д.В., Юдилевич А.М., Мануковский А.Ю., Куницкая О.А., Должиков И.С. Повышение эффективности лесозаготовительного производства за счет использования сборно-разборных дорожных покрытий на транспортных операциях // *Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах*. 2024. № 6 (18). С. 33–43.
- Солнцева Е.С., Григорьева О.И., Должиков И.С., Михайлова Л.М. Влияние рекреационной нагрузки на биологическую активность почв городского парка // *Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах*. 2024. № 5 (17). С. 14–23.
- Рябухин П.Б., Куницкая О.А., Швецов А.С., Фёдоров В.И., Григорьева О.И. Исследование влияния режима работы оператора харвестера на сохранение подроста // *Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах*. 2025. № 4 (22). С. 46–53.
- Серяков С.А., Куницкая О.А., Вашуткин А.С., Горбатов А.П. Функциональные особенности импульсных харвестерных головок // *Актуальные проблемы развития лесного комплекса*. Мат-лы XX Междунар. науч.-техн. конф. Отв. ред. Е.А. Иванничева. Вологда, 2022. С. 332–336.
- Серяков С.А., Куницкая О.А. Эффективность харвестерных головок // *Стратегия и перспективы развития агротехнологий и лесного комплекса Якутии до 2050 года*. Сборник науч. стат. по мат-лам Всеросс. науч.-практ. конф. с междунар. участием, посвященной 100-летию образования Якутской АССР и 85-летию Первого президен

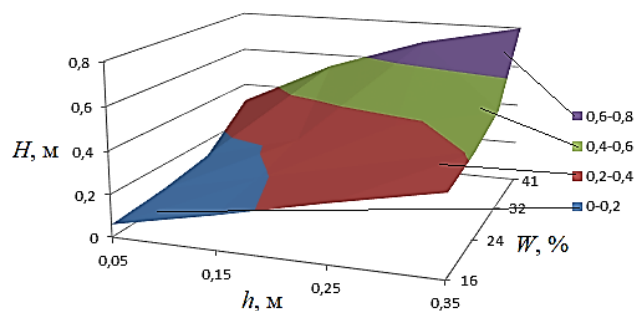


Рис. 8. Совместное влияние высоты препятствия и влажности почвогрунта на глубину колеи

Выводы. Разработанная и исследованная математическая модель и полученные расчётные соотношения (1)–(5) позволили установить, что наличие определённых препятствий (пней, камней и т. п.) различной высоты в границах трелёвочного волока по пути движения колёсной лесной машины приводит к возникновению ударных нагрузок на краевую часть почвогрунта, уровень которых в 2–3 раза превосходит уровень статических нагрузок.

Несмотря на то, что высокие нагрузки обуславливают упрочнение массива почвогрунта, при состоянии его высокой влажности наблюдается существенный рост глубины колеи, достигающий и превосходящий глубину клиренса лесной машины, в ряде случаев, даже для условий воздействия первой колёсной пары.

При высокой влажности почвогрунта и значительных размерах препятствий снижение только веса лесной машины, или трелёвочной системы на ее базе является непроизводительным и недостаточно эффективным технологическим мероприятием. В этих геотехнических условиях целесообразно использовать технические мероприятия для обеспечения кратного снижения уровня ударного воздействия на почвогрунт за счет применения спаренных колёс, колёсных моногусениц и шин низкого и сверхнизкого давления.

- та РС(Я) М. Е. Николаева (Николаевские чтения). 2022. С. 795–802.
10. 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.
 11. Морозов Е.М., Зернин М.В. Контактные задачи механики разрушения. М. : ЛИБРОКОМ. 2010. 544 с.
 12. 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 // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2021. № 6 (384). С. 121–134.
 13. Shapiro V.Ya. Efficiency of cut configuration in driving tunnels with a set of blast holes. Soviet Mining Science. 1989. Т. 25. № 4. С. 379–386.
 14. ГОСТ 12248.1–2020. Грунты. Определение характеристики прочности методом одноплоскостного среза. М. : Стандартинформ. 2020. 20 с.
 15. Роман Л.Т., Царапов М.Н. Оценка устойчивости откосов, сложенных оттаивающими грунтами // Геология. Инженерная геология, гидрогеология, геоэкология. 2011. №1. С. 58–62.
 16. 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.
 17. Царапов М.Н. Формирование прочностных характеристик грунтов в процессе оттаивания // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 2007. № 6. С. 31–34.
 18. Вязов С.С. Реологические основы механики грунтов. М. : Высшая школа. 1978. 447 с.
 19. Каляшов В.А., Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Григорьева О.И., Стародубцева Т.Н. Исследование процесса образования колеи и её устойчивости при работе колёсных лесных машин и трелёвочных систем на склонах оттаивающего почвогрунта // Лесотехнический журнал. 2021. Т. 11. № 2 (42). С. 121–132.
 20. Агейкин А.С. Вездеходные колёсные и комбинированные движители. М. : Машиностроение. 1972. 184 с.
 - lapsible road surfaces in transport operations // Occupational safety and health in logging and woodworking industries. 2024. No. 6 (18). pp. 33–43.
 6. Solntseva E.S., Grigoreva O.I., Dolzhikov I.S., Mikhailova L.M. The influence of radiation stress on the biological activity of urban park soils // Safety and labor protection in logging and woodworking industries. 2024. No. 5 (17). pp. 14–23.
 7. Ryabukhin P.B., Kunitskaya O.A., Shvetsov A.S., Fedorov V.I., Grigoreva O.I. Investigation of the effect of the harvester operator's operating mode on the preservation of undergrowth // Occupational safety and health in logging and woodworking industries. 2025. No. 4 (22). pp. 46–53.
 8. Seryakov S.A., Kunitskaya O.A., Vashutkin A.S., Gorbato A.P. Functional features of pulsed harvester heads // Actual problems of forest complex development. Materials of the XX International Scientific and Technical Conference. The responsible editor is E.A. Ivanishcheva. Vologda, 2022. pp. 332–336.
 9. Seryakov S.A., Kunitskaya O.A. Efficiency of harvester heads // Strategy and prospects of development of agrotechnologies and forestry complex of Yakutia until 2050. Collection of scientific articles based on the materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation, dedicated to the 100th anniversary of the formation of the Yakut ASSR and the 85th anniversary of the First President of the RS(Ya) M. E. Nikolaev (Nikolaev readings). 2022. pp. 795–802.
 10. 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. No. 5–4 (16–4). pp. 320–323.
 11. Morozov E.M., Zernin M.V. Contact problems of fracture mechanics. Moscow: LIBROKOM. 2010. –544 p.
 12. Rudov S.E., Shapiro V.Ya., Grigorev I.V., Kunitskaya O.A., Grigoreva O.I. Modeling the interaction of forest machines with soil when working on slopes // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Forest magazine. 2021. No. 6 (384). pp. 121–134.
 13. Shapiro V.Ya. Efficiency of cut configuration in driving tunnels with a set of blast holes. Soviet Mining Science. 1989. Т. 25. No. 4. С. 379–386.
 14. GOST 12248.1–2020. Soils. Determination of strength characteristics by the single-plane cut method. M. Standartinform. 2020. – 20 p.
 15. Roman L.T., Tsarapov M.N. Assessment of the stability of slopes formed by thawing soils // Geology. Engineering geology, hydrogeology, geocryology. 2011. No. 1. pp. 58–62.
 16. 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.
 17. Tsarapov M.N. Formation of strength characteristics of soils during thawing // Bulletin of the Moscow University. Series 4: Geology. 2007. No. 6. pp. 31–34.
 18. Vyalov S.S. Rheological foundations of soil mechanics. Moscow: Higher School. 1978. – 447 p.
 19. Kalyashov V.A., Shapiro V.Ya., Grigorev I.V., Kunitskaya O.A., Grigoreva O.I., Starodubtseva T.N. Investigation of the process of track formation and its stability during operation of wheeled forestry machines and skidding systems on the slopes of thawing soil // Forestry engineering magazine. 2021. Vol. 11. No. 2. (42). pp. 121–132.
 20. Ageikin A.S. All-terrain wheeled and combined propellers. Moscow: Mashinostroenie. 1972. – 184 p.

References

1. Muchkaeva G.M., Budevich E.A., Shol N.R., Samoilov V.V. On the issue of mathematical investigation of the microprofile of the cutting area surface // The woodworking industry. 2019. No. 2. pp. 3–9.
2. Grigoreva O.I. Instrument complexes for studying the surface of cutting areas // Improving the efficiency of the forest complex. Materials of the IV All-Russian Scientific and Practical conference with international participation. 2018. pp. 47–49.
3. Kunitskaya O.A., Shvetsov A.S., Dolzhikov I.S., Grigoreva O.I. Analysis of the technological capabilities of roller-skidding processor machines // Modern problems of the development of the European North – 2025. Materials of the All-Russian scientific and practical conference. Ukhta, 2025. pp. 121–123.
4. Zorin M.V., Khitrov E.G., Kunitskaya O.A., Eliseev P.S., Yudilevich A.M., Klubichkin V.E. Finite difference scheme for calculating the deflection of a road mat under the action of a forest vehicle propulsor. Lesnoy Vestnik. Forestry Bulletin. 2025. Vol. 29. No. 1. pp. 96–111.
5. Zorin M.V., Novgorodov D.V., Yudilevich A.M., Manukovsky A.Yu., Kunitskaya O.A., Dolzhikov I.S. Improving the efficiency of logging production through the use of col-