

**ОЦЕНКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ ТРАСС ДВИЖЕНИЯ ЛЕСНЫХ МАШИН
НА СКЛОНЕ ОТТАИВАЮЩЕГО ПОЧВОГРУНТА
С УЧЕТОМ МАНЕВРИРОВАНИЯ ДВИЖИТЕЛЯ***

**В. Я. Шапиро¹, М. С. Новиков², И. В. Григорьев², П. Н. Перфильев³,
Е. А. Тихонов⁴, В. П. Друзьянова⁵**

¹Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С. М. Кирова
Российская Федерация, 194021, г. Санкт-Петербург, Институтский пер., 5

²Арктический государственный агротехнологический университет
Российская Федерация, 677007, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, шоссе Сергеляхское, 3 км, д. 3

³Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова
Российская Федерация, 163002, г. Архангельск, набережная Северной Двины, 17

⁴Петрозаводский государственный университет
Российская Федерация, 185910, Республика Карелия, г. Петрозаводск, просп. Ленина, 33

⁵Северо-Восточный федеральный университет имени М. К. Аммосова
Российская Федерация, 677000, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, ул. Белинского, 58

Аннотация. На производительность трелевочных систем большее влияние оказывает среднее расстояние трелевки, которое определяется размерами лесосеки, местом расположения верхнего склада (погрузочного пункта), принятой схемой разработки лесосеки, и несущей способностью почвогрунтов. Данный показатель оказывает влияние на коэффициент удлинения пути за счет маневрирования. При прочих равных условиях, чем ниже несущая способность почвогрунтов, тем больше приходится маневрировать, тем больше становится среднее расстояние трелевки, тем меньше производительность и больше удельная энергоемкость работ. Известно, что при работе на слабонесущих почвогрунтах трелевочные тракторы вынуждены идти галсами до 70 % всего времени грузового хода. Вместе с тем, вопросам влияния маневрирования лесных машин и трелевочных систем на склонах на многолетней мерзлоте пока еще не было уделено должного внимания, хотя очевидно, что это существенным образом сказывается на их экологической и эксплуатационной эффективности. В статье показано, что особое внимание к выбору направлений трелевочных волоков и технологических коридоров с точки зрения возможных маневров движителя должно быть уделено условиям работ на крутых и очень крутых склонах, регламентирующих минимальные отклонения от магистрального направления движения лесной машины или трелевочной системы. Доказано, что при планировании лесозаготовительных работ на склонах оттаивающих почвогрунтов гидрогеологическим и техническим службам лесопромышленных предприятий и лесохозяйственных организаций необходимо произвести районирование участков по критерию влажности и составить их классификацию. Кроме этого установлено, что для каждой категории участков необходимо произвести оценку работоспособности трасс движения – трелевочных волоков и технологических коридоров с указанием допустимых диапазонов глубины колеи и угла маневрирования лесных машин или трелевочных систем.

Ключевые слова: леса на склонах, леса на многолетней мерзлоте, лесозаготовки, лесные машины, трелевочные системы, деформация почвогрунта, колеобразование, маневрирование лесных машин.

* 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 № 23-16-00092/, <https://rscf.ru/project/23-16-00092/>.

The work was carried out within the framework of the scientific school “Innovative developments in the field of the logging industry and forestry” of the Arctic State Agrotechnological University. The research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation No. 23-16-00092/, <https://rscf.ru/project/23-16-00092/>.

ASSESSMENT OF FOREST MACHINE TRACKS OPERABILITY ON THE SLOPE OF THAWING SOIL TAKING INTO ACCOUNT MANOEUVRING OF THE VEHICLE

V. Ya. Shapiro¹, M. S. Novikov², I. V. Grigorev², P. N. Perfiliev³, E. A. Tikhonov⁴, V. P. Druzyanova⁵

¹St. Petersburg State Forestry Engineering University named after S. M. Kirov

5, Institutskiy lane, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation

²Arctic State Agrotechnological University

3, Sergelyakhskoye highway, 3 km, Yakutsk, Republic of Sakha (Yakutia), 677007, Russian Federation

³Northern (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov

17, Severnaya Dvina Embankment, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation

⁴Petrozavodsk State University

33, Lenina str., Petrozavodsk, Republic of Karelia, 185910, Russian Federation

⁵Northeastern Federal University named after M. K. Ammosov

58, Belinsky St., Yakutsk, Republic of Sakha (Yakutia), 677000, Russian Federation

Annotation. The productivity of skidding systems is greatly influenced by the average skidding distance, which is determined by the size of the cutting area, the location of the upper warehouse (loading point), the accepted scheme for the development of the cutting area, and the bearing capacity of soils. This indicator affects the coefficient of track lengthening due to maneuvering. All other things being equal, the lower the bearing capacity of the soils, the more maneuvering is required, the greater the average skidding distance becomes, the lower the productivity and the greater the specific energy intensity of the work. It is known that when working on low-bearing soils, skidding tractors are forced to tack up to 70 % of the entire cargo runtime. At the same time, the impact of maneuvering forest vehicles and skidding systems on slopes on permafrost has not yet been given due attention, although it is obvious that this significantly affects their environmental and operational efficiency. The article shows that special attention to the choice of the directions of the skidding lines and technological corridors in terms of possible maneuvering of the vehicle should be paid to the working conditions on steep and very steep slopes, regulating the minimum deviations from the main direction of movement of the forest machine or skidding system. It is proved that when planning logging operations on the slopes of thawing soils, the hydro geological and technical services of forestry enterprises and forestry organizations need to zone the sites according to the moisture criterion and classify them. In addition, it has been established that for each category of sites it is necessary to assess the operability of traffic routes-skidding lines and technological corridors, indicating the permissible ranges of track depth and maneuvering angle of forest vehicles or skidding systems.

Keywords: forests on slopes, forests on permafrost, logging, forest machinery, skidding systems, soil deformation, rutting, maneuvering of forest machinery.

ВВЕДЕНИЕ

Маневрирование лесных машин при выполнении работ на склонах является нежелательным, но неизбежным [1]. Наиболее нежелательным маневрирование лесных машин на склонах считается с точки зрения безопасности машин и персонала [2–5]. Несмотря на то, что при выполнении технологической подготовки стараются оптимизировать расположение трасс движения лесных машин (трелевочных волоков и технологических коридоров) избежать необходимости маневрирования, в большинстве случаев не удается. Кроме того, по мере износа ездовой поверхности трасс движения лесных машин и трелевочных систем (увеличении глубины колеи) необходимость в маневрировании возрастает, и нередко можно наблюдать ситуацию, когда первые 1–3 рейса трелевочные тракторы проходят практически по прямой, а затем все больше и больше начинают идти галсами [6]. Чем больше влажность почвогрунта, тем меньше его несущая способность, тем больше интенсивность образования колеи, и тем больше маневрирование [7]. В свою очередь, тем меньше производительность лесных машин и трелевочных систем, и больше удельная энергоёмкость их работы [8–10].

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Обоснование необходимости типизации трасс движения лесных машин и трелевочных систем по их несущей способности на склонах на многолетней мерзлоте.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

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

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Особенности выполнения лесосечных и лесохозяйственных работ при помощи лесных машин с различными видами движителей на склонах мерзлых и оттаивающих почвогрунтов в условиях криолитозоны изучены в работах [11–13], в которых установлены количественные связи между геотехническими параметрами трелевки и глубиной образованной колеи h_k как критерия работоспособности трелевочного волока или технологического коридора.

При работе на склоне мерзлого почвогрунта его несущая способность p_s достаточно высокая (более 70 кПа) и обеспечить работоспособность трасс движения лесных машин – трелевочных волоков или технологических коридоров удастся при достаточно большой нагрузке на поверхность склона даже от колесных движителей.

Однако в процессе оттаивания мерзлого почвогрунта происходят существенные изменения его физико-механических свойств, в первую очередь, деформационных и прочностных. Проблемы при перемещении лесных машин, и, особенно, трелевочных систем, возникают и при перемещении малообъемных грузов, как вниз по склону, так и особенно к его вершине.

Как установлено в результате исследований [14], циклическое промерзание и оттаивание краевой части массива почвогрунта существенно ослабляет связи между его агрегатами, что повышает сжимаемость почвогрунта, его фильтрационные способности и водопроницаемость. Способность почвогрунта накапливать и удерживать влагу в этом случае увеличивается.

Учитывая результаты данных исследований, можно предположить, что прочностные характеристики почвогрунта, а именно величина p_s , существенно снижается, достигая значений 30 кПа и менее, что сопоставимо с величиной давления q движителя на почвогрунт.

Поскольку массив оттаивающего грунта граничит с водонепроницаемым слоем мерзлого грунта (многолетней мерзлоты), в результате реализации отмеченных геомеханических процессов на склонах имеет место дифференцированное распределение влаги на различных участках трасс движения лесных машин, что обуславливает вариативность состояния показателя общей влажности W почвогрунта.

Наиболее высокие показатели W установлены в нижней части склона у его подошвы, наименьшие – у вершины, причем отличия достигают 30–50 и более процентов.

Влияние влажности на параметры паспорта прочности – величину сцепления C и угол внутреннего трения φ – установлено в работе [15] при обработке опытных данных для двух грунтов – суглинка и песка пылеватого.

При увеличении W с 20 до 36 % величина C для суглинка снизилась с 51 до 8 кПа, для песка – с 26 до 10 кПа, а угол φ – соответственно с 32° до 10° и с 36° до 33° .

Показатель влажности влияет и на динамические деформационные свойства мерзлых и оттаивающих почвогрунтов (слоев многолетней и сезонной мерзлоты), что необходимо учитывать при движении лесной машины или трелевочной системы по склону с выраженным рельефом и неровностями, например, по раздробленному склону.

Так, на рис. 1 представлено на основании опытных данных [16], влияние показателя W , % на величину динамического модуля сдвига G мерзлой коалиновой глины ($\text{Па} \cdot 10^9$). Для оттаивающей глины при положительных температурах характер связи аналогичный, но абсолютные значения G ниже в 1,5–2 раза до $1,3 \cdot 10^9$ Па.

Анализ данных рис. 1 показывает, что с ростом влажности W вплоть до своего предела текучести $W_T = 40\text{--}45\%$, возникающие деформации в почвогрунте под воздействием движителя приводят к более высоким показателям касательных напряжений сдвига τ , что нарушает целостность массива почвогрунта и способствует росту глубины колеи.

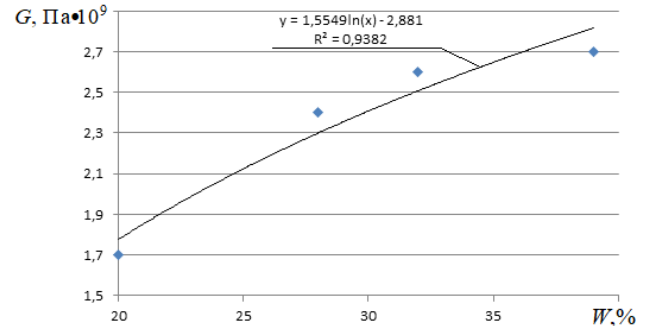


Рис. 1. Влияние влажности на динамический модуль сдвига

Следуя положениям [15], будем считать, что лесная машина на поверхности склона с углом наклона α к линии горизонта расположена от его подошвы на расстоянии L .

Тогда коэффициент влажности K_W , равный отношению W к W_T , определяется с помощью соотношения:

$$K_W = 0,9 - 0,4 \frac{L \sin \alpha}{H_{OT}}, \quad (1)$$

где H_{OT} – мощность оттаивающего слоя почвогрунта, граничащего с мерзлым слоем.

С учетом коэффициента влажности K_W параметры паспорта прочности для суглинка определяются как:

$$\begin{aligned} C &= C_c(-1,091 K_W + 1,3189), \quad \varphi = \\ &= \varphi_c(-0,904 K_W + 1,3693), \\ \tau &= C + q \cdot \operatorname{tg} \varphi, \end{aligned} \quad (2)$$

где нижний индекс «с» соответствует показателям почвогрунта в сухом состоянии (менее 20 %); q – нормальное (вертикальное) давление движителя на почвогрунт в пределах пятна контакта площадью $S = \pi a^2$ с радиусом a , τ – предельное касательное напряжение (сопротивление сдвигу) на кривой огибающей Мора.

В дополнении к сказанному, в процессе перемещения лесные машины, и, особенно, трелевочные системы (трактор + пачка лесоматериалов) совершают маневрирование, отклоняясь на угол θ от осевого направления движения в границах волока, что оказывает влияние на возникновение дополнительных касательных напряжений, увеличивающих объем разрушения краевой части массива и приводит к увеличению показателя h_k .

В работе [15], на основании моделирования процесса разрушения почвогрунта с учетом маневрирования движителя на равнинной местности, установлено соотношение для определения h_k :

$$h_k = a \left[\frac{q}{2\tau} (1-\gamma)(1+\sin 2\theta) \right]^{1/n}. \quad (3)$$

Коэффициент n в показателе степени $1/n$ зависит от геометрической формы k пятна контакта движителя и коэффициента Пуассона ν и выражается как:

$$n = k - \gamma/2, \quad \gamma = \nu / (1 - \nu), \quad (4)$$

где $k = 3, 2, 1$ устанавливают в зависимости от формы контакта – соответственно сферического, цилиндрического или плоского.

В дальнейших расчетах в силу того, что при работе на склонах в большей части случаев используют тракторы с гусеничным движителем или колесные тракторы с оснащением их tandemных мостов моногусеницами, будем считать пятно контакта плоским и принимаем коэффициент $k = 1$.

Коэффициент Пуассона ν в моделях разрушения почвогрунтов с внутренним трением является параметром связи между радиальными σ_r и тангенциальными σ_θ компонентами плоского поля напряжений:

$$\sigma_\theta = \gamma \sigma_r, \quad (5)$$

приращение которых формирует величину напряженного сдвига в процессе деформирования почвогрунта.

Как следует из соотношений (4) и (5) при влажности, стремящийся к своему пределу текучести, т. е. когда в почвогрунте проявляется эффект солифлюкции, коэффициент Пуассона $\nu \rightarrow 0,5$. В этом случае коэффициент $\gamma \rightarrow 1$, компоненты тензора напряжений в силу (5) совпадают, что приводит к состоянию всестороннего сжатия оттаивающего почвогрунта. Как отмечалось выше, в этом состоянии концентрация влаги в почвогрунте максимальная.

Таким образом, коэффициент Пуассона является одним из наиболее важных параметров в моделях деформирования переувлажненных оттаивающих почвогрунтов с внутренним трением применительно к работам на склонах с дифференцированным распределением влаги на отдельных его участках.

Расчетным путем определить ν представляет весьма трудную задачу, в связи с чем, коэффициент Пуассона определяют в лабораторных условиях на образцах. Очевидно, что данные в образцах и в натурных условиях отличаются значительно.

На рис. 2 представлена зависимость ν от W , %, где кривая 1 – данные аппроксимации в ходе исследований [12] лабораторных испытаний на образцах мерзлых и оттаивающих почвогрунтов, полученных в [17]. С высоким коэффициентом детерминации связь описывается логарифмической зависимостью.

Прямая 2 на рис. 2 получена на основании определения коэффициента Пуассона ν как $1/100$ от показателя общей влажности W в процентах. Оценки показали, что относительная погрешность при таком определении ν не выходит за пределы 3–5 %.

Поскольку определить влажность почвогрунта в натурных условиях можно оперативно и достоверно с помощью различных способов, в частности, с использованием откалиброванных влагомеров, то и оценить коэффициент Пуассона на склоне оттаивающего почвогрунта можно с достаточно высокой точностью.

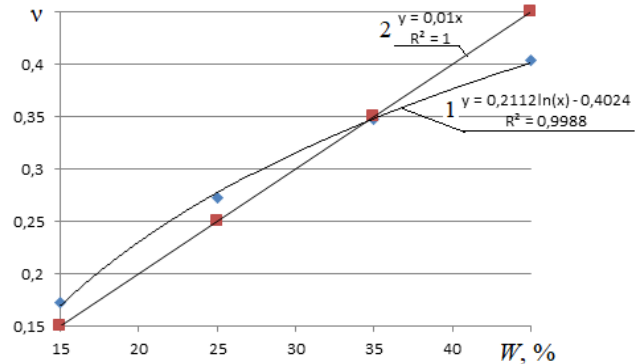


Рис. 2. Зависимость коэффициента Пуассона от влажности

Этот вывод заслуживает особого внимания, поскольку существенное (в ряде случаев, кратное) отличие влажности W вблизи подошвы склона и его вершины обусловит адекватное отличие напряженно-деформированных состояний краевой части массива почвогрунта и реализации механизма его разрушения на различных участках трелевочного волока или технологического коридора.

Сделаем вывод. При высокой влажности оттаивающего почвогрунта на склоне на многолетней мерзлоте под воздействием статической и динамической нагрузки от лесной машины или трелевочной системы его сжимаемость существенно возрастает, что способствует росту деформаций, увеличению объема разрушения, образованию более глубокой колеи и, в конечном счете, снижению работоспособности ездовой поверхности трелевочного волока или технологического коридора.

Дополнительные деформации возникают и при осуществлении маневра движителя.

Выразим угол поворота θ из соотношения (3):

$$\theta = 0,5 \arcsin \left[2\tau \frac{(h_k / a)^n}{q(1-\gamma)} - 1 \right]. \quad (6)$$

С учетом связей (1) и (2), величина τ , входящая в (6), и коэффициенты n и γ зависят от параметров склона через коэффициент влажности K_W .

Это позволяет при определении угла маневрирования θ учесть свойства оттаивающего почвогрунта на различных участках склона и основные геотехнические параметры перемещения лесной машины или трелевочной системы.

Рассмотрим наиболее сложные условия выполнения лесосечных и лесохозяйственных работ, когда показатель влажности W может достигать своего предела текучести W_T , что требует применения специальных средств перемещения груза общим весом Q как в направлении вершины склона так и к его подошве с использованием гусеничных движителей и, при необходимости, лебедки (самоходной или интегрированной в трансмиссию) с минимизацией мощности силы тяги N движителя.

В [18] установлено соотношение на ограничение N :

$$N \leq S \nu \left[p_s \sqrt{\frac{h_k}{a}} + C + q \operatorname{tg} \varphi - \frac{Q}{S} (\sin \alpha + \chi \cos \alpha) \right], \quad (7)$$

где v – скорость движения лесной машины или трелевочной системы; χ – коэффициент трения гусеницы о влажный почвогрунт.

Из (7) выразим относительную величину глубины колеи:

$$\frac{h_k}{a} = \left\{ \frac{1}{p_s} \left[\frac{N}{vS} + q(\sin\alpha + \chi\cos\alpha - \operatorname{tg}\varphi) - C \right] \right\}^2, \quad (8)$$

которую будем использовать в (6) при определении угла маневрирования θ .

Расчеты выполнялись при следующих параметрах и переменных:

- используется трактор John Deer 9RT с номинальной мощностью $N_m = 419,2$ кВт (570 л.с.), весом 5,8 т с максимальной нагрузкой до 9,072 т. Таким образом, суммарный вес Q в расчетах изменялся от 5,8 до 14,872 т, $S = 5,3884$ м², $v = 1$ м/с, $\chi = 0,05$.

- угол наклона склона α изменялся от 0 до 35°, параметры L и H_{OT} – переменные и варьировались в диапазоне соответственно от 3 до 25 м и от 5–20 м;

- почвогрунт представлял собой оттаивающий суглинок с характеристиками в сухом состоянии: $C_c = 20$ кПа, $\varphi_c = 24^\circ$, $p_{sc} = 96$ кПа.

Коэффициент влажности K_W варьировался от 0,39 ($W = 18\%$) до 0,94 ($W = 42\%$), при этом величина несущей способности уточнялась по формуле

$$p_s = p_{sc}(-1,1579 K_W + 1,3689). \quad (9)$$

На рис. 3 показано влияние коэффициента K_W на величину угла θ° .

Данные рис. 3 получены при фиксированных значениях: $\alpha = 15^\circ$, $Q = 14$ т, $q = 25,95$ кПа.

Параметры размещения лесной машины на склоне устанавливались таким образом, что коэффициент влажности K_W у подошвы склона достигал 0,8 ($W = 36\%$), а на вершине – 0,39 ($W = 18\%$).

Для того чтобы диапазон изменения глубины колеи находился в нормативных границах, с помощью соотношения (8) установлено, что мощность силы тяги движителя лежит в границах $N = 100,6$ –155,1 кВт. Коэффициент мощности силы тяги $K_N = N/N_m$ снижается с 0,37 до 0,24 по мере увеличения влажности с 18 до 36 %.

Как видим из анализа данных рис. 3, влажность является существенным фактором ограничения маневрирования лесной машины или трелевочной системы на склоне оттаивающего почвогрунта при необходимости поддержания работоспособности ездовой поверхности трелевочного волока или технологического коридора.

Как показали расчеты, при дальнейшем росте W до уровней 40–42 % ($K_W = 0,88$ –0,94) и проявлении эффекта солифлюкции почвогрунта, выдержать значения глубины колеи в пределах $h_k \leq 0,1$ м при фиксированных параметрах Q и q не представляется возможным.

Так, при $W = 40\%$ при снижении K_N до 0,22 и предельном угле $\theta = 15$ –16° глубина колеи достигает $h_k = 0,20$ м.

Дальнейший рост W до 42 % обуславливает необходимость снижения K_N до 0,21, существенного снижения допустимого угла θ до уровня 6–7°, при этом глубина колеи возрастает до $h_k = 0,35$ м.

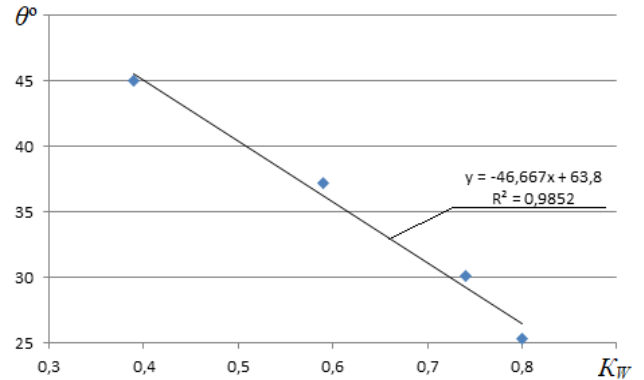


Рис. 3. Влияние коэффициента влажности на величину угла маневрирования

Данные рис. 4 и 5 иллюстрируют эти выводы.

Так, на рис. 4 отражено влияние коэффициента K_W на h_k , м. Экспоненциальная зависимость содержит две ветви – асимптотическую (пологую) при $K_W \leq 0,75$ –0,8 и крутую при $K_W > 0,8$.

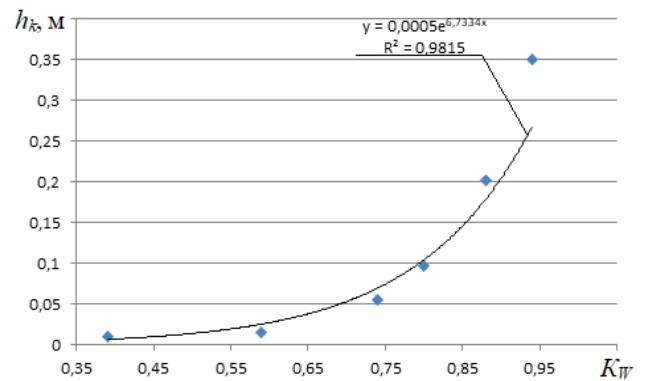


Рис. 4. Влияние влажности на глубину колеи

Это означает, что с приближением показателя влажности к своему пределу текучести, необходимы специальные технические возможности по стабилизации показателей перемещения по склону лесных машин и трелевочных систем на их базе.

К числу таких возможностей следует отнести снижение веса трелевочных систем, применение колесных движителей с низким давлением в шинах, оснащение тандемных мостов моногусеницами. Если колесная лесная машина не имеет тандемных мостов, или не все мосты тандемные, то в этом случае колеса часто оснащают цепями противоскольжения, особенно в зимнее время года, в сырую погоду, на крутых склонах.

Следует отметить и практику использования при работе лесных машин на склонах отдельных самоходных лебедок, или лебедок, интегрированных в трансмиссию лесных машин, которые существенно повышают эффективность и безопасность работ [19–22]. В этом случае, необходимо ограничить мощность силы тяги движителя в пользу большего использования силы тяги лебедки.

На рис. 5 показано влияние состояния влажности почвогрунта на склоне (коэффициент K_W) на допустимый уровень использования мощности N (коэффициент K_N).

В отличие от выводов по рис. 4, экспоненциальная кривая на рис. 5 более пологая и явного сопряжения ниспадающей и асимптотической ветвей не наблюдается.

Тем не менее, анализ и сопоставление абсолютных значений K_N в этом случае позволяют заключить, что основное снижение параметра мощности N имеет место при влажности с коэффициентом $K_W \leq 0,6-0,65$, т. е. при переходе состояния влажности почвогрунта от сухого до своего предела пластичности $W_n = 25-27\%$ ($K_W \leq 0,60-0,65$).

Как показали результаты исследований (рис. 6) при фиксированных параметрах Q , q , N , v и W и изменении только угла наклона склона α величина допустимого угла θ маневрирования существенно меняется, причем наибольшее снижение угла θ наблюдается при увеличении угла α более $15-20^\circ$.

Зависимость угла θ от веса лесной машины или трелевочной системы Q через величину давления на почвогрунт q определяется зависимостью (6), в соответствии с которой $\theta \sim \arcsin(1/q)$.

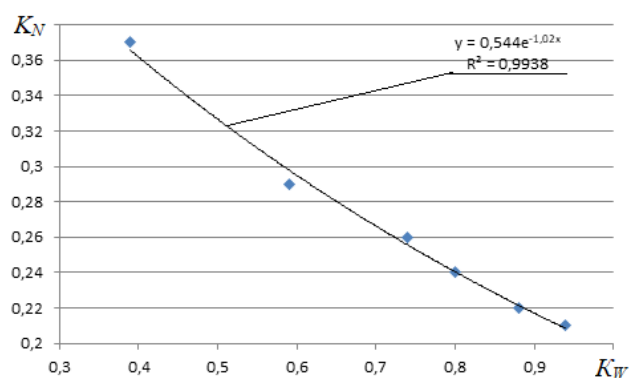


Рис. 5. Влияние влажности на мощность силы тяги движителя

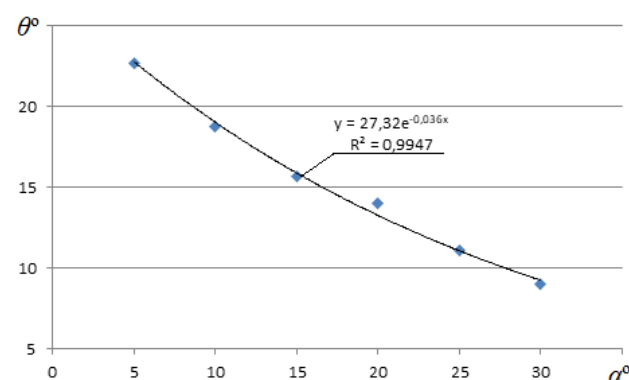


Рис. 6. Зависимость угла маневрирования от угла наклона склона

Так при снижении Q с 14 до 8 т и q с 26 до 14,85 кПа (на 75,2 %) величина θ допускает увеличения практически на те же 75,1 % с 9 до 15,75°, т. е. имеет место линейная обратно пропорциональная зависимость.

Если обратиться к классификации геотехнических условий лесозаготовительных работ, то принято подразделять склоны на пологие с уклоном наклона до 10° , покатые – $\alpha = 10-20^\circ$, крутые – $\alpha = 21-30^\circ$, и очень крутые с показателем α более 30° [23].

Данные рисунка 6 позволяют заключить, что особое внимание к выбору направлений трелевочных волоков и технологических коридоров с точки зрения возможных маневров движителя должно быть уделено условиям работ на крутых и очень крутых склонах, регламентирующих минимальные отклонения от магистрального направления движения лесной машины или трелевочной системы.

ВЫВОДЫ

Выполненные исследования позволяют сделать ряд выводов и сформулировать конкретные практические рекомендации:

1. При планировании лесозаготовительных работ на склонах оттаивающих почвогрунтов гидрогеологическим и техническим службам лесопромышленных предприятий и лесохозяйственных организаций необходимо произвести районирование участков по критерию влажности и составить их классификацию.

2. Для каждой категории участков необходимо произвести оценку работоспособности трасс движения – трелевочных волоков и технологических коридоров с указанием допустимых диапазонов глубины колеи и угла маневрирования лесных машин или трелевочных систем.

3. При проявлении эффекта солифлюкции почвогрунтов выбор типа движителя, предельного веса груза и величины давления на почвогрунт, а также меры соотношения использования мощности силы тяги движителя и специальных лебедок должны базироваться на предварительных оценках особенностей процесса образования колеи и маневрирования движителя в краевой части массива оттаивающего почвогрунта.

4. Унификация отмеченных выше геотехнических условий является основой разработки нормативного документа в виде «Альбома технологических схем лесозаготовки на склонах криолитозоны» с методическими указаниями по его использованию.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Обоснование целесообразности использования бесчелюстных трелевочных тракторов на лесосечных работах / А. И. Помигуева, О. А. Куницкая, А. С. Швецов [и др.] // Вестник АГАТУ. 2024. № 3 (15). С. 44–102.
2. 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.
3. 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.
4. 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.

5. Основные правила безопасной эксплуатации универсальных лесозаготовительных машин / О. А. Куницкая, А. А. Кривошеев, А. С. Швецов [и др.] // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. 2023. № 6. С. 33–42.
6. Экологическая безопасность лесных машин на полугусеничном ходу / А. С. Дмитриев, И. С. Должиков, О. А. Куницкая [и др.] // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. 2023. № 5. С. 44–51.
7. Рябухин П. Б., Куницкая О. А., Григорьева О. И. Обоснование технологических процессов и систем машин для лесосечных работ // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2023. № 2 (392). С. 88–105.
8. Перспективы использования колесных тракторов малого и среднего класса для тяги для выполнения лесохозяйственных работ / И. С. Должиков, О. А. Куницкая, А. А. Кривошеев [и др.] // Повышение эффективности лесного комплекса : материалы Девятой Всероссийской национальной научно-практической конференции с международным участием. Петрозаводск, 2023. С. 75–76.
9. Обоснование параметров тракторов с колесно-гусеничным двигателем для малообъемных лесозаготовок / А. С. Дмитриев, И. С. Должиков, О. А. Куницкая [и др.] // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. 2024. № 6 (18). С. 44–53.
10. Повышение эффективности лесозаготовительного производства за счет использования сборно-разборных дорожных покрытий на транспортных операциях / М. В. Зорин, Д. В. Новгородов, А. М. Юдильевич [и др.] // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. 2024. № 6 (18). С. 33–43.
11. Особенности учета состояния массива мерзлых грунтов при циклическом взаимодействии с трелевочной системой / С. Е. Рудов, В. Я. Шапиро, И. В. Григорьев [и др.] // Лесотехнический журнал. 2019. Т. 9, № 1(33). С. 116–128.
12. Исследование процесса разрушения мерзлых и оттаивающих почвогрунтов при воздействии трелевочной системы / С. Е. Рудов, В. Я. Шапиро, И. В. Григорьев [и др.] // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2020. № 2 (374). С. 101–117.
13. 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.
14. Царапов М. Н., Калабина М. В. Определение угла внутреннего трения слабодистого мерзлого грунта при оттаивании // Фундаменты глубокого заложения и проблемы геотехники территорий : материалы II Всероссийской конференции с международным участием. Пермь, 2021. С. 132–146.
15. Геотехническое обоснование работоспособности трелевочных волоков и технологических коридоров на склонах оттаивающих почвогрунтов при работе лесных машин с колесным и полугусеничным двигателем / В. А. Каляшов, В. Я. Шапиро, И. В. Григорьев [и др.] // Resources and Technology. 2023. Т. 20, № 3. С. 15–31.
16. Мирный А. Ю., Идрисов И. Х., Мосина А. С. Динамические свойства мерзлых грунтов. Часть 1. Испытания в резонансной колонке // Геоинфо. 2024. Т. 6, № 1/2. С. 28–35.
17. Цытович Н. А. Механика мерзлых грунтов. М. : Высшая школа, 1983. 228 с.
18. Формирование колеи двигателем лесной машины на склоне оттаивающего почвогрунта криолитозоны с учетом эффекта солифлюкции / В. А. Каляшов, В. Я. Шапиро, И. В. Григорьев [и др.] // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2024. № 3 (399). С. 140–152.
19. Современные технические решения для обеспечения безопасной работы лесных машин на горных склонах / В. А. Каляшов, Т. А. До, О. И. Григорьева [и др.] // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. 2022. № 2. С. 11–25.
20. Современные системы машин и технологии заготовки древесины и лесовосстановления в условиях горных лесосек / В. А. Каляшов, А. До Туан, Е. Г. Хитров [и др.] // Resources and Technology. 2022. Т. 19. № 2. С. 1–47.
21. Теоретические исследования работы лесных машин с гусеничным двигателем на склонах / Т. А. До, Г. В. Григорьев, В. А. Каляшов [и др.] // Resources and Technology. 2022. Т. 19. № 3. С. 1–29.
22. Оценка тягово-сцепных свойств двигателя лесной гусеничной машины, работающей на склоне / Т. А. До, Г. В. Григорьев, В. А. Каляшов [и др.] // Системы. Методы. Технологии. 2022. № 2 (54). С. 78–84.
23. Методика и результаты экспериментальных исследований воздействия лесных машин с гусеничным двигателем на почвогрунты на склонах / Т. А. До, Г. В. Григорьев, В. А. Каляшов [и др.] // Resources and Technology. 2022. Т. 19. № 4. С. 64–84.

REFERENCES

1. Obosnovanie ce-lesoobraznosti ispol'zovaniya beschokernykh trelevochnykh traktorov na lesosechnykh rabotah / A. I. Pomigueva, O. A. Kunickaya, A. S. Shvecov [et al.] // Vestnik AGATU. 2024. № 3 (15). С. 44–102.
2. Skobcov I. G., Kunickaya O. A. Trebovaniya standartov po bezopasnosti pri rabote na lesnykh mashinah // Bezopasnost' i ohrana truda v lesozagotovitel'nom i derevoobrabatyvayushchem proizvodstvah. 2022. № 1. С. 51–56.
3. Skobcov I. G., Kunickaya O. A. Obzor konstruktivnykh reshenij zashchitnykh ustroystv kabin lesnykh mashin // Bezopasnost' i ohrana truda v lesozagotovitel'nom i derevoobrabatyvayushchem proizvodstvah. 2022. № 1. С. 60–69.
4. Skobcov I. G., Kunickaya O. A. Issledovanie dinamicheskikh nagruzok, dejstvuyushchih na kabinu lesnoj mashiny pri razlichnykh variantah vozniknoveniya avarijnykh situacij // Bezopasnost' i ohrana truda v lesozagotovitel'nom i derevo-obrabatyvayushchem proizvodstvah. 2022. № 3. С. 28–39.
5. Osnovnye pravila bezopasnoj ekspluatatsii universal'nykh lesozagotovitel'nykh mashin / O. A. Kunickaya, A. A. Krivosheev, A. S. Shvecov [et al.] // Bezopasnost' i

ohrana truda v lesozagotovitel'nom i derevoobrabatyvayushchem proizvodstvah. 2023. № 6. S. 33–42.

6. Ekologicheskaya bezopasnost' lesnyh mashin na polugusenichnom hodu / A. S. Dmitriev, I. S. Dolzhikov, O. A. Kunickaya [et al.] // Bezopasnost' i ohrana truda v lesozagotovitel'nom i derevoobrabatyvayushchem proizvodstvah. 2023. № 5. S. 44–51.

7. Ryabuhin P. B., Kunickaya O. A., Grigor'eva O. I. Obosnovanie tekhnologicheskikh processov i sistem mashin dlya lesosechnykh rabot // Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Lesnoj zhurnal. 2023. № 2 (392). S. 88–105.

8. Perspektivy ispol'zovaniya kolesnykh traktorov malogo i srednego klassa dlya tyagi dlya vypolneniya lesohozyajstvennykh rabot / I. S. Dolzhikov, O. A. Kunickaya, A. A. Krivosheev [et al.] // Povyshenie effektivnosti lesnogo kompleksa : materialy Devyatoj Vserossijskoj nacional'noj nauchno-prakticheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem. Petrozavodsk, 2023. S. 75–76.

9. Obosnovanie parametrov traktorov s kolesno-gusenichnym dvizhitelem dlya maloob'emnykh lesozagotovok / A. S. Dmitriev, I. S. Dolzhikov, O. A. Kunickaya [et al.] // Bezopasnost' i ohrana truda v lesozagotovitel'nom i derevoobrabatyvayushchem proizvodstvah. 2024. № 6(18). S. 44–53.

10. Povyshenie effektivnosti lesozagotovitel'nogo proizvodstva za schet ispol'zovaniya sbornorazbornykh dorozhnykh pokrytij na transportnykh operacijah / M. V. Zorin, D. V. Novgorodov, A. M. Yudilevich [et al.] // Bezopasnost' i ohrana truda v lesozagotovitel'nom i derevoobrabatyvayushchem proizvodstvah. 2024. № 6 (18). S. 33–43.

11. Osobennosti ucheta sostoyaniya massiva merzlykh gruntov pri ciklicheskom vzaimodejstvii s trelevochnoj sistemoj / S. E. Rudov, V. Ya. Shapiro, I. V. Grigor'ev [et al.] // Lesotekhnicheskij zhurnal. 2019. T. 9, № 1(33). S. 116–128.

12. Issledovanie processa razrusheniya merzlykh i ottaivayushchih pochvogruntov pri vozdejstvii trelevochnoj sistemy / S. E. Rudov, V. Ya. Shapiro, I. V. Grigor'ev [et al.] // Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Lesnoj zhurnal. 2020. № 2 (374). S. 101–117.

13. Modelirovanie vzaimodejstviya lesnyh mashin s pochvogruntom pri rabote na sklonah / S. E. Rudov, V. Ya. Shapiro, I. V. Grigor'ev [et al.] // Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Lesnoj zhurnal. 2021. № 6(384). S. 121–134.

14. Carapov M. N., Kalabina M. V. Opredelenie ugla vnutrennego treniya slabol'distogo merzlogo grunta pri

ottaivanii // Fundamenty glubokogo zalozeniya i problemy geotekhniki territorij : materialy II Vserossijskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem. Perm', 2021. S. 132–146

15. Geotekhnicheskoe obosnovanie rabotosposobnosti trelevochnykh volokov i tekhnologicheskikh koridorov na sklonah ottaivayushchih pochvogruntov pri rabote lesnyh mashin s kolesnym i polugusenichnym dvizhitelem / V. A. Kalyashov, V. Ya. Shapiro, I. V. Grigor'ev [et al.] // Resources and Technology. 2023. T. 20, № 3. S. 15–31.

16. Mirnyj A. Yu., Idrisov I. H., Mosina A. S. Dinamicheskie svoystva merzlykh gruntov. Chast' 1. Ispytaniya v rezonansnoj kolonke // Geoinfo. 2024. T. 6, № 1/2. S. 28–35.

17. Cytovich N. A. Mekhanika merzlykh gruntov. M. : Vysshaya shkola, 1983. 228 s.

18. Formirovanie kolei dvizhitelem lesnoj mashiny na sklone ottaivayushchego pochvogrunta kriolitozony s uchedom effekta soliflyukcii / V. A. Kalyashov, V. Ya., Shapiro I. V. [Grigor'ev et al.] // Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Lesnoj zhurnal. 2024. № 3(399). S. 140–152.

19. Sovremennye tekhnicheskie resheniya dlya obespecheniya bezopasnoj raboty lesnyh mashin na gornyx sklonah // V. A. Kalyashov, T. A. Do, O. I. Grigor'eva [et al.] Bezopasnost' i ohrana truda v lesozagotovitel'nom i derevoobrabatyvayushchem proizvodstvah. 2022. № 2. S. 11–25.

20. Sovremennye sistemy mashin i tekhnologii zagotovki drevesiny i lesovosstanovleniya v usloviyakh gornyx lesosek / V. A. Kalyashov, A. Do Tuan, E. G. Hitrov [et al.] // Resources and Technology. 2022. T. 19. № 2. S. 1–47.

21. T. A. Do, G. V. Grigor'ev, V. A. Kalyashov [et al.] Teoreticheskie issledovaniya raboty lesnyh mashin s guse-nichnym dvizhitelem na sklonah // Resources and Technology. 2022. T. 19, № 3. S. 1–29.

22. Ocenka tyagovo-scepnnykh svoystv dvizhitelya lesnoj guse-nichnoj mashiny, rabotayushchej na sklone / T. A. Do, G. V. Grigor'ev, V. A. Kalyashov [et al.] // Sistemy. Metody. Tekhnologii. 2022. № 2 (54). S. 78–84.

23. Metodika i rezul'taty eksperimental'nykh issledovaniy vozdejstviya lesnyh mashin s gusenichnym dvizhitelem na pochvogrunty na sklonah / Do T. A., Grigor'ev G. V., Kalyashov V. A. [et al.] // Resources and Technology. 2022. T. 19. № 4. S. 64–84.

© Шапиро В. Я., Новиков М. С.,
Григорьев И. В., Перфильев П. Н.,
Тихонов Е. А., Друзьянова В. П.. 2025