

УДК 674.81

DOI: 10.15393/j2.art.2021.5723

Статья

Оценка работоспособности трелёвочного волока на склоне массива оттаивающего почвогрунта при циклических статических нагрузках

Каляшов Виталий Анатольевич

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

Шапиро Владимир Яковлевич

доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С. М. Кирова (Российская Федерация), shapiro54vlad@mail.ru

Григорьев Игорь Владиславович

доктор технических наук, профессор, Арктический государственный агротехнологический университет (Российская Федерация), silver73@inboxl.ru

Куницкая Ольга Анатольевна

доктор технических наук, профессор, Арктический государственный агротехнологический университет (Российская Федерация), ola.ola@mail.ru

Григорьева Ольга Ивановна

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

Получена: 27 апреля 2021 / Принята: 19 июня 2021 / Опубликовано: 30 июня 2021

Аннотация: Лесные массивы, расположенные на склонах, в т. ч. на крутых и очень крутых, относятся к особо ранимым экосистемам и требуют ответственного отношения при проектировании лесосечных работ, а также при обосновании выбора системы машин и режимов их работы. Особые в этом отношении лесные массивы на склонах в условиях вечной мерзлоты. Наиболее энергоёмкой и экологически вредной операцией лесосечных работ является трелёвка, которая может выполняться при помощи трелёвочных тракторов в полностью

погруженном, полупогруженном, или полуподвешенном положении. В настоящее время при разработке лесосек на склонах редко используют канатные трелёвочные установки. Как правило, используются лесные машины, оснащённые лебёдками, реже применяются обычные лесные машины, которые перемещают по склонам при помощи специальных самоходных лебёдок T-winch. Как известно, трелёвка — это перемещение лесоматериалов от места валки деревьев до места погрузки на лесовозный транспорт. При разработке лесосек на склонах, с равной степенью вероятности, погрузочный пункт (верхний склад) может быть как наверху склона, так и у его подошвы. Если при разработке схемы освоения лесного массива есть возможность выбора расположения трассы лесовозной дороги относительно склона, то появляется необходимость обоснования этого выбора, в т. ч. и по экологическому критерию — степени воздействия на почву лесосеки, которая также существенно сказывается на проходимости лесных машин и трелёвочных систем на их базе, что значительно влияет на производственные показатели их работы.

Ключевые слова: леса на склонах, лесосечные работы, трелёвка, почвогрунты, леса на вечной мерзлоте

DOI: 10.15393/j2.art.2021.5723

Article

Assessment of the efficiency of the skidding track on the slope of the thawing soil mass under cyclic static loads

Vitalij Kalyashov

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

Vladimir Shapiro

D. Sc. in engineering, professor, St. Petersburg State Forest Engineering University named after S. M. Kirov (Russian Federation), shapiro54vlad@mail.ru

Igor Grigorev

D. Sc. in engineering, professor, Arctic State Agrotechnological University (Russian Federation), silver73@inboxl.ru

Ol'ga Kunickaya

D. Sc. in engineering, professor, Arctic State Agrotechnological University (Russian Federation), ola.ola@mail.ru

Olga Grigoreva

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

Received: 27 April 2021 / Accepted: 19 June 2021 / Published: 30 June 2021

Abstract: Forests located on steep and very steep slopes are particularly vulnerable ecosystems and require a particularly responsible attitude when designing logging operations and justifying the choice of the machine system and their operating modes. This is especially true for forests on slopes in permafrost conditions. The most energy-intensive and environmentally harmful operation of logging operations is skidding, which can be performed using skidding tractors in fully submerged, semi-submerged, or semi-suspended positions. Currently, rope skidders are rarely used in the development of cutting areas on the slopes. More often forest machines are equipped with winches, less often conventional forest machines move along the slopes using special self-propelled T-winches. Skidding is known as the movement of timber from the place of tree felling to the place of loading on logging transport. When cutting areas are developed on slopes, with equal probability the loading point (upper timber landing) may be located both at the

top of the slope and at its bottom. If it is possible to choose the location of the route of a logging road relative to the slope, this choice should be justified. The environmental criterion – the degree of impact on the soil of the cutting area should be taken into account. The skidding impact severity also significantly affects the cross-country capability of forest machines and skidding systems based on them, and significantly affects the production performance of their work.

Keywords: forests on slopes, logging operations, skidding, soils, forests on permafrost

1. Введение

При производстве лесозаготовительных работ на склонах, сложенных слоями массивов оттаявшего, оттаивающего и мёрзлого почвогрунтов, возникают особые условия, связанные с существенными различиями их состояния устойчивости и прочности [1], [2]. Это обуславливает, в конечном итоге, дифференциацию несущей способности отдельных участков трелёвочного волока при многократном статическом воздействии на них движителя лесной машины или трелёвочной системы.

В том случае, когда участок трелёвочного волока в зоне оттаивания контактирует с водонепроницаемой границей зоны мерзлоты, возникает избыток величины порового давления P_n , наблюдается высокая концентрация воды и почвогрунт наименее устойчив.

Однако поверхность склона способствует интенсивному оттоку воды, что повышает коэффициент её фильтрации из зоны оттаивающего почвогрунта, снижению величины P_n (его рассеиванию) по мере приближения к подошве склона.

2. Материалы и методы

Результаты исследований [3] свидетельствуют о том, что поровое давление прямо пропорционально толщине $H_в$ слоя воды и толщине $H_{от}$ слоя оттаивающего грунта, влажность (W , %) которого не постоянна: минимум W наблюдается на вершинах склона и максимум — на его подошве.

Указанные процессы изменения W в массиве оттаивающего почвогрунта происходят более интенсивно при многократном циклическом воздействии внешней статической нагрузки, создаваемой движителем лесной машины или трелёвочной системы.

Этот вывод подтверждается результатами исследований обезвоживания пропитанных образцов древесины в процессе их прессования [4] и результатами [5] оценки влияния параметра W на разрушение слоя коры при роторной окорке балансов.

Требования по ограничению грузоподъёмности форвардера обуславливают оптимальную работоспособность трелёвочного волока с нормативно допустимой глубиной колеи (h_k) после первого прохода, не превышающей 0,10 м.

Выдержать это требование в зонах оттаивающих переувлажнённых почвогрунтов ($W > 25—30\%$) чрезвычайно трудно, поскольку имеет место существенное превышение глубины колеи с достижением значений $h_k = 0,25—0,3$ м, а в некоторых случаях — 0,4—0,5 м.

Современные лесные машины и трелёвочные системы на их базе имеют несколько колёсных пар, и даже при одном проходе машины отдельный участок волока подвергается многократной (циклической) статической нагрузке. Это приводит к сжатию и уплотнению слоя почвогрунта [6] и, как следствие, для переувлажнённых оттаивающих участков — к увеличению рассеивания порового давления и оттоку влаги в нижележащие слои почвогрунта в пределах трелёвочного волока [7].

Если участок волока в зоне оттаивания непосредственно контактирует с мёрзлым массивом, процесс фильтрации воды и её переход из жидкого состояния в твёрдое носит вероятностный характер [8], а случайные процессы циклической трансформации влаги подчиняются закономерностям переходных состояний, в частности, в виде цепей Маркова, развитых в работах [9], [10].

Исследования [1], [2] показали, что минимальная влажность почвогрунта на верхних участка 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).

Таким образом, наиболее сложные условия взаимодействия лесной машины и трелёвочной системы с массивом почвогрунта при работе на склонах возникают при наличии слоя оттаивающего почвогрунта вблизи с водонепроницаемой границей зоны мерзлоты.

Надёжность прогноза устойчивости и работоспособности в целом трелёвочного волока при работах на склоне оттаивающего почвогрунта зависит от достоверности определения его прочности, т. е. величин сцепления C и угла внутреннего трения φ .

В работе [3] для таких условий работ дана оценка критерия устойчивости K локального участка оттаивающего массива на склоне с углом наклона α к линии горизонта:

$$K = \frac{tg\varphi}{tg\alpha} (1 - f) + \frac{c}{\sigma tg\alpha}, \quad (1)$$

где $f = \frac{\rho W}{\rho} (1 + \frac{H_B}{H_{от}})$, σ — величина нормального, перпендикулярного плоскости склона, давления, ρ_W — плотность воды. При $K > 1$ оттаивающий массив признаётся устойчивым.

По мере увеличения W до уровня значений $0,75W_T$ наблюдается снижение параметров C и φ по сравнению с аналогичными показателями C_c и φ_c , когда влажность примерно равна пределу пластичности и не превосходит 50 % предела текучести [11].

Так, величина C для почвогрунтов в диапазоне изменения W от уровня ниже предела пластичности до 75 % предела текучести W_T снижается практически на порядок с 75—150 до 10—15 кПа, а угол φ — кратно с 25 до 7°.

При этом одна из основных характеристик упругопластических и деформационных свойств грунтов — величина модуля общей деформации E — для указанного диапазона W снижается с 25—50 МПа до 1—3 МПа. При $W > 0,75W_T$ величина E достигает значений 0,3—0,5 МПа.

Введём безразмерный показатель относительной влажности грунта в виде $K_W = \frac{W}{W_T}$.

Опытные данные [1], [2] характеристик E , C и φ в диапазоне изменения K_W от 0,5 до 0,9 для четырёх образцов оттаивающих грунтов — супеси лёгкой, песка пылеватого, суглинка и супеси тяжёлой представлены в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики оттаивающего грунта в зависимости от K_W

Table 1. Characteristics of the thawing soil depending on the K_W

Нумерация грунтов	Характеристики	Показатель K_W						
		0,5	0,6	0,7	0,75	0,8	0,85	0,90
1. Супесь лёгкая	E , МПа	70	56	49	45	43	42	41
	C , кПа	15	14	12	11	10	9	8
	φ , °	37	36	35	34	34	34	33
2. Песок пылеватый	E , МПа	96	84	72	66	60	54	48
	C , кПа	25	22	14	12	11	10	9
	φ , °	37	36	35	35	34	33	32
3. Суглинок	E , МПа	108	75	41	34	29	25	24
	C , кПа	45	30	19	15	11	9	6
	φ , град	32	24	18	15	13	11	10
4. Супесь тяжёлая	E , МПа	108	72	46	38	32	27	26
	C , кПа	45	30	16	13	10	8	5
	φ , °	32	24	18	15	13	11	10

3. Результаты

Для сравнительного анализа приведённых в таблице 1 характеристик, приняв для каждой из них данные при $K_W = 0,75$ за единицу, на рисунках 1, 2 и 3 в безразмерном виде представлены зависимости коэффициентов K_E (рисунок 1), K_C (рисунок 2) и K_φ (рисунок 3), характеризующих снижение абсолютных значений E , C и φ с изменением коэффициента K_W . На рисунках 1, 2 и 3 нумерация линий соответствует нумерации грунтов в таблице 1.

Анализ данных рисунков 1, 2 и 3 показывает, что наиболее сильное влияние влажности сказывается на характеристиках суглинков и супеси тяжёлой, наиболее слабое — для песка пылеватого и особенно — супеси лёгкой.

Рассмотрим склон с углом наклона α к линии горизонта (рисунок 4), сложенный участком оттаявшего почвогрунта 1 высотой H_T и участком оттаивающего грунта 2 высотой H_{OT} . В основании склона присутствует слой воды 3 высотой H_θ , граничащий со слоем мёрзлого почвогрунта 4.

На поверхности 5 склона массив испытывает статическое воздействие трелёвочной системы весом Q , передаваемое почвогрунту через колесо (штамп) 6 радиусом R и шириной b . В ходе взаимодействия рама трелёвочной системы может совершать поворот под углом θ вокруг своей оси.

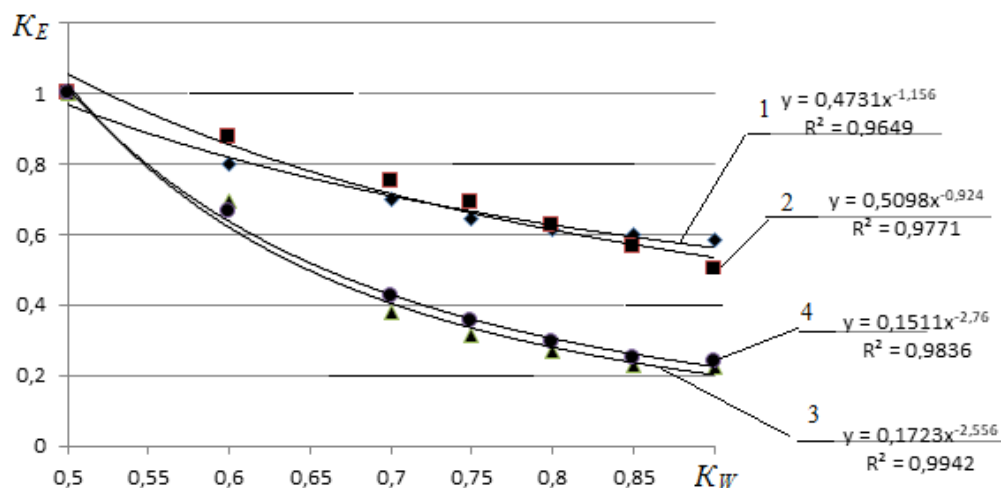


Рисунок 1. Зависимости K_E и (K_W) для оттаивающих грунтов: 1 — супесь лёгкая; 2 — песок пылеватый; 3 — суглинок; 4 — супесь тяжёлая

Figure 1. K_E (K_W) dependencies for thawing soils: 1 — Loamy light sand; 2 — powdery sand; 3 — loam; 4 — heavy sandy loam

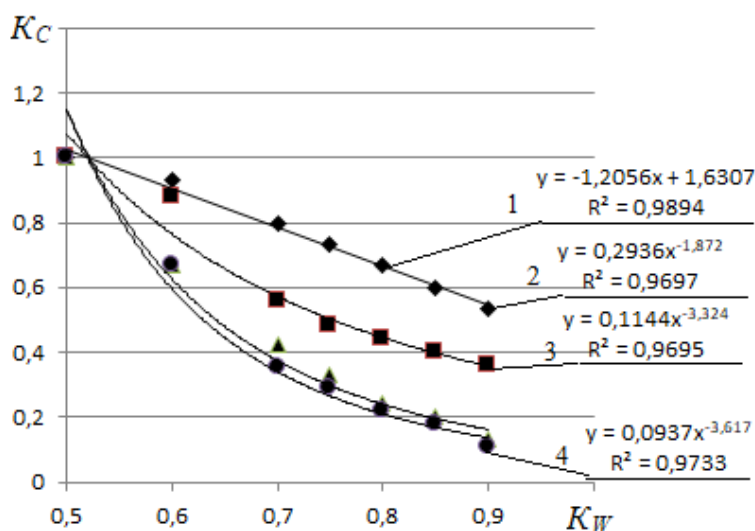


Рисунок 2. Зависимости K_C и (K_W) для оттаивающих грунтов: 1 — супесь лёгкая; 2 — песок пылеватый; 3 — суглинок; 4 — супесь тяжёлая

Figure 2. K_C (K_W) dependencies for thawing soils: 1 — Loamy light sand; 2 — powdery sand; 3 — loam; 4 — heavy sandy loam

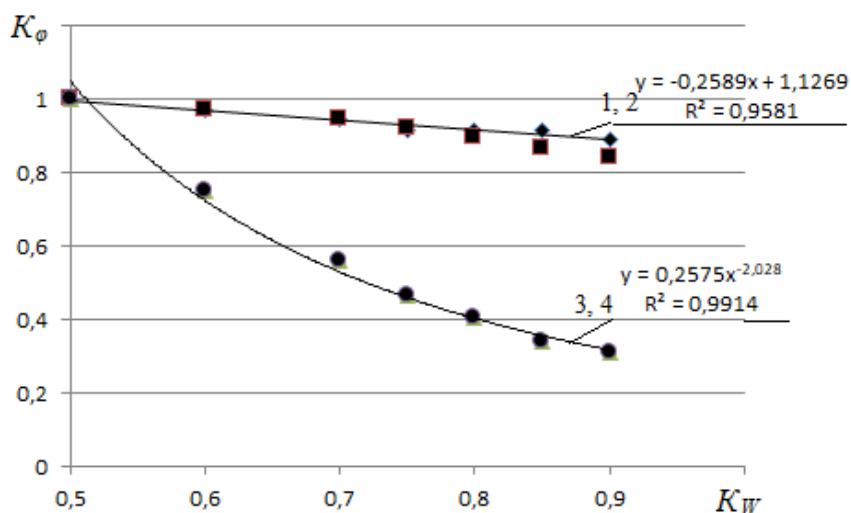


Рисунок 3. Зависимости K_ϕ и (K_W) для оттаивающих грунтов: 1 — супесь лёгкая; 2 — песок пылеватый; 3 — суглинок; 4 — супесь тяжёлая

Figure 3. K_ϕ (K_W) dependencies for thawing soils: 1 — Loamy light sand; 2 — powdery sand; 3 — loam; 4 — heavy sandy loam

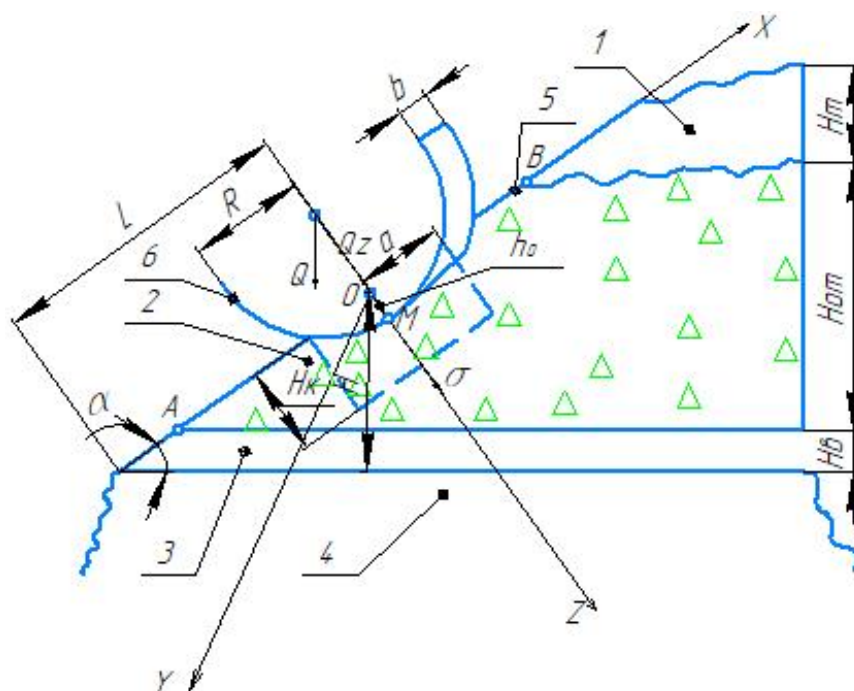


Рисунок 4. Схема взаимодействия штампа с массивом оттаивающего грунта на склоне

Figure 4. Diagram of the interaction of the stamp with an array of thawing soil on the slope

Поместим центр декартовой системы координат $xOyz$ в точку O приложения силы $Q_z = Q \cdot \cos\alpha$, действующей перпендикулярно к поверхности 5 при удалении точки O от подошвы склона на расстоянии L . Таким образом, штамп отстоит от мёрзлого массива почвогрунта 4 на расстоянии $H = L \cdot \sin\alpha$.

Если принять, что реализуются отмеченные выше механизмы фильтрации воды вследствие линейного рассеивания порового давления и допустить, что в точке B поверхности склона на границе зон оттаявшего и оттаивающего массива влажность близка к значениям $0,9W_T$, а в точке A на границе оттаявшего почвогрунта со слоем воды — $0,5W_T$, то для оценки величины K_W вдоль поверхности склона можно использовать линейное соотношение

$$K_W = 0,9 - 0,4 \frac{L \sin\alpha}{H_{от}}. \quad (2)$$

Таким образом, при перемещении штампа по поверхности склона и изменении расстояния L определяем с помощью соотношения (2) коэффициент K_W , после чего, основываясь на корреляционных зависимостях, представленных на рисунках 1, 2 и 3, находим для конкретного грунта абсолютные значения его характеристик — модуль общей деформации $E(K_W)$, величину сцепления $C(K_W)$ и угол внутреннего трения $\varphi(K_W)$.

Установленные характеристики определяют механизм разрушения массива оттаивающего почвогрунта сдвигом.

Максимальная тяга и обусловленная этим сила поверхностного трения оказывают влияние на величину сопротивления почвогрунта сдвигу τ , которая зависит от действующей нормальной (вертикальной) нагрузки σ , величин C и φ и в соответствии с обобщённым уравнением Кулона — Мора равна:

$$\tau(K_W) = C(K_W) + \sigma \cdot \operatorname{tg}\varphi(K_W), \quad (3)$$

Показатель σ_o начального давления штампа на почвогрунт при различном числе колёсных пар для трелёвочных систем заданного веса Q изменяется от 27 до 84 кПа.

Для определения параметров контактного разрушения грунта [12] и оценки глубины h_k образованной в нём колеи воспользуемся результатами математического моделирования [13—15].

Под действием силы Q_z в точке M контактной площадки радиусом a и глубиной контактного сближения h_o (рисунок 4) действует начальное давление σ_o , которое определяет радиальную (нормальную) σ_r и тангенциальную σ_θ (ортогональную σ_r) компоненты тензора напряжений в соответствии с соотношениями:

$$\sigma_r = \frac{\sigma_o}{(r/a)^n}; \quad \sigma_\theta = \gamma \sigma_r, \quad \gamma = \frac{\nu}{1-\nu}, \quad (4)$$

где $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ — радиальная координата, γ — коэффициент бокового распора, ν — коэффициент Пуассона, $n = k - \frac{\gamma}{2}$ — коэффициент затухания напряжений, зависящий от формы поверхности контакта штампа с краевой частью массива почвогрунта. Для штампа сферической формы $k = 3$, цилиндрической — 2, для плоского штампа — 1.

В соответствии с исследованием [9] и учётом коэффициента K_W контактные параметры a и h_o определим с помощью соотношений:

$$a = \sqrt[3]{\frac{3Q \cos \alpha (1 - \nu^2) R}{4E(K_W)}}; \quad h_o = a^2/R, \quad (5)$$

где R — радиус колеса, м, ν — коэффициент Пуассона.

Тогда главное касательное напряжение (напряжение сдвига) с учётом поворота рамы на угол θ и возникающих при этом дополнительных касательных напряжений равно:

$$\sigma_s = 0,5(\sigma_r - \sigma_\theta) \cdot (1 + \sin 2\theta), \quad (6)$$

которое при сравнении с величиной предела прочности на сдвиг τ в соответствии с выражением (3) определяет условие выполнения критерия разрушения.

Выполнив соответствующие преобразования, для определения глубины колеи после однократного воздействия штампа установлено соотношение

$$h_k = a(\alpha, K_W) \left\{ \sigma_o \frac{(1-\nu)(1+\sin 2\theta) - 2tg\varphi(K_W)}{2C(K_W)} \right\}^{1/n}. \quad (7)$$

Если обратиться к формуле (2) для определения коэффициента K_W и к введённым обозначениям на рисунке 4, то можно заключить, что величина

$$K_H = H/H_{OT} = L \sin \alpha / H_{OT} \quad (8)$$

точно идентифицирует местоположение участка волока с параметрами склона.

На рисунке 5 представлен график двумерной функции h_k , 10^{-2} от параметра K_H и угла $\theta, ^\circ$. Расчёты выполнены для следующих базовых условий:

$$Q = 12 \text{ т}, \sigma_o = 35 \text{ кПа}, R = 0,63 \text{ м}, b = 0,28 \text{ м}, k = 3, \nu = 0,25, C_c = 30 \text{ кПа}, \varphi_c = 15^\circ, \\ E_c = 1 \text{ МПа}, H_{OT} = 10 \text{ м}, H_e = 0,5, W_T = 40 \%, L = 20 \text{ м}, K_W = 0,56 (W = 22,4 \%). \quad (9)$$

Вариации переменных α, L, H_{OT} обусловили изменение K_H в широком диапазоне от 0,1 до 1.

Анализ результатов расчётов показывает существенное влияние параметра K_H на глубину колеи при любом изменении угла θ от 0 до 20° , причём доминирует именно фактор K_H .

Можно заключить, что даже при отсутствии какого-либо существенного маневрирования лесной машины или трелёвочной системы на склоне оттаивающего почвогрунта, если местоположение контактного участка волока характеризуется показателем $K_H < 0,5$, глубина колеи существенно превышает нормативное значение 0,1 м. Будем считать, что если при этом и критерий устойчивости $K < 1$, то данный участок волока характеризуется низкой работоспособностью.

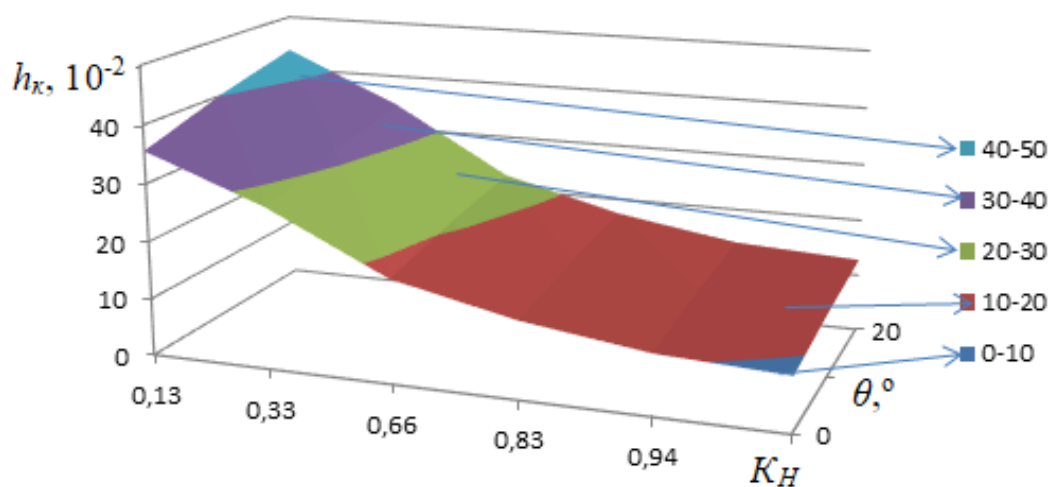


Рисунок 5. График двумерной функции $h_k(K_H, \theta)$

Figure 5. Graph of the two-dimensional function $h_k(K_H, \theta)$

Базируясь на исходных данных формулы (9), установим следующие параметры расчётов с целью выполнения условия $K_H < 0,5$ для оттаивающего массива суглинка на склоне с углом наклона $\alpha = 20^\circ$: $D = 0,55$ м, $H_{OT} = 5$ м, $W_T = 40\%$, $L = 7$ м, $K_W = 0,71$ ($W = 28,4\%$). Для таких значений параметр $K_H = 0,48$ и глубина колеи составила $h_k = 0,185$ м. При этом критерий устойчивости участка волокна равен: $K = 0,91$.

Сжатие слоя почвогрунта размером h при его изменении Δh от $h_o = 0,087$ м до $h_k = 0,185$ м при перепаде давления $\Delta\sigma$ от начального $\sigma_o = 35$ до 0 кПа приводит к тому, что часть жидкости переместится за пределы глубины колеи h_k в нижележащий слой почвогрунта, обеспечив увеличение общего показателя влажности W .

Отношение $\frac{\Delta\sigma}{\Delta h}$ есть величина отрицательная и с точностью до бесконечно малых может быть принята за частную производную $\frac{\partial\sigma}{\partial h}$ в соотношении линейного закона фильтрации Дарси для определения объёма перемещённой жидкости $V_{ж}$ за единицу времени в пределах пятна контакта:

$$V_{ж} = -\frac{\pi k}{\rho_w} \frac{\partial\sigma}{\partial h} a^2 \frac{1}{1 + \frac{h_k}{a}}, \quad (10)$$

где k — коэффициент фильтрации грунта (м/с), принимаемый для суглинков от 0,05 до $0,5 \cdot 10^{-5}$ м/с. Отнеся объём $V_{ж}$ к общему объёму жидкости в пределах пятна контакта, получим величину λ (%) прироста показателя влажности W (%) после первого цикла статического воздействия штампа на почвогрунт.

Произведённые расчёты для массива оттаивающего суглинка при коэффициенте фильтрации $k = 5 \cdot 10^{-6}$ м/с показали, что величина $\lambda = 1,9$ %, т. е. показатель общей влажности, составила 28,94 %.

В таблицах 2 и 3 приведены результаты расчётов по оценке работоспособности и устойчивости соответственно для нижней ($K_H = 0,48$) и верхней ($K_H = 0,64$) частей склона при изменении количества циклов (N) прохода лесной машины или трелёвочной системы по одному и тому же участку трелёвочного волока.

Таблица 2. Результаты расчётов работоспособности волока в нижней части склона

Table 2. Results of calculations of the working capacity of the skidding track in the lower part of the slope

N	K_W	$W, \%$	$\lambda, \%$	$h_k, \text{м}$	K
1	0,710	28,40	1,91	0,185	0,91
2	0,723	28,94	1,61	0,196	0,86
3	0,735	29,40	1,42	0,204	0,82
4	0,746	29,82	1,26	0,212	0,78
5	0,755	30,2	1,14	0,220	0,75

Таблица 3. Результаты расчётов работоспособности волока в верхней части склона

Table 3. Results of calculations of the working capacity of the skidding track in the upper part of the slope

N	K_W	$W, \%$	$\lambda, \%$	$h_k, \text{м}$	K
1	0,640	25,60	5,01	0,134	1,28
2	0,672	26,88	3,10	0,157	1,10
3	0,693	27,71	2,30	0,172	1,00
4	0,708	28,35	1,92	0,184	0,93
5	0,722	28,89	1,64	0,194	0,88

Сравнительный анализ данных таблиц 2 и 3 показывает, что в верхней части склона даже после третьего цикла статического воздействия участок волока сохраняет устойчивость ($K \geq 1$), хотя выдержать показатель нормативной глубины колеи не представляется возможным в силу достаточно высоких показателей влажности. Вместе с тем можно говорить в этом случае о сохранении удовлетворительной работоспособности волока.

Для нижней части склона такие выводы сделать не представляется возможным, поскольку при существенно бóльших значениях глубины колеи (на 35—40 %) наблюдается потеря устойчивости даже на первом цикле работ ($K < 1$).

На рисунке 6 приведены графики зависимости критерия устойчивости K от количества циклов N для верхних и нижних участков склона. Полученные степенные зависимости характеризуются высоким показателем коэффициента детерминации, а асимптотический затухающий вид кривых свидетельствует о постепенной стабилизации достигнутого состояния участка массива в пределах волока.

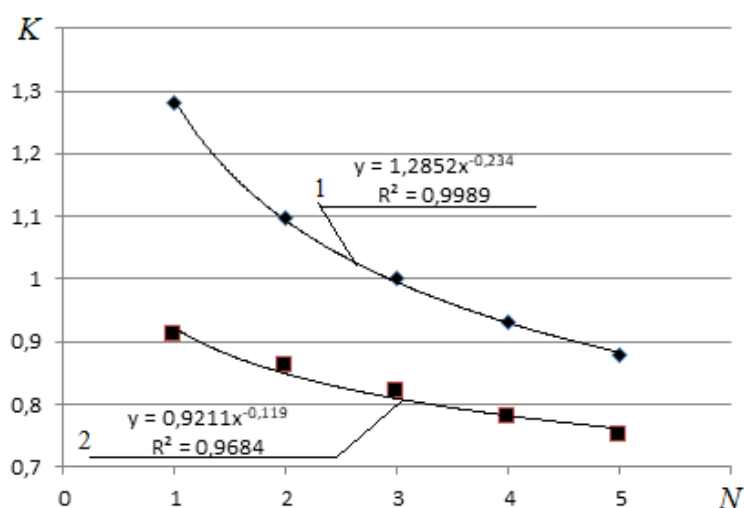


Рисунок 6. Зависимость критерия устойчивости от циклов работ: 1 — верхние участки склона; 2 — нижние участки склона

Figure 6. The dependence of the stability criterion on the work cycles: 1 — the upper sections of the slope; 2 — the lower sections of the slope

На рисунке 7 показано влияние цикличности на глубину образованной колеи. Нумерация кривых соответствует данным рисунка 6. Логарифмические кривые также характеризуются наличием асимптот, но существенное превышение нормативных значений показателя h_k , м, обуславливает необходимость корректировки технологических показателей в части нагрузки трелёвочной системы и числа её проходов. В первую очередь, этот вывод относится к организации лесосечных работ на нижних участках склона.

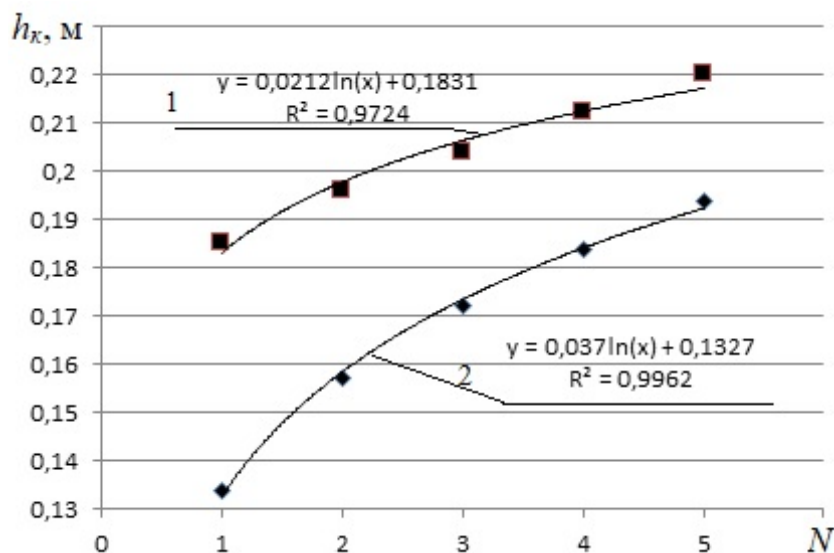


Рисунок 7. Влияние цикличности на глубину образования колеи на различных участках склона: 1 — верхние участки склона; 2 — нижние участки склона

Figure 7. Influence of cyclicity on the depth of track formation in different sections of the slope: 1 — upper sections of the slope; 2 — lower sections of the slope

4. Обсуждение и заключение

Таким образом, полученные результаты позволяют на стадии планирования трасс движения вдоль поверхности склона оттаивающего массива почвогрунта произвести для отдельных его участков оценку допустимого количества циклов прохода лесной машины или трелёвочной системы определённой грузоподъёмности по критерию работоспособности трелёвочного волока.

Список литературы

1. Калабина М. В., Царапов М. Н. Прочностные свойства оттаивающих грунтов // Современное состояние, проблемы и перспективы развития отраслевой науки: материалы Всерос. Конф. с междунар. участием. М., 2017. С. 542—546.
2. Царапов М. Н. Формирование прочностных характеристик грунтов в процессе оттаивания // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 2007. № 6. С. 31—34.
3. Роман Л. Т., Царапов М. Н. Оценка устойчивости откосов, сложенных оттаивающими грунтами // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2011. № 1. С. 58—62.
4. Определение оптимальных параметров процесса прессования и обезвоживания пропитанных древесных материалов / О. А. Куницкая, В. Я. Шапиро, С. С. Бурмистрова, И. В. Григорьев // Вестник Московского государственного университета леса — Лесной вестник. 2012. № 4. С. 110—115.

5. Газизов А. М., Шапиро В. Я., Григорьев И. В. Влияние влажности на развитие процесса разрушения коры при роторной окорке // Вестник Московского государственного университета леса — Лесной вестник. 2008. № 6. С. 129—133.
6. Модель процесса циклического уплотнения грунта в полосах, прилегающих к трелёвочному волоку / В. Я. Шапиро, И. В. Григорьев, С. Е. Рудов, А. И. Жукова // Вестник КрасГАУ. 2010. № 2 (41). С. 8—14.
7. Математическое моделирование процесса уплотнения мёрзлого почвогрунта под воздействием лесных машин и трелёвочных систем / С. Е. Рудов, В. Я. Шапиро, И. В. Григорьев, О. А. Куницкая, О. И. Григорьева // Системы. Методы. Технологии. 2018. № 3 (39). С. 73—78.
8. Особенности учёта состояния массива мёрзлых грунтов при циклическом взаимодействии с трелёвочной системой / С. Е. Рудов, В. Я. Шапиро, И. В. Григорьев, О. А. Куницкая, О. И. Григорьева, А. Н. Пучнин // Лесотехнический журнал. 2019. Т. 9, № 1 (33). С. 116—128.
9. Шапиро В. Я., Шапиро Н. А. Моделирование портфельных инвестиций в условиях негативных сценариев развития фондового рынка // Финансы и кредит. 2008. № 15 (303). С. 39—51.
10. Шапиро В. Я., Шапиро Н. А. Использование цепей Маркова для прогноза эффективности пифов // Экономическое развитие: теория и практика: материалы Междунар. науч. конф. / председатель редакционного совета И. П. Бойко. СПб., 2007. С. 79—81.
11. Агейкин Я. С. Вездеходные колёсные и комбинированные движители. М.: Машиностроение, 1972. 184 с.
12. Морозов Е. М., Зернин М. В. Контактные задачи механики разрушения. Изд. 2-е. М.: ЛИБРОКОМ, 2010. 544 с.
13. Вариационный метод расчёта параметров взаимодействия трелёвочной системы с массивом мёрзлых и оттаивающих почвогрунтов систем / С. Е. Рудов, В. Я. Шапиро, И. В. Григорьев, О. А. Куницкая, О. И. Григорьева // Системы. Методы. Технологии. 2019. № 1 (41). С. 68—77.
14. Теоретическое исследование процесса разрушения массива грунта сферическими ножами при использовании комбинированных конструкций грунтометов для тушения лесных пожаров / В. Я. Шапиро, О. И. Григорьева, И. В. Григорьев, М. Ф. Григорьев // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2018. № 1 (361). С. 61—69.
15. Моделирование уплотнения почвогрунта в боковых полосах трелёвочного волока с учётом изменчивости трассы движения / В. Я. Шапиро, И. В. Григорьев, Д. В. Лепилин, А. И. Жукова // Учёные записки Петрозаводского государственного университета. 2010. № 6 (111). С. 61—64.

References

1. Kalabina M. V., Tsarapov M. N. Strength properties of thawing soils. *Modern state, problems and prospects of development of branch science. Materials of the All-Russian Conference with international participation*. Moscow, 2017, pp. 542—546. (In Russ.)
2. Tsarapov M. N. Formation of strength characteristics of soils in the process of thawing. *Bulletin of the Moscow University, Series 4: Geology*, 2007, no. 6, pp. 31—34. (In Russ.)
3. Roman L. T., Tsarapov M. N. Assessment of the stability of slopes formed by thawing soils. *Geoecology. Engineering helology, hydrogeology, geocryology*, 2011, no. 1, pp. 58—62. (In Russ.)
4. Kunitskaya O. A., Shapiro V. Ya., Burmistrova S. S., Grigorev I. V. Determination of optimal parameters of the process of pressing and dehydration of impregnated wood materials. *Bulletin*

- of the Moscow State University of the Forest — *Lesnoy Vestnik*, 2012, no. 4, pp. 110—115. (In Russ.)
5. Gazizov A. M., Shapiro V. Ya., Grigorev I. V. Influence of humidity on the development of the process of destruction of the crust during rotary debarking. *Bulletin of the Moscow State University of the Forest — Lesnoy Vestnik*, 2008, no. 6, pp. 129—133. (In Russ.)
 6. Shapiro V. Ya., Grigorev I. V., Rudov S. E., Zhukova A. I. Model of the process of cyclic compaction of the soil in the strips adjacent to the skidding drag. *Bulletin of KrasGAU*, 2010, no. 2 (41), pp. 8—14. (In Russ.)
 7. Rudov S. E., Shapiro V. Ya., Grigorev I. V., Kunitskaya O. A., Grigoreva O. I. Mathematical modeling of the process of compaction of frozen soil under the influence of m forest machines and skidding systems. *The system. Methods. Technologies*, 2018, no. 3 (39), pp. 73—78. (In Russ.)
 8. Rudov S. E., Shapiro V. Ya., Grigorev I. V., Kunitskaya O. A., Grigoreva O. I., Putnin A. N. Features taking into account the state of the array of frozen soils under cyclic interaction with skid plate system. *Forestry engineering journal*, 2019, vol. 9, no. 1 (33), pp. 116—128. (In Russ.)
 9. Shapiro V. Ya, Shapiro N. A. Modeling portfolio investment in conditions of negative scenarios of development of stock market. *Finance and credit*, 2008, no. 15 (303), pp. 39—51. (In Russ.)
 10. Shapiro V. Ya, Shapiro N. A. The Use of Markov chains to predict the efficiency of mutual funds. *Economic development: theory and practice. Materials of the International Scientific Conference. Chairman of the editorial Board I. P. Boyko*. St. Petersburg, 2007, pp. 79—81. (In Russ.)
 11. Ageikin Ya. S. *All-terrain wheeled and combined propellers*. Moscow, Mashinostroenie, 1972. 184 p. (In Russ.)
 12. Morozov E. M., Zernin M. V. *Contact problems of fracture mechanics. Ed. 2*. Moscow, LIBROCOM, 2010. 544 p. (In Russ.)
 13. Rudov S. E., Shapiro V. Ya., Grigorev I. V., Kunitskaya O. A., Grigoreva O. I. Variational method for calculating the parameters of interaction of the skidding system with the array of frozen and thawing soil systems. *The system. Methods. Technologies*, 2019, no. 1 (41), pp. 68—77. (In Russ.)
 14. Shapiro V. Ya, Grigoreva O. I., Grigorev I. V., Grigorev M. F. Theoretical study of the process of destruction of the soil mass by spherical knives when using combined structures of grunometers for extinguishing forest fires. *Forest Magazine*, 2018, no. 1 (361), pp. 61—69. (In Russ.)
 15. Shapiro V. Ya., Grigorev I. V., Lepilin D. V., Zhukova A. I. Modeling of soil compaction in the side strips of the skidding portage taking into account the variability of the traffic route. *Scientific Notes of Petrozavodsk State University*, 2010, no. 6 (111), pp. 61—64. (In Russ.)