

УДК 630\*372/375

DOI: 10.37482/0536-1036-2020-2-101-117

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ МЕРЗЛЫХ И ОТТАИВАЮЩИХ ПОЧВОГРУНТОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ТРЕЛЕВОЧНОЙ СИСТЕМЫ

*С.Е. Рудов<sup>1</sup>, канд. техн. наук; ResearcherID: [AAC-9563-2020](https://orcid.org/0000-0002-9900-0929),*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9900-0929>*

*В.Я. Шапиро<sup>2</sup>, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [AAC-9658-2020](https://orcid.org/0000-0002-6344-1239),*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6344-1239>*

*И.В. Григорьев<sup>3</sup>, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [S-7085-2016](https://orcid.org/0000-0002-5574-1725),*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>*

*О.А. Куницкая<sup>3</sup>, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [AAC-9568-2020](https://orcid.org/0000-0001-8542-9380),*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>*

*О.И. Григорьева<sup>2</sup>, канд. с.-х. наук, доц.; ResearcherID: [AAC-9570-2020](https://orcid.org/0000-0001-5937-0813),*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5937-0813>*

<sup>1</sup>Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного, Тихорецкий просп., д. 3, К-64, Санкт-Петербург, Россия, 194064; e-mail: 89213093250@mail.ru

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия, 194021;

e-mail: shapiro54vlad@mail.ru, grigoreva\_o@list.ru

<sup>3</sup>Якутская государственная сельскохозяйственная академия, ш. Сергеляхское, 3-й км, д. 3, г. Якутск, Россия, 677007; e-mail: silver73@inbox.ru, ola.ola07@mail.ru

Заготовка древесины в лесах криолитозоны становится все более актуальной для Российской Федерации, что связано с истощением доступных запасов спелых эксплуатационных лесов в южной и центральной Сибири, Бурятии, Хабаровском крае при одновременном развитии деревообрабатывающих предприятий в Дальневосточном федеральном округе. При эксплуатации современных лесных машин, в частности колесных форвардеров, особую актуальность приобретают вопросы их эффективности, в первую очередь проходимости и технологической производительности, в конкретных производственных и геотехнических условиях. Эти обстоятельства в сочетании с необходимостью минимизации техногенной нагрузки на окружающую среду выдвигают проблему оптимизации числа проходов трелевочной системы по одному волоку в разряд наиболее актуальных. Особые условия эксплуатации трелевочных систем имеют место при производстве лесосечных работ на мерзлых и оттаивающих почвогрунтах. В первом случае в массиве почвогрунта в достаточно большом объеме присутствует лед, оказывающий существенное влияние на повышение его несущей способности под действием начальной вертикальной нагрузки трелевочной системы. Во втором случае при оттаивании мерзлого почвогрунта происходит перенасыщение его водой, в связи с чем ослабевают природные связи между твердыми частицами, а его физико-механические свойства утрачивают исходные значения. Форвардер образует колею в непосредственной зоне контакта колеса с почвогрунтом. Чем больше размер этой зоны, тем большие усилия передаются на почвогрунт для реализации необходимой тяги. Разработанная нами математическая модель расчета параметров процесса разрушения массива оттаивающего почвогрунта на границе с зоной мерзлоты позволяет на стадии проектных решений производить оценку предполагаемых значений глубины образованной колеи с учетом технических возможностей форвардеров и их маневрирования в конкретных производственных условиях.

*Для цитирования:* Рудов С.Е., Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Григорьева О.И. Исследование процесса разрушения мерзлых и оттаивающих почвогрунтов

при воздействии трелевочной системы // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 2. С. 101–117.  
DOI: 10.37482/0536-1036-2020-2-101-117

*Ключевые слова:* мерзлый почвогрунт, лесозаготовка, трелевочная система, уплотнение и деформация почвогрунта.

### *Введение*

Вредное воздействие лесных машин на экосистемы лесосек через уплотнение и деформацию почвогрунтов широко известно [8, 11, 12, 15–17, 19, 20]. Леса криолитозоны являются особо ранимыми. Они произрастают в характерных суровых природных условиях, отличаются небольшим годичным приростом и крайне бедной биотой плодородного слоя почвогрунта [3].

При эксплуатации современных лесных машин, в частности колесных форвардеров, особую актуальность приобретают вопросы их эффективности, в первую очередь проходимости и технологической производительности, в конкретных производственных и геотехнических условиях. Эти обстоятельства в сочетании с необходимостью минимизации техногенной нагрузки на окружающую среду выдвигают проблему оптимизации числа проходов трелевочной системы по одному волоку в разряд наиболее актуальных.

Результаты исследований [4] свидетельствуют, что однократный проход трелевочной системы даже при невысоком среднем давлении на грунт (не более 47 кПа) приводит к отдельным разрывам сплошного массива, двукратный – разрушает до 30 % объема контактного слоя, а трехкратный – до 80 %. Для конкретного почвогрунта предел прочности на растяжение ( $\sigma_p$ ) в среднем в 5–10 раз меньше предела прочности на сжатие ( $\sigma_{сж}$ ) и в 2–5 раз меньше предела прочности на сдвиг ( $\sigma_{сд}$ ).

Это обусловлено тем, что при растяжении за счет разрыва структурных связей развиваются необратимые предельные деформации, тогда как при сжатии и сдвиге некоторая часть структурных связей оказывает сопротивление внешней нагрузке, массив почвогрунта может деформироваться, не разрушаясь. В связи с этим растягивающие напряжения являются одним из существенных факторов разрушения массива почвогрунта с образованием в нем трещин разрыва.

Цель исследования – разработать математическую модель расчета параметров процесса разрушения массива оттаивающего почвогрунта на границе с зоной мерзлоты, которая позволит на стадии проектных решений производить оценку глубины образованной колеи с учетом технических возможностей форвардеров и их маневрирования в конкретных производственных условиях.

### *Объекты и методы исследования*

Особые условия эксплуатации трелевочных систем имеют место при производстве лесосечных работ на мерзлых и оттаивающих почвогрунтах.

В первом случае в массиве почвогрунта в достаточно большом объеме присутствует лед, оказывающий существенное влияние на повышение несущей способности почвогрунта под действием начальной вертикальной нагрузки ( $q_0$ , кПа) трелевочной системы. Во втором случае при оттаивании мерзлого

почвогрунта происходит перенасыщение его водой, в связи с чем ослабевают природные связи между твердыми частицами, а физико-механические свойства почвогрунта утрачивают исходные значения.

При этом, если действующие напряжения приведут к образованию трещин разрыва, то свободная вода будет интенсивно их заполнять вплоть до границы с мерзлым грунтом, практически нулевая водопроницаемость которого обусловит наличие воды на границе с оттаивающим почвогрунтом, что вызовет повышение его общей влажности ( $W$ ), снижение сцепления ( $C$ ) и угла внутреннего трения ( $\varphi$ ), т. е. и несущей способности в целом. Этот вывод подтверждается данными исследований [7], результаты которых представлены в табл. 1

Таблица 1

**Характеристика грунтов оттаивших и талых на границе оттаивания**

Грунт	$W, \%$	Оттаивающий грунт		Талый грунт	
		$C, \text{кПа}$	$\varphi, \dots^\circ$	$C, \text{кПа}$	$\varphi, \dots^\circ$
Песок	8	10	34	2	30
	17	8	32	1	28
	32	4	23	0	17
Супесь	15	21	19	16	17
	17	14	17	8	15
	23	7	16	5	11
Суглинок	15	20	24	16	22
	20	17	21	12	18
	28	8	17	4	12
Глина	20	30	15	22	16
	29	20	13	14	12
	44	11	12	6	10

Как видно из табл. 1, если угол  $\varphi$  в массиве почвогрунта и на границе с мерзлотой изменяется незначительно (отличие не более 7...13 %), то сцепление для песков снижается в 5 раз, для остальных видов грунта – в среднем на 25...35 %.

Технологические требования по ограничению грузоподъемности форвардера и снижению усилий сопротивления его движению обуславливают максимально допустимую глубину колеи ( $h_k$ ), которая после первого прохода не должна превышать заданного значения  $h_k \leq 0,10$  м. Если в мерзлых почвогрунтах это ограничение в большинстве случаев выполняется, то в оттаивающих почвогрунтах наблюдается существенное превышение данного показателя:  $h_k = 0,25...0,30$  м и более.

Форвардер образует колею в непосредственной зоне контакта колеса с почвогрунтом. Чем больше размер этой зоны, тем бóльшие усилия передаются на почвогрунт для реализации необходимой тяги.

Горизонтальное усилие подачи можно использовать для того, чтобы преодолеть усилие сопротивления движению и реализовать необходимую тягу. Максимальная тяга и обусловленная этим сила поверхностного трения оказывают влияние на сопротивление грунта сдвигу  $\tau$ , которое зависит от действующей нормальной (вертикальной) нагрузки  $q$ , сцепления  $C$  и угла  $\varphi$  в соответствии с обобщенным уравнением Кулона–Мора:

$$\tau = C + q \operatorname{tg}\varphi. \quad (1)$$

Считаем, что глубина зоны оттаивания  $H$ , м. За ее пределами мерзлый почвогрунт представляет собой весьма твердое водонепроницаемое основание. Очевидно, что физико-механические свойства почвогрунта в пределах и за пределами этой зоны существенно отличаются друг от друга. Интегральной характеристикой этого отличия может служить величина модуля общей деформации ( $E$ , МПа).

В работе [13] для трех категорий почвогрунтов в достаточно широком диапазоне изменений их физико-механических свойств получены корреляционные соотношения между параметрами  $C$ ,  $\varphi$ ,  $H$  и  $E$ :

$$C = 10,774E^{0,7737}; \quad \varphi = 13,669E^{0,1818}; \quad H = 0,4714E^{-0,479}. \quad (2)$$

При этом для слабых почвогрунтов (первая категория) принимаем  $E = 0,4$  МПа, для средних (вторая категория) –  $E = 1,0$  МПа, для крепких (третья категория) –  $E = 3,0$  МПа. Показатели  $E$  для мерзлых грунтов существенно отличаются от этих значений в большую сторону. Так, по данным [1] для мерзлой пылеватой супеси при внешнем давлении  $q_0 = 100...700$  кПа и влажности  $W = 28...29$  % величина модуля  $E$  зависит от температуры  $T$ : для  $T = -0,3$  °С модуль  $E = 5,7...8,2$  МПа; для  $T = -1,4$  °С –  $9,2...18,5$  МПа; для  $T = -3,6$  °С –  $14,7...24,0$  МПа. При таких значениях  $E$  сцепление  $C$  увеличивается до 100 кПа и более, а глубина  $H$  становится менее 0,10 м.

Анализ представленных в [1] графических данных свидетельствует о существенном влиянии влажности на характеристики упругих свойств мерзлого почвогрунта: при  $W = 10...30$  % модуль упругости  $E_y$  возрастает, после чего в результате перенасыщения почвогрунта влагой происходит резкое его снижение на 40...50 %. Модуль общей деформации  $E$  также испытывает на себе подобное влияние параметра  $W$ . Отмечается, что мерзлые грунты существенно отличаются от талых и оттаивающих грунтов именно по значениям модулей  $E_y$  и  $E$ , когда несущая способность грунта превысит прочность создаваемых в них фундаментов.

Как следует из (1), предельное сопротивление почвогрунта сдвигу зависит от нормального давления, т. е. от внешней нагрузки на почвогрунт, которую создает трелевочная система, при этом диапазон ее грузоподъемности в общем случае является случайной величиной, определяемой параметрами пачки леса [11].

В табл. 2 приведены характеристики некоторых форвардеров с указанием достигаемых начальных значений действующей нормальной (вертикальной) нагрузки  $q_0$  под колесными парами, которые будем принимать за соответствующие штампы 1 и 2.

Таблица 2

Характеристики трелевочных систем и их давление на грунт

Трелевочная система	Нагрузка (масса) $P$ , т	Давление $q_0$ , кПа	
		Штамп 1 / число колесных пар	Штамп 2 / число колесных пар
I. 4-колесная	15	68 / 1	80 / 1
II. 6-колесная	16	72 / 1	40 + 40; 27 / 3
III. 8-колесная	19	35 / 2	58 / 2
IV. 10-колесная	20	35 / 2	37 / 3

Эксплуатация 8–10-колесных трелевочных систем с использованием гусениц при  $P = 19...20$  т создает давление  $q_0 = 35...37$  кПа, что более чем в 2 раза

меньше действующих давлений  $q_0 = 68...80$  кПа при применении 4–6-колесных систем без гусениц. Надо отметить, что наличие последних в 6-колесной системе снижает давление с 40 до 27 кПа, т. е. на 33 %.

### Результаты исследования и их обсуждение

Оценим сопротивление грунта на сдвиг  $\tau$  в зависимости от начальных давлений  $q_0$  с учетом влажности  $W$ .

Поскольку сопротивление сдвигу  $\tau$  является одним из критериев разрушения массива, а с учетом соотношения (1) и данных табл. 1 это величина переменная, то по мере увеличения глубины колеи и ее приближения к границе с мерзлым почвогрунтом представляет интерес дать обобщенную количественную оценку влияния  $W$  на величину  $\tau$ .

С этой целью данные табл. 1 для двух видов мерзлых грунтов (супеси и суглинка) представим в безразмерном виде, где за базу отсчета (масштабную единицу) примем данные при минимальной влажности  $W = 15$  %.

Результаты расчетов отражены на рис. 1, где на оси абсцисс – относительная влажность  $\bar{W}$ , на оси ординат – относительное сцепление  $\bar{C}$  (кривая 1) и относительный угол  $\bar{\varphi}$  (кривая 2) для всей совокупности данных как внутри оттаивающего массива, так и на его границе с мерзлым грунтом.

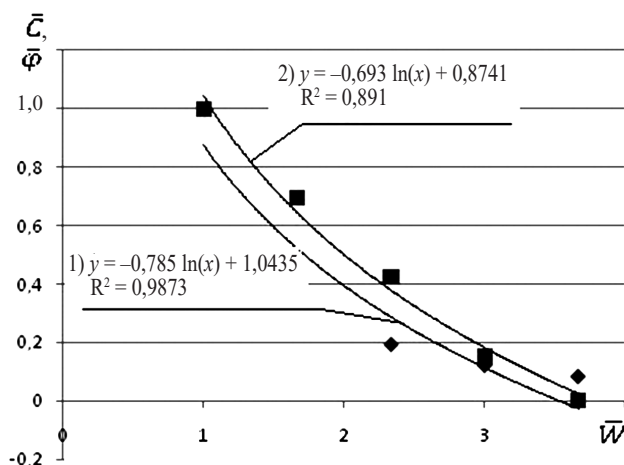


Рис. 1. Изменение сцепления  $\bar{C}$  и угла  $\bar{\varphi}$  с ростом влажности  $\bar{W}$  почвогрунта: 1 –  $\bar{C}(\bar{W})$ ; 2 –  $\bar{\varphi}(\bar{W})$

Fig. 1. The change in relative adhesion ( $\bar{C}$ ) and relative angle of internal friction ( $\bar{\varphi}$ ) with rising relative humidity ( $\bar{W}$ ) of soil: 1 –  $\bar{C}(\bar{W})$ ; 2 –  $\bar{\varphi}(\bar{W})$

Анализ рис. 1 показал, что поведение графиков безразмерных величин  $\bar{C}(\bar{W})$  и  $\bar{\varphi}(\bar{W})$  совпадает. Это дает возможность производить адекватные расчеты в абсолютных единицах. Переход к абсолютным значениям  $W$ ,  $C$  и  $\varphi$  с учетом начальных давлений  $q_0$  позволил получить графические зависимости снижения предела прочности  $\tau$  с ростом влажности  $W$  (рис. 2), которые с высокой достоверностью описываются экспоненциальными зависимостями:

$$\tau = k_1 e^{-k_2 W}. \quad (3)$$

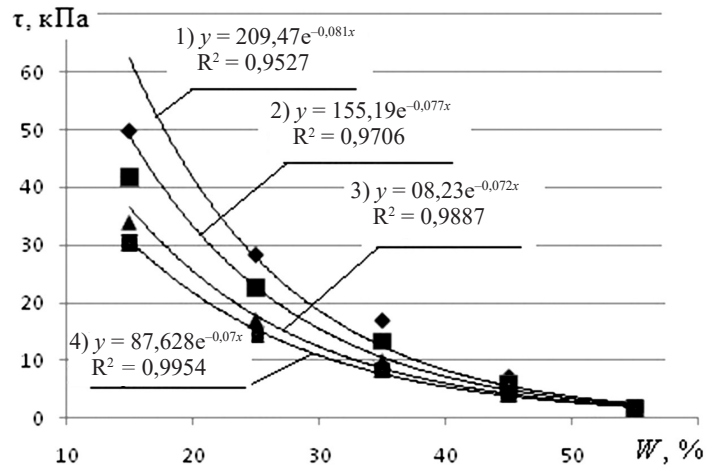


Рис. 2. Зависимость предела прочности  $\tau$  от влажности  $W$  при начальном давлении  $q_0$ : 1 – 80 кПа; 2 – 58 кПа; 3 – 37 кПа; 4 – 27 кПа

Fig. 2. The dependence of shear resistance ( $\tau$ ) on humidity ( $W$ ) at initial vertical load ( $q_0$ ): 1 – 80 kPa; 2 – 58 kPa; 3 – 37 kPa; 4 – 27 kPa

Как видно из рис. 2, с высокой достоверностью ( $R^2 \geq 0,95$ ) для коэффициентов  $k_i$ , входящих в (3), можно принять:

$$k_1 = 2,2q_0 + 30,64; \quad k_2 \approx 0,075, \quad (4)$$

что позволяет производить расчет  $\tau$  как функции двух переменных –  $q_0$  и  $W$ :

$$\tau = (2,2q_0 + 30,64)e^{-0,075W}. \quad (5)$$

На рис. 3 представлен график двумерной функции  $\tau = \tau(W, q_0)$ .

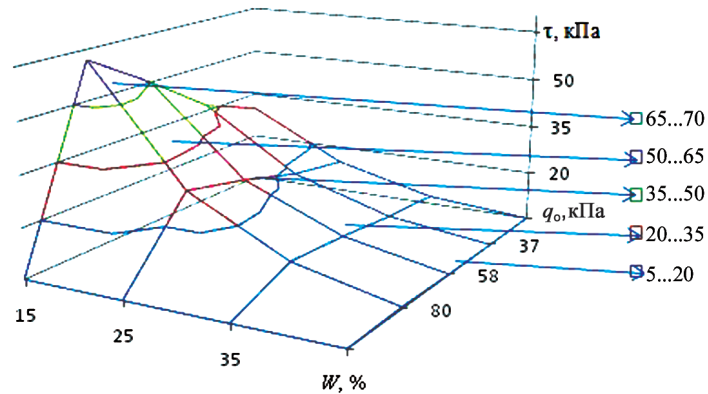


Рис. 3. Зависимость предела прочности  $\tau$  от влажности  $W$  и начального давления  $q_0$ .

Fig. 3. The dependence of shear resistance ( $\tau$ ) on humidity ( $W$ ) and initial vertical load ( $q_0$ )

Анализ данных показал, что при максимально возможном давлении  $q_0 = 80$  кПа повышение  $W$  в 3 раза (с 15 до 45 %) приводит к снижению предела прочности  $\tau$  более чем на порядок (с 67,0 до 5,6 кПа), что существенно влияет на процесс разрушения массива и формирование колеи. Под действием нагрузки  $P$  на поверхности почвогрунта образуется контактная площадка радиусом  $a$ , м, с площадью контакта  $s = \pi a^2$  и глубиной контактного сближения  $h_0$ .

Основываясь на положениях [6], определим параметры  $a$  и  $h_0$ :

$$a = \sqrt[3]{\frac{3P(1-\nu^2)R}{4E}}; \quad h_0 = a^2/R, \quad (6)$$

где  $\nu$  – коэффициент Пуассона;  $R$  – радиус колеса, м.

Процесс деформирования грунта от действия внешнего давления  $q_0$  под нагрузкой  $P$  происходит в пространственной декартовой системе координат  $Oxyz$ , где на произвольной элементарной площадке массива действует тензор напряжений, компоненты которого определяются как

$$\sigma = -q_0 \Psi_z(r, z) = -q_0 \left( \frac{z}{\sqrt{u}} \right)^3 \frac{a^2 u}{u^2 + a^2 z^2}; \quad \sigma_x = \alpha \sigma_z = \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_z; \quad \sigma_y = q_0 \Psi_y(r, z),$$

где  $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ ;  $u$  – положительный корень квадратного уравнения  $\frac{r^2}{a^2 + u} + \frac{z^2}{u} = 1$ ;  $\alpha$  – коэффициент бокового распора;  $\Psi_z(r, z)$ ,  $\Psi_y(r, z)$  и  $\Psi_{yz}(r, z)$  – функции двух переменных, или функции координат:

$$\begin{aligned} \Psi_y(r, z) &= \frac{1-2\nu}{3} \frac{a^2}{r^2 + z^2} \left[ 1 - \left( \frac{z}{\sqrt{u}} \right)^3 \right] + \left( \frac{z}{\sqrt{u}} \right)^3 \frac{a^2 u}{u^2 + a^2 z^2} + \frac{z}{\sqrt{u}} \times \\ &\times \left[ \frac{(1-\nu)u}{a^2 + u} + (1+\nu) \operatorname{arctg} \left( \frac{a}{\sqrt{u}} \right) - 2 \right] \tau_y = \\ &= -q_0 \Psi_{yz}(r, z) = -q_0 \frac{a \sqrt{u} z^2 (r^2 + z^2)}{(u + a^2)(u^2 + a^2 z^2)}. \end{aligned} \quad (7)$$

Выполним на основе (7) в зоне грунта непосредственно под штампом 1 расчеты по определению компонент тензора напряжений  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  при следующих исходных данных:  $P = 9$  т;  $q_0 = 58$  кПа;  $E = 1,0$  МПа;  $W = 35$  %;  $\nu = 0,35$ .

Для этих данных соотношения (2)–(6) дают:  $a = 0,175$  м;  $h_0 = 0,068$  м;  $H = 0,47$  м;  $C = 10,774$  кПа;  $\varphi = 13,67^\circ$ ;  $\tau = 24,88$  кПа;  $\sigma_p \approx \tau/2 = 12,44$  кПа.

В главных осях напряжения (главные) принимаются из условия

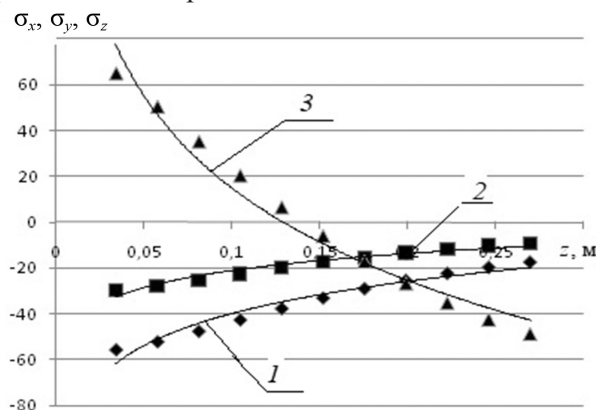
$$\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3, \quad (8)$$

касательные напряжения при этом отсутствуют.

На рис. 4 в соответствии с условием (8) представлены графики зависимости главных напряжений от вертикальной координаты  $z$ .

Рис. 4. Изменение главных напряжений  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$ , с ростом вертикальной координаты  $z$ : 1 –  $\sigma_1 = \sigma_y$ ; 2 –  $\sigma_2 = \sigma_z$ ; 3 –  $\sigma_3 = \sigma_x$

Fig. 4. The change in principal stresses with increasing vertical coordinate: 1 –  $\sigma_1 = \sigma_y$ ; 2 –  $\sigma_2 = \sigma_z$ ; 3 –  $\sigma_3 = \sigma_x$  (where  $\sigma$  – strength limit)



Как следует из рис. 4, главное напряжение  $\sigma_3$  является знакопеременным (напряжение  $\sigma_1$  – однозначное!), причем в зоне массива почвогрунта, вблизи поверхности контакта со штампом ( $z = h_p \leq 0,128$  м), развиваются положительные (растягивающие) напряжения, значительно превышающие предел прочности на разрыв  $\sigma_p$ . Выполнение критерия разрушения в этой зоне приведет к образованию трещин разрыва.

За пределами зоны разрыва уровень растягивающих напряжений недостаточен для разрушения почвогрунта, однако отрицательные (сжимающие) напряжения  $\sigma_2$  и  $\sigma_3$  приводят к возникновению максимальных касательных напряжений:

$$\tau_c = 0,5(\sigma_2 - \sigma_3), \quad (9)$$

которые могут превысить предел прочности на сдвиг  $\tau$ , тем самым определив глубину зоны  $h_c$ , которую можно считать наиболее вероятной глубиной колеи от действия штампа 1.

Дифференцированный подход при выявлении механизма разрушения сплошной среды, в частности массива древесины, развит в работе [2]. Принципы такого подхода могут быть использованы и при изучении деформирования почвогрунтов с соответствующими упругопластическими и прочностными показателями.

В момент маневрирования форвардера и его отклонения от заданного направления движения на угол  $\theta$  деформирование почвогрунта происходит под действием тензора напряжения с компонентами:

$$\begin{aligned} \sigma_y &= \sigma_1; & \sigma_z &= 0,5(\sigma_2 + \sigma_3) + 0,5(\sigma_2 - \sigma_3)\cos 2\theta; \\ \sigma_x &= 0,5(\sigma_2 + \sigma_3) - 0,5(\sigma_2 - \sigma_3)\cos 2\theta; & \tau_{zx} &= 0,5(\sigma_2 - \sigma_3)\sin 2\theta. \end{aligned} \quad (10)$$

Из соотношений (10) следует, что при  $\theta = 0$  компоненты тензора напряжений являются главными:

$$\sigma_y = \sigma_1; \quad \sigma_z = \sigma_2; \quad \sigma_x = \sigma_3; \quad \tau_{zx} = 0. \quad (11)$$

Таким образом, критерием разрушения массива почвогрунта является выполнение условий в зонах разрушения

$$\begin{aligned} \text{разрывом: } \sigma_y &> \sigma_p; \\ \text{сдвигом: } \tau_\Sigma &= \tau_c + \tau_{zx} > \tau, \end{aligned} \quad (12)$$

где  $\tau_\Sigma$  – суммарные касательные напряжения.

Наряду с модулем общей деформации  $E$  упругопластические свойства почвогрунтов характеризуются и коэффициентом Пуассона  $\nu$ .

Принимая во внимание, что коэффициент  $\nu$  оказывает влияние как на компоненты тензора напряжений, так и на контактные параметры взаимодействия штампа с массивом почвогрунта, оценим зависимость  $\nu$  от влажности  $W$ .

По данным [9], указанное влияние для мерзлых и оттаивающих грунтов (песков, супесей, суглинка и глины) хорошо описывается экспоненциальной зависимостью, в диапазоне  $W = 15...35$  % эта зависимость (при  $R^2 = 0,9729$ ) имеет вид

$$\nu = 0,0887e^{0,0442W}. \quad (13)$$

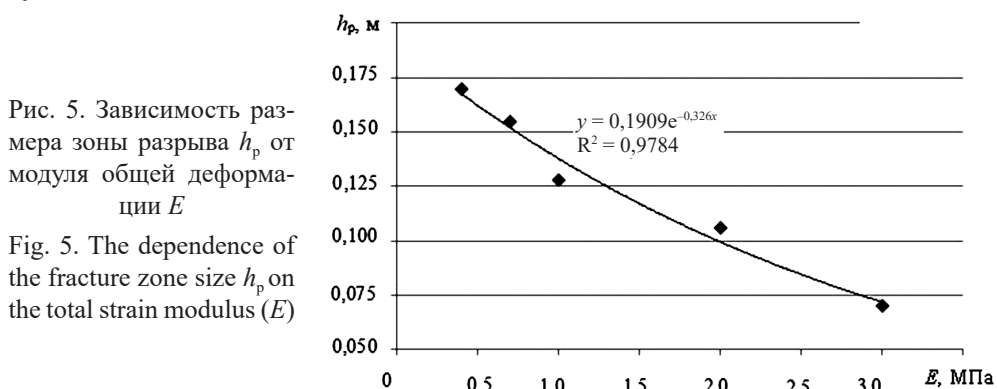
При значениях  $W > 35$  % коэффициент Пуассона ограничен сверху величиной предела  $\nu = 0,5$ , зависимость  $\nu(W)$  принимает следующий вид:

$$\nu = 0,2234 \ln W - 0,4463. \quad (14)$$



Таким образом, при высокой влажности  $v \rightarrow 0,5$ , т. е. коэффициент бокового распора  $\alpha = v/(1-v)$ , связывающий компоненты вертикальных  $\sigma_z$  и горизонтальных  $\sigma_x$  сжимающих напряжений, стремится к 1. Это значит, что массив грунта находится в состоянии квазинесжимаемой жидкости и только в поверхностной зоне испытывает максимальные растягивающие напряжения, приводящие к разрыву.

Как показали расчеты, величина зоны разрыва  $h_p$  существенно зависит от модуля общей деформации  $E$ , тогда как параметры влажности и начальной нагрузки оказывают слабое влияние на  $h_p$  (относительные изменения не превышают 8...10 % при  $P = 19...12$  т и  $W = 35...15$  %). На рис. 5 приведена зависимость  $h_p$  от  $E$  при  $P = 19$  т,  $q_0 = 58$  кПа,  $W = 35$  %,  $v = 0,35$ .



Как видно из графика на рис. 5, в грунтах с модулем  $E \leq 2,0$  МПа зона разрыва превышает максимально допустимую глубину колеи, равную 0,1 м, и увеличивается по мере снижения модуля  $E$ .

Расчеты по определению зоны разрушения сдвигом свидетельствуют об определенной зависимости  $h_c$  от нагрузки  $P$ , угла поворота рамы  $\theta$  и влажности  $W$ .

На рис. 6 приведены графики функций  $h_c$  от угла  $\theta$  при  $W = 35$  % и трех видах нагрузки  $P$ .

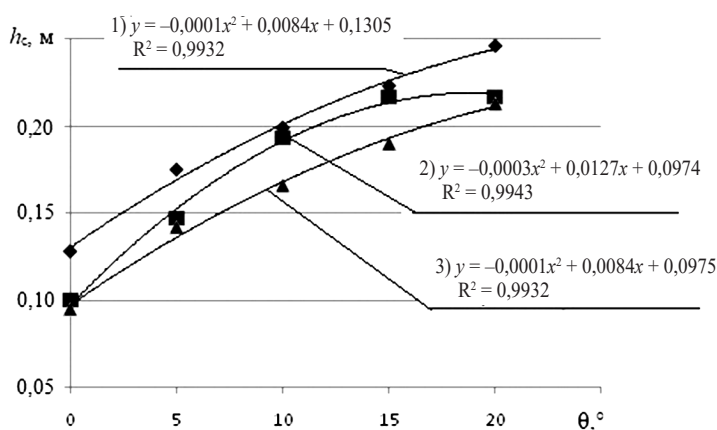


Рис. 6. Зависимость размера зоны разрушения сдвигом  $h_c$  от угла поворота  $\theta$  при различной нагрузке  $P$ : 1 – 19 т; 2 – 15 т; 3 – 12 т

Fig. 6. The dependence of the share fracture zone size  $h_c$  on the angle of rotation at different loads ( $P$ ): 1 – 19 т; 2 – 15 т; 3 – 12 т

При движении форвардера в заданном направлении маневры с углом поворота  $\theta$  до  $10^\circ$  являются вполне естественными, однако в ряде случаев  $\theta = 15...20^\circ$  и более. Максимально возможное значение  $\theta = 42...44^\circ$ . Это оказывает негативное воздействие на массив почвогрунта, о чем свидетельствуют результаты исследований [14].

Приведенные на рис. 6 данные для почвогрунтов с высоким содержанием влаги ( $W = 35\%$  и более) показывают, что размер зоны разрушения выдержать в пределах  $h_c \leq 0,1$  м затруднительно даже при снижении нагрузки до 12 т.

Проанализируем зависимость  $h_c(W)$  при допустимых углах  $\theta = 10^\circ$ , на грузках  $P = 12$  и 19 т,  $E = 1,0$  МПа (рис. 7).

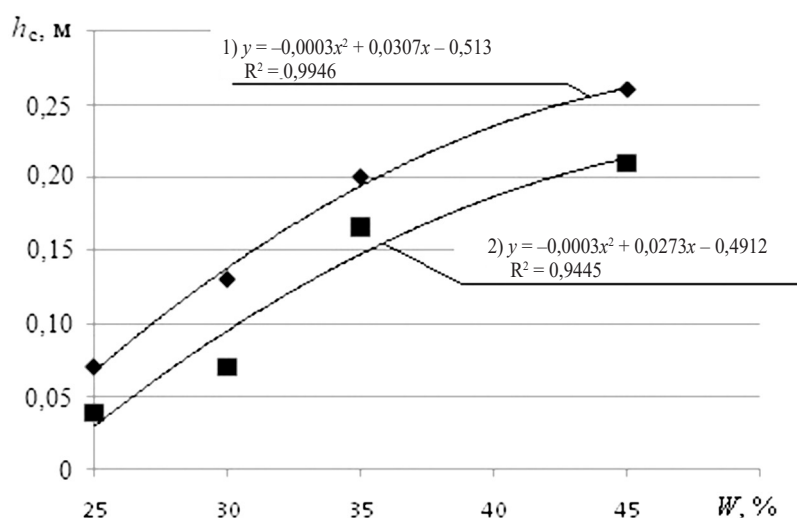


Рис. 7. Зависимость размера зоны разрушения сдвигом  $h_c$  от влажности  $W$  при различной нагрузке  $P$ : 1 – 19 т; 2 – 12 т

Fig. 7. The dependence of the zone depth ( $h_c$ ) on humidity ( $W$ ) at different loads ( $P$ ): 1 – 19 t; 2 – 12 t

При движении форвардера по почвогрунтам с  $W = 25...30\%$  выдержать ограничение по глубине колеи практически не удастся при относительно больших нагрузках ( $P = 19$  т). С ростом  $W$  до  $35...45\%$  глубина колеи в этих условиях достигает 0,25 м. Снижение нагрузки до 12 т позволяет выдерживать ограничение по глубине колеи и в более влажных почвогрунтах ( $W \leq 30\%$ ).

Учитывая характер изменения напряжений с ростом глубины колеи, их соотношения в главных напряжениях и принятые критерии разрушения (формулы (5) – (10)), будем иметь глубину колеи после действия штампа 1:

$$h_k = a \sqrt{q_0 \frac{(1-\alpha)(1+\sin 2\theta)}{2\tau}}, \quad (15)$$

где  $\tau$  определяется в соответствии с (5).

На рис. 8 представлены зависимости  $h_k(E)$  при трех значениях  $q_0 = 35$ ; 58 и 80 кПа.

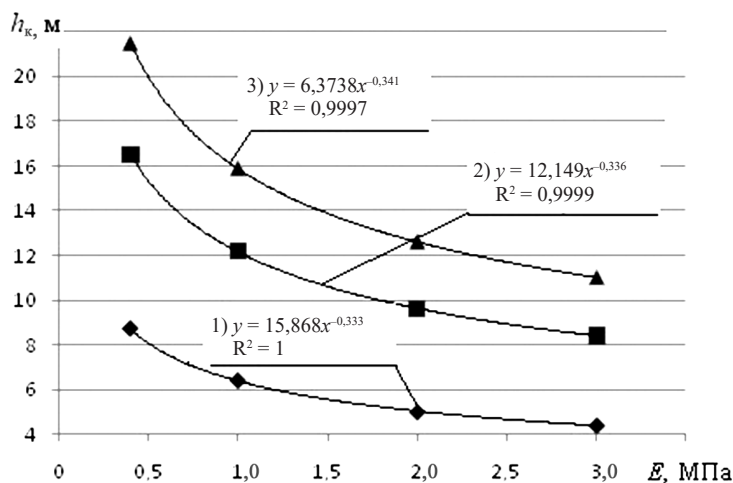


Рис. 8. Зависимости глубины колеи  $h_k$  от модуля  $E$  при различных значениях начальной вертикальной нагрузки  $q_0$ : 1 – 35 кПа; 2 – 58 кПа; 3 – 80 кПа

Fig. 8. The dependence of the rut depth ( $h_k$ ) on the total strain modulus ( $E$ ) at different values of the initial vertical load ( $q_0$ ): 1 – 35 kPa; 2 – 58 kPa; 3 – 80 kPa

Можно заключить, что для широкого диапазона изменения  $q_0$  величина  $h_k \sim \sqrt[3]{E}$ , причем коэффициент пропорциональности логарифмически зависит от  $q_0$ :  

$$h_k = 11,5 \ln q_0 - 34,5.$$

Таким образом, влажность, модуль деформации и начальное давление трелевочной системы на грунт являются основными природно-климатическими и технологическими факторами, влияющими на процесс образования колеи определенной глубины.

Поскольку величина модуля деформации  $E$  зависит от влажности  $W$ , последний показатель существенно влияет на процесс деформирования массива почвогрунта.

Этот вывод получен и при изучении процессов статического деформирования древесины различной влажности [2, 5], что подчеркивает инвариантность механизма влияния данного показателя на процесс разрушения массива сплошной среды различной природы при достижении критических нагрузок.

От действия статического давления в массиве насыщенного влагой оттаявшего почвогрунта под штампом 1 будут активизированы процессы фильтрации воды за пределами зоны разрушения, т. е. глубже образованной колеи. Действие штампа 1 можно считать мгновенным. При скорости движения форвардера, например, 2,5 км/ч и расстоянии между штампами 2 м, время начала действия штампа 2 не превысит  $\Delta t_{\phi} = 3$  с. Однако этого времени достаточно, чтобы определенный объем воды переместился в направлении границы зоны мерзлоты.

Рассмотрим модель Дарси линейной фильтрации жидкости под действием вертикального текущего давления  $q$  в направлении  $z = h$ :

$$v_h = - \frac{k}{\gamma} \frac{\partial q}{\partial h}, \quad (16)$$

где  $k$  – коэффициент фильтрации, м/с;  $\gamma$  – удельный вес жидкости.

Значения коэффициента фильтрации принимаем по данным табл. 3, полученным в соответствии с ГОСТ 25100–2011 «Грунты. Классификация».

Таблица 3

Коэффициент фильтрации грунтов

Грунт	$k$ , м/с
Песок:	
пылеватый	$(0,6...6,0)10^{-5}$
мелкозернистый	$(1,2...3,0)10^{-4}$
среднезернистый	$(2,5...6,0)10^{-4}$
крупнозернистый	$(4,0...8,5)10^{-4}$
Супесь	$(0,1...1,2)10^{-5}$
Суглинок	$(0,05...0,5)10^{-5}$
Глина	$<10^{-5}$

В качестве частной производной  $\frac{\partial q}{\partial h}$  примем отношение перепада давления (величина отрицательная) на участке зоны разрушения  $h_c$  к размеру самого участка. Тогда за единицу времени ( $t_\phi$ , с) объем жидкости  $V_{ж}$  в пределах площади пятна контакта  $s$  переместится вниз и составит:

$$V_{ж} = - \frac{\pi k}{\gamma} \frac{\partial q}{\partial h} a^2 \frac{1}{1+h_c/a}. \quad (17)$$

Отнеся соответствующий объем  $V_{ж}$  за период времени  $\Delta t_\phi$  к объему воды  $V_c$  в зоне грунта глубиной  $H - h_c$ , получим дополнительный объем жидкости ( $\lambda$ , %), поступающей в почвогрунт из зоны разрушения глубиной  $h_c$  в зону оттаивания глубиной  $H - h_c$ . Общая влажность при этом увеличится на  $\lambda$ . Такой подход использован в работе [19] при исследовании процессов обезвоживания модифицированных материалов.

Расчеты для оттаивающей супеси с минимально возможным коэффициентом фильтрации  $k = 10^{-6}$  м/с показали, что при  $E = 0,4$  МПа повышение  $q_0$  от 35 до 80 кПа при прочих равных условиях приводит к увеличению  $W$  от 2 до 4 %, т. е. фактором фильтрации в этом случае можно пренебречь.

Однако в более прочных почвогрунтах, при  $E = 1,0$  МПа, показатели влажности растут более существенно и прирост  $W$  достигает 8 % при  $q_0 \geq 58$  кПа. В крепких почвогрунтах, при  $E = 3,0$  МПа, во всем диапазоне изменения  $q_0$  прирост  $W = 8,2...18,8$  %, что существенно влияет на снижение прочности массива и увеличение глубины колеи при воздействии штампа 2.

Рассмотрим подробнее процесс перемещения воды к зоне мерзлоты под действием внешней нагрузки. Связанная высокоплотная (до 1200...1400 кг/м<sup>3</sup>) вода, занимающая 40 % и более от общего объема, под действием статических нагрузок практически не уплотняется. При градиенте в направлении роста координаты  $z$  обеспечить перемещение этой воды достаточно трудно, поскольку до 95 % связанной воды остается в исходном состоянии. Уместно отметить, что такая вода переходит в лед при достаточно низких температурах замерзания:  $-4...-6$  °С.

Свободная вода состоит из гравитационной и капиллярной составляющих. Последняя замерзает при температурах, близких к значениям температу-

ры замерзания связанной воды. Процесс перехода гравитационной воды в лед происходит при любых отрицательных температурах ( $\leq 0$  °C).

Пусть начальное распределение свободной и связанной воды в единице объема грунта определяется соответствующими компонентами вектора

$$\vec{v}_0 = (\omega_1, \omega_2); \quad \omega_1 + \omega_2 = 1. \quad (18)$$

В квадратной (размерность  $2 \times 2$ ) матрице переходных состояний  $P_c$  принимаем  $p_{11} = 1 - \lambda/100$ , а  $p_{22} = 0,95$ , т. е. матрица переходных состояний будет иметь следующий вид:

$$P_c = \begin{pmatrix} 1 - \lambda/100 & \lambda/100 \\ 0,05 & 0,95 \end{pmatrix}. \quad (19)$$

Тогда, согласно теории Маркова и принципов ее приложений, развитых в работе [10], умножение вектора  $\vec{v}_0$  на матрицу  $P_c$  определяет вектор  $\vec{v}_1$  – распределение состояния воды после первого цикла воздействия (прохода первой колесной пары форвардера). Таким образом, умножение вектора (18) на матрицу (19) дает вектор нового состояния воды.

Как показали расчеты, при использовании форвардеров с низким давлением в шинах ( $q_0 \leq 39$  кПа) и, в частности, при исходном состоянии  $\vec{v}_0 = (0,6; 0,4)$  результат первого перехода приводит к вектору  $\vec{v}_1 = (0,58; 0,42)$ , т. е. относительное изменение не выше 5 % и процессом фильтрации можно пренебречь. При использовании форвардеров с высоким давлением на почвогрунт ( $q_0 \leq 80$  кПа) количественными изменениями компонент ( $\omega_1, \omega_2$ ) пренебрегать нельзя, и учет увеличения влажности является значимым фактором. Этот вывод подтверждается данными табл. 4, где приведены результаты расчетов влияния влажности  $W$  на глубину образованной в грунте колеи как результат суммирования глубин от штампов 1 ( $h_{к1}$ ) и 2 ( $h_{к2}$ ) для четырех (но с модификациями их – 5) типов (I–IV) транспортных систем (см. табл. 2) при фиксированных значениях  $E = 1$  МПа, среднем угле маневрирования  $\theta = 10^\circ$  и  $H = 0,47$  м.

Таблица 4

Расчетные значения глубины колеи (см, или  $10^{-2}$  м)  
для разных форвардеров

$W, \%$	I			II-к			II-г			III			IV		
	$h_{c1}$	$h_{c2}$	$h_k$	$h_{c1}$	$h_{c2}$	$h_k$	$h_{c1}$	$h_{c2}$	$h_k$	$h_{c1}$	$h_{c2}$	$h_k$	$h_{c1}$	$h_{c2}$	$h_k$
30	11	14	25	12	15	27	12	1	13	3	11	14	3	6	9
35	15	19	36	17	26	43	16	8	24	10	15	25	9	11	20
40	18	22	40	21	26	47	19	12	31	13	20	33	13	15	28
45	21	26	47	24	23	47	22	14	36	16	22	38	16	17	33

При использовании 6-колесного форвардера рассчитаны два варианта, когда вторая и третья колесные пары (без гусениц каждая) независимо создают давление в 40 кПа (тип II-к) и с гусеницами – колесные пары считаются единым штампом, создающим при увеличенной площади контакта давление  $q_0 = 27$  кПа (тип II-г).

На рис. 9 приведена зависимость относительной (по отношению к  $H = 0,47$  м) глубины колеи  $h_k$  от влажности  $W$  для тех же четырех типов форвардеров.

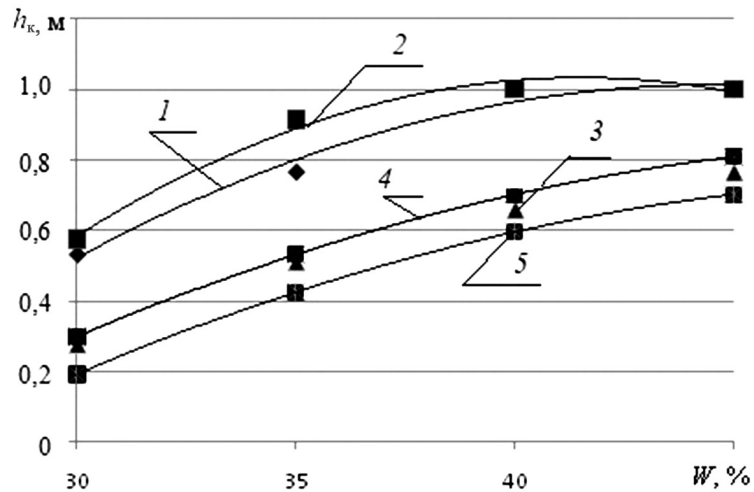


Рис. 9. Влияние влажности  $W$  оттаявшего грунта на глубину  $h_k$  колеи относительно глубины зоны мерзлоты для разных форвардеров (нумерация кривых соответствует номеру системы из табл. 4): 1 – I; 2 – II-к; 3 – II-г; 4 – III; 5 – IV

Fig. 9. The effect of moisture  $W$  of the thawed soil at the rut depth  $h_k$  relative to the depth of the permafrost zone for forwarder types (curve numbering corresponds to the type number of the system from Table 4): 1 – I; 2 – II-k; 3 – II-g; 4 – III; 5 – IV

По мере прохода трелевочной системы по одному и тому же волоку, отмеченные особенности будут циклично воспроизводиться в режиме как статических, так и динамических нагрузок [18].

### Выводы

1. Использование трелевочных систем с высоким давлением в шинах (рис. 9, типы I, II, кривые 1, 2) на оттаявших почвогрунтах повышенной влажности (35 % и более) увеличивает глубину колеи до значений (0,8...1,0)  $H$  (относительно глубины  $H$ ), т. е. практически до границы с зоной мерзлоты. Это позволяет сделать вывод о низкой эффективности использования указанных типов систем в данных природно-климатических условиях.

2. Применение систем с низким давлением в шинах (тип II-г–IV) существенно снижает глубину колеи, особенно в почвогрунтах, влажность которых не превышает 30 %. В этом случае величина  $h_k$  близка к нормативным ограничениям, равным 0,1 м, и использование этих систем следует признать эффективным в данных условиях.

3. Разработанная математическая модель расчета параметров процесса разрушения массива оттаивающего почвогрунта на границе с зоной мерзлоты позволяет на стадии проектных решений произвести оценку предполагаемых значений глубины образованной колеи с учетом технических возможностей форвардеров и их маневрирования в конкретных производственных условиях.

4. При классификации участков лесозаготовок по параметру влажности возможно устанавливать допустимые диапазоны эффективной эксплуатации различных типов трелевочных систем.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Велли Ю.Я., Докучаев В.В., Федоров Н.Ф. Здания и сооружения на Крайнем Севере. Л.: Госстройиздат, 1963. 492 с. [Velli Yu.Ya., Dokuchaev V.V., Fedorov N.F. *Buildings and Structures in the Far North*. Leningrad, Gosstroyizdat Publ., 1963. 492 p.]
2. Газизов А.М., Шапиро В.Я., Григорьев И.В. Влияние влажности на развитие процесса разрушения коры при роторной окорке // Вестн. МГУЛ–Лесн. вестн. 2008. № 6. С. 129–133. [Gazizov A.M., Shapiro V.J., Grigorev I.V. Agency of Moisture on Evolution of Process of Destruction of a Bark at Rotor Disbark. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoy vestnik* [Forestry Bulletin], 2008, no. 6, pp. 129–133].
3. Григорьева О.И., Григорьев М.Ф., Григорьев И.В. Анализ естественного лесовозобновления в Алексеевском участковом лесничестве Республики Саха (Якутия) // Forest Engineering: материалы науч.-практ. конф. с междунар. участием, г. Якутск, 30–31 мая 2018 г. Якутск: Изд. дом СВФУ. 2018. С. 72–75. [Grigoreva O.I., Grigorev M.F., Grigorev I.V. Analysis of Natural Reforestation in the Alekseevsky Forestry of the Sakha Republic (Yakutia). *Forest Engineering: Proceedings of Science and Practical Conference with International Participation, Yakutsk, May 30–31, 2018*. Yakutsk, NEFU Publ., 2018, pp. 72–75].
4. Котляренко В.И. Основные направления повышения проходимости колесных машин М.: МГИУ, 2008. 285 с. [Kotlyarenko V.I. *The Main Directions of Improving the Mobility of Wheeled Vehicles*. Moscow, MSIU Publ., 2008. 285 p.]
5. Куницкая О.А., Шапиро В.Я., Бурмистрова С.С., Григорьев И.В. Определение оптимальных параметров процесса прессования и обезвоживания пропитанных древесных материалов // Вестн. МГУЛ–Лесн. вестн. 2012. № 4. С. 110–115. [Kunitskaja O.A., Shapiro V.J., Burmistrova S.S., Grigorev I.V. Model of Processes and Dehydration of the Impregnated Wood Materials. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoy vestnik* [Forestry Bulletin], 2012, no. 4, pp. 110–115].
6. Морозов Е.М., Зернин М.В. Контактные задачи механики разрушения. Изд. 2-е. М.: ЛИБРОКОМ, 2010. 544 с. [Morozov E.M., Zernin M.V. *Contact Problem of Fracture Mechanics*. Moscow, LIBROKOM Publ., 2010. 544 p.]
7. Роман Л.Т., Царапов М.Н., Котов П.И., Волохов С.С., Мотенко Р.Г., Черкасов А.М., Штейн А.И., Костюсов А.И. Пособие по определению физико-механических свойств промерзающих, мерзлых и оттаивающих дисперсных грунтов. М.: Унив. кн., 2018. 188 с. [Roman L.T., Tsarapov M.N., Kotov P.I., Volokhov S.S., Motenko R.G., Cherkasov A.M., Shteyn A.I., Kostousov A.I. *A Handbook for Determination of the Physical and Mechanical Properties of Freezing through, Frozen and Thawing Dispersive Soils*. Moscow, Universitetskaya kniga Publ., 2018. 188 p.]
8. Теринов Н.Н., Герц Э.Ф., Безгина Ю.Н. Развитие техники и технологий лесозаготовок на Урале // Изв. вузов. Лесн. журн. 2016. № 2. С. 81–90. [Terinov N.N., Gerts E.F., Bezgina Yu.N. Development of Logging Technology in the Urals. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2016, no. 2, pp. 81–90]. DOI: [10.17238/issn0536-1036.2016.2.81](https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2016.2.81), URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/f46/terinov.pdf>
9. Цытович Н.А. Механика мерзлых грунтов. М.: Высш. шк., 1983. 288 с. [Tsytovich N.A. *Mechanics of Frozen Soils*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1983. 288 p.]
10. Шапиро В.Я., Шапиро Н.А. Использование цепей Маркова для прогноза эффективности ПИФов // Экономическое развитие и практика: материалы Междунар. науч. конф. (Санкт-Петербург, 05–07 апреля 2007 г.). СПб.: Образоват. центр экономики и менеджмента, 2007. С. 79–81. [Shapiro V.Ya., Shapiro N.A. The Use of Markov Chains for the Efficiency Forecast of Mutual Funds. *Economic Development and Practice: Proceedings of the International Scientific Conference (Saint Petersburg, April 5–7, 2007)*. Saint Petersburg, Obrazovatel'nyy tsentr ekonomiki i menedzhmenta Publ., 2007, pp. 79–81].

11. Шегельман И.Р., Будник П.В. Особенности оценки расчетной рейсовой нагрузки на antecedentной стадии проектирования бесчokerной трелевочной системы на основе машинного эксперимента // Изв. вузов. Лесн. журн. 2019. № 3. С. 82–96. [Shegelman I.R., Budnik P.V. Features of Calculated Truck Load Estimation at Antecedent Design Stage of Chokerless Skidding System Based on Computer Experiment. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2019, no. 3, pp. 82–96]. DOI: [10.17238/issn0536-1036.2019.3.82](https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.3.82), URL: [http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/5ee/82\\_96.pdf](http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/5ee/82_96.pdf)
12. Antoniadu C., Şlincu C., Stan C., Ciobanu V., Ştefan V. Maximum Loading Heights for Heavy Vehicles Used in Timber Transportation. *Bulletin of the Transilvania University of Braşov. Series II: Forestry. Wood Industry. Agricultural Food Engineering*, 2012, vol. 5(54), no. 1, pp. 7–12.
13. Cerato A.B., Lutenegeger A.J. Specimen Size and Scale Effects of Direct Shear Box Tests of Sands. *Geotechnical Testing Journal*, 2006, vol. 29, iss. 6, pp. 507–516. DOI: [10.1520/GTJ100312](https://doi.org/10.1520/GTJ100312)
14. Ding L., Yang H., Gao H., Li N., Deng Z., Guo J., Li N. Terramechanics-Based Modeling of Sinkage and Moment for *in-situ* Steering Wheels of Mobile Robots on Deformable Terrain. *Mechanism and Machine Theory*, 2017, vol. 116, pp. 14–33. DOI: [10.1016/j.mechmachtheory.2017.05.011](https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2017.05.011)
15. Grigorev M., Grigoreva A., Grigorev I., Kunickaya O., Stepanova D., Savvinova M., Sidorov M., Tomashevskaya E., Burtseva I., Zakharova O. Experimental Findings in Forest Soil Mechanics. *EurAsian Journal of BioSciences*, 2018, vol. 12, iss. 2, pp. 277–287.
16. Han S.-K., Han H.-S., Page-Dumroese D.S., Johnson L.R. Soil Compaction Associated with Cut-to-Length and Whole-Tree Harvesting of a Coniferous Forest. *Canadian Journal of Forest Research*, 2009, vol. 39(5), pp. 976–989. DOI: [10.1139/X09-027](https://doi.org/10.1139/X09-027)
17. Ivanov V.A., Grigorev I.V., Gasparyan G.D., Manukovsky A.Y., Zhuk A.Yu., Kunitskaya O.A., Grigoreva O.I. Environment-Friendly Logging in the Context of Water Logged Soil and Knob-and-Ridge Terrain. *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments*, 2018, vol. 41, no. 2, pp. 22–27. DOI: [10.26480/jmerd.02.2018.22.27](https://doi.org/10.26480/jmerd.02.2018.22.27)
18. Khitrov E.G., Andronov A.V. Bearing Flootation of Forest Machines (Theoretical Calculation). *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 695, art. 012020. DOI: [10.1088/1757-899X/695/1/012020](https://doi.org/10.1088/1757-899X/695/1/012020)
19. Lepilin D., Laurén A., Uusitalo J., Tuittila E.-S. Soil Deformation and Its Recovery in Logging Trails of Drained Boreal Peatlands. *Canadian Journal of Forest Research*, 2019, vol. 49(7), pp. 743–751. DOI: [10.1139/cjfr-2018-0385](https://doi.org/10.1139/cjfr-2018-0385)
20. Nawaz M.F., Bourrié G., Trolard F. Soil Compaction Impact and Modelling. A Review. *Agronomy for Sustainable Development*, 2012, vol. 33, pp. 291–309. DOI: [10.1007/s13593-011-0071-8](https://doi.org/10.1007/s13593-011-0071-8)

## THE STUDY OF THE DESTRUCTION PROCESS OF FROZEN AND THAWING SOILS EXPOSED TO THE SKIDDING SYSTEM

**S.E. Rudov**<sup>1</sup>, Candidate of Engineering; ResearcherID: [AAC-9563-2020](https://orcid.org/0000-0002-9900-0929),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9900-0929>

**V.Ya. Shapiro**<sup>2</sup>, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [AAC-9658-2020](https://orcid.org/0000-0002-6344-1239),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6344-1239>

**I.V. Grigorev**<sup>3</sup>, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [S-7085-2016](https://orcid.org/0000-0002-5574-1725),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>

**O.A. Kunitskaya**<sup>3</sup>, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [AAC-9568-2020](https://orcid.org/0000-0001-8542-9380),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>

**O.I. Grigoreva**<sup>2</sup>, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [AAC-9570-2020](https://orcid.org/0000-0001-5937-0813),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5937-0813>



<sup>1</sup>Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny, Tikhoretskiy prosp., 3, K-64, Saint Petersburg, 194064, Russian Federation; e-mail: 89213093250@mail.ru

<sup>2</sup>St. Petersburg State Forest Engineering University named after S.M. Kirov, Institutskiy per., 5, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation; e-mail: shapiro54vlad@mail.ru, grigoreva\_o@list.ru

<sup>3</sup>Yakut State Agricultural Academy, sh. Sergelyakhskoye, 3 km, 3, Yakutsk, 677007, Russian Federation; e-mail: silver73@inbox.ru, ola.ola07@mail.ru

Wood logging in the forests of the cryolithozone is growing more urgent for the Russian Federation due to the depletion of available reserves of mature commercial forests in southern and Central Siberia, the Republic of Buryatia, and Khabarovsk Krai, while the development of woodworking enterprises in the Far Eastern Federal District. During the operation of modern forest machines, for instance wheeled forwarders, the issues of their efficiency, first of all, mobility and technological productivity in the specific production and geotechnical conditions are now becoming ever more relevant. These circumstances together with the necessity to minimize the anthropogenic load on the environment put forward the problem of optimizing the number of passes of the skidding system by one run into the most pressing ones. Special conditions for the operation of skidding systems take place in logging operations on frozen and thawing soils. In the first case, there is a sufficiently large volume of ice in the soil massif. The ice has a great impact on increasing the bearing capacity of the soil under the influence of the initial vertical load of the skidding system. In the second case, frozen soil is oversaturated with water when thawing; therefore, the natural bonds between the solid particles grow weak, and the physical and mechanical properties of the soil lose their original values. The forwarder forms a rut in the immediate area of contact of the wheel with the soil. The larger the size of the area, the higher the force transferred to the soil for implementation of the necessary traction. We have developed the mathematical model of calculation of parameters of the destruction process of the thawing soil massif on the border with the permafrost zone. The model allows to make an assessment of hypothetical values of depth of the formed rut including engineering capabilities of forwarders and their maneuvering in the work environment at the design stage.

**For citation:** Rudov S.E., Shapiro V.Ya., Grigorev I.V., Kunitskaya O.A., Grigoreva O.I. The Study of the Destruction Process of Frozen and Thawing Soils Exposed to the Skidding System. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 2, pp. 101–117. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-2-101-117

**Keywords:** frozen soil, logging, skidding system, soil compaction, soil deformation.

Поступила 01.04.19 / Received on April 1, 2019

---

---