



УДК 634.037.4

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.1.106

**ОСОБЕННОСТИ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ  
ТРЕЛЕВОЧНОЙ СИСТЕМЫ С МЕРЗЛЫМ ПОЧВОГРУНТОМ***Рудов С.Е.<sup>1</sup>, канд. техн. наук**Шапиро В.Я.<sup>2</sup>, д-р техн. наук, проф.**Григорьев И.В.<sup>3</sup>, д-р техн. наук, проф.**Куницкая О.А.<sup>3</sup>, д-р техн. наук, проф.**Григорьева О.И.<sup>2</sup>, канд. с.-х. наук, доц.*

<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, 3-й км, д. 3, ш. Сергеляхское, г. Якутск, Республика Саха (Якутия), Россия, 677007; e-mail: silver73@inbox.ru, ola.ola07@mail.ru

Проведение лесозаготовительных работ в районах Крайнего Севера происходит в крайне сложных климатических условиях. В традиционный для заготовки древесины зимний период лесная техника в этих районах работать не может из-за экстремально низких температур, которые не выдерживают металл и гидравлика машин. Поэтому период устойчивого проведения лесосечных работ и вывозки заготовленной древесины сравнительно невелик. Переходы температуры окружающего воздуха от отрицательных к положительным значениям, характерные для резко континентального климата, например в Республике Саха (Якутия), останавливают лесозаготовительный процесс на большей части лесосек из-за оттаивания мерзлых почвогрунтов. В процессе эксплуатации трелевочных систем необходимо считаться с тем, что мерзлый почвогрунт представляет собой сложную многокомпонентную среду. На основании результатов исследований установлено, что на определенных глубинах при условии податливости формируется так называемое первичное ядро уплотнения почвогрунта. В случае, если компоненты поля напряжений на больших глубинах обеспечат выполнение принятых критериев разрушения мерзлого почвогрунта, то ядро уплотнения будет перемещаться вниз, и под действием трелевочной системы почвогрунт получит дополнительное уплотнение. Процесс погружения ядра уплотнения сопровождается понижением температуры, что в свою очередь обуславливает рост прочности и модуля упругости. Таким образом, установленные закономерности влияния температуры и влажности мерзлых грунтов на их физико-механические свойства позволяют более точно оценить величину начальных контактных параметров в процессе трелевки пачки лесоматериалов с заранее заданными статическими нагрузками. Полученные ре-

---

*Для цитирования:* Рудов С.Е., Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Григорьева О.И. Особенности контактного взаимодействия трелевочной системы с мерзлым почвогрунтом // Лесн. журн. 2019. № 1. С. 106–119. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.1.106

зультаты являются основой для формирования начальных условий при расчетах параметров разрушения напряженно-деформированного массива мерзлого почвогрунта и его уплотнения под действием статических нагрузок, возникающих в процессе эксплуатации различных лесных машин и трелевочных систем.

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

### *Введение*

Лесные экосистемы на мерзлых почвогрунтах особо ранимы. Вредное воздействие лесных машин через уплотнение и деформацию почвогрунтов на экосистемы лесосек известно исследователям как в России, так и за рубежом [5, 13–17].

Необходимо выделить три основные субстанции мерзлого почвогрунта: собственно твердый высокоплотный скелет грунта;

вода в различном состоянии, в первую очередь свободная и связанная с переменной плотностью, засоленностью и, как следствие, существенно отличающаяся температурой замерзания;

лед.

Эти обстоятельства с учетом фактора низких температур, различной влажности и засоленности мерзлого почвогрунта оказывают сильное влияние на конечные показатели его физико-механических свойств.

Основные показатели физико-механических свойств такого объекта подробно изучены в работах [1, 2, 6, 9], где особо отмечается влияние условий мгновенного и длительного приложения статических нагрузок, при которых характеристики мерзлого почвогрунта, в частности прочностные, отличаются весьма существенно: кратно, а в ряде случаев на порядок и более.

В нашем исследовании условимся, что при работе лесных машин показатели физико-механических свойств соответствуют приложенным мгновенным нагрузкам.

Цель исследования – установление особенностей взаимодействия трелевочной системы с мерзлым почвогрунтом.

### *Объекты и методы исследования*

Для основных разновидностей мерзлого грунта (песков, супесей, суглинков и др.) ранее [1, 6, 9] выявлены некоторые общие закономерности. В частности установлено, что его прочность увеличивается при снижении температуры, степени дисперсности, влажности, а также возрастании льдистости до полного насыщения пор грунта льдом и интенсивности приложения внешней нагрузки. Прочность мерзлого грунта и степень его сопротивления внешним нагрузкам уменьшается по мере увеличения пористости и снижения плотности грунта. Учитывая многокомпонентность мерзлого почвогрунта, который представляет собой многослойную систему, состоящую из нескольких органических и одного или нескольких минеральных слоев [15], под его плотностью ( $\rho$ ) следует понимать средневзвешенное по объемам значение.

Грунты по плотности классифицируют на 5 категорий, начиная от категории I (очень рыхлые,  $\rho = 1,1 \dots 1,3 \text{ т/м}^3$ ) до категории V (очень плотные,  $\rho > 2,1 \text{ т/м}^3$ ).

Очевидно, что одним из основных показателей физико-механических свойств мерзлого почвогрунта является его температура. При этом для каждого грунта характерна своя температура начала замерзания, в среднем  $T_3 = -0,2... -0,4$  °С.

Проиллюстрируем это графиками (рис. 1), полученными на основе опытных данных [6] для некоторых мерзлых грунтов в районе пос. Амдерма.

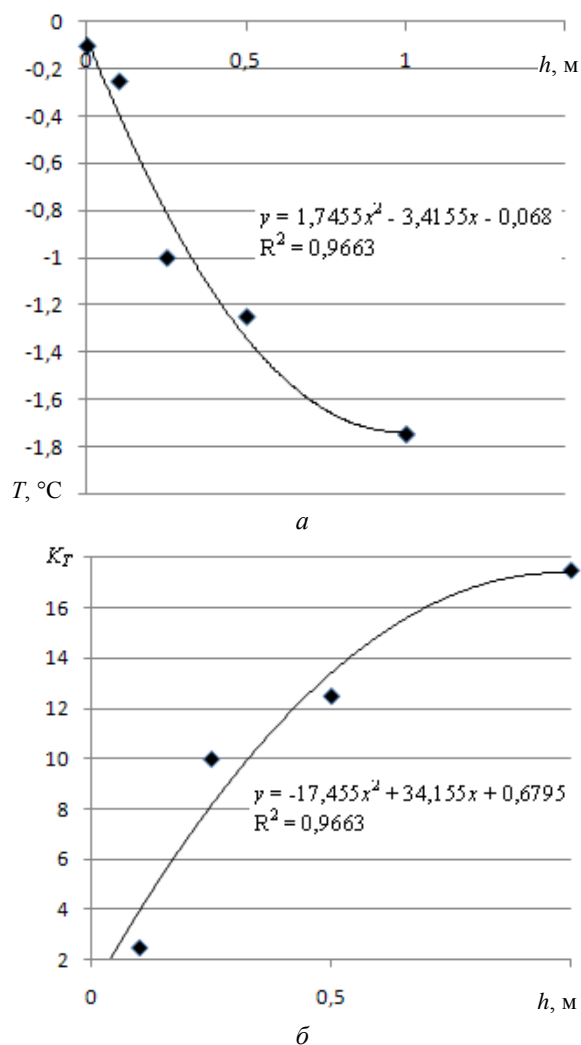


Рис. 1. Понижение температуры грунта с ростом глубины его залегания:  $a$  – изменение абсолютных значений температур;  $b$  – относительных

Fig. 1. Soil temperature decrease with increase of its depth: change in absolute ( $a$ ) and relative ( $b$ ) temperature values

На рис. 1,  $a$  представлен график изменения температуры  $T$  от глубины залегания слоя грунта  $h$ . Нагляднее данные рис. 1,  $a$  можно представить в относительных (безразмерных) величинах. Если температуру на поверхности

почвогрунта принять за масштабную единицу, то на рис. 1, б имеем безразмерный коэффициент  $K_T$ , характеризующий интенсивность понижения температуры с ростом текущей координаты (глубины)  $h$ .

С высокой степенью достоверности зависимость на рис. 1, а описывается полиномом второй степени, причем при текущих значениях  $h \leq 0,5$  м понижение температуры происходит практически линейно. Необходимо отметить, что мощность мерзлого слоя грунтов ( $h_3$ ), как правило, изменяется в пределах  $h_3 = 0,6 \dots 2,5$  м. Таким образом, будем считать, что процесс контактного взаимодействия трелевочной системы реализуется в пределах изменения глубины  $h$  от 0 до  $h_3$ .

Зависимость  $K_T(h)$  с высоким коэффициентом детерминации ( $R^2 = 0,9663$ ) можно представить как

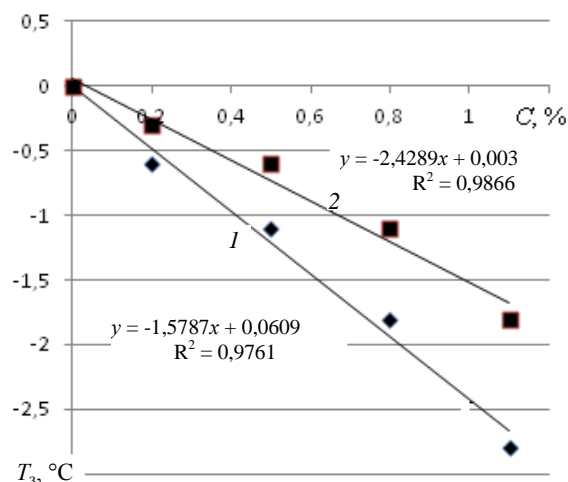
$$K_T(h) = -17,455h^2 + 34,155h + 0,6795. \quad (1)$$

Температура замерзания мерзлого грунта  $T_3$  зависит от степени его засоленности. При этом мерзлые грунты могут быть слабо (суммарное содержание легкорастворимых солей в массе сухого грунта  $C = 0,3$  %) и избыточно ( $C > 8 \dots 10$  %) засоленными.

На рис. 2 представлено влияние параметра  $C$  на  $T_3$  для слабо и средnezасоленных маловлажных и весьма влажных мерзлых грунтов с учетом их влажности ( $W$ ).

Рис. 2. Влияние засоленности мерзлого грунта на его температуру замерзания с учетом влажности: 1 –  $W = 20$  %; 2 – 40 %

Fig. 2. Influence of frozen soil salinity on its freezing point with regard to humidity: 1 –  $W = 20$  %; 2 – 40 %



Хорошая линейная аппроксимация данных позволяет по значениям угловых коэффициентов прямых сделать заключение, что увеличение влажности в 2 раза снижает зависимость  $T_3$  от  $C$  в 1,53 раза.

Как отмечалось выше, по данным исследований [1], параметр температуры существенно влияет на прочностные показатели мерзлого грунта, среди которых необходимо отметить пределы его прочности на сжатие ( $\sigma_{сж}$ ), сдвиг ( $\sigma_{сд}$ ) и разрыв ( $\sigma_p$ ).

В табл. 1 приведены результаты исследований [1] для четырех мерзлых грунтов (МГ1 – пылевой песок, МГ2 – кварцевый песок, МГ3 – супесь, МГ4 – глина) и льда с учетом понижения температуры.

Таблица 1

**Изменение предела прочности на сжатие  $\sigma_{сж}$  ( $10^2$  кПа)  
мерзлых грунтов и льда при понижении температуры**

$T, ^\circ\text{C}$	МГ1	МГ2	МГ3	МГ4	Лед
-0,1	80	45	9	2	1
-1,0	108	62	15	19	5
-2,0	120	73	21	42	13
-3,0	131	81	31	50	21
-4,0	138	85	41	56	28
-5,0	144	93	48	61	39
-10,0	165	122	59	89	47

Анализ данных табл. 1 показывает, что значения прочности на сжатие характеризуются существенной вариативностью даже для одной группы мерзлых грунтов, в частности МГ1, что снижает надежность прогнозных и расчетных методов.

Для сравнительного анализа и количественного сопоставления данных табл. 1 и рис. 3, *a* опытные значения  $\sigma_{сж}$  для песков и супеси представлены в безразмерном виде (по аналогии с рис. 1, *б*) при заданной температуре на поверхности грунта, принятой  $T = -0,1$  °C.

Как видно на примере песков (кривые 1 и 2 на рис. 3, *a*), несмотря на существенные различия их абсолютных значений  $\sigma_{сж}$ , достигающие в среднем 50 % и более, относительные величины  $\sigma_{сж}$  отличаются незначительно – менее чем на 10 %, поэтому расхождение кривых 1 и 2 – небольшое. Кривая 3 (для супеси) свидетельствует уже о более существенном влиянии понижения температуры на прочность данного мерзлого грунта при одноосном сжатии.

Представляет интерес анализ изменения прочностных свойств мерзлой глины при сжатии по сравнению со льдом (рис. 3, *б*). В этом случае абсолютные значения  $\sigma_{сж}$  отличаются кратно, хотя кривые относительного увеличения прочности с понижением температуры весьма близки.

Полученный результат можно объяснить тем, что глина, как правило, имеет повышенную влажность, а большое содержание замерзшей воды обуславливает ее поведение при сжатии, схожее с процессом сжатия льда. Для практических расчетов удобно использовать аналитические связи  $K_{сж}(T)$ .

Для мерзлой супеси данное соотношение хорошо ( $R^2 = 0,9744$ ) описывается следующей полиномиальной зависимостью:

$$K_{сж}(T) = -0,0468T^2 - 1,075T - 0,0585. \quad (2)$$

Если обратиться к количественной оценке влияния влажности на прочностные свойства мерзлого грунта, то, по данным [1], для супесей зависимость  $\sigma_{сж}$  от  $W$  подчиняется закону квадратичной гиперболы в диапазоне изменения  $W$  от 10...15 % (сухие супеси) до 35...40 % (увлажненные супеси).

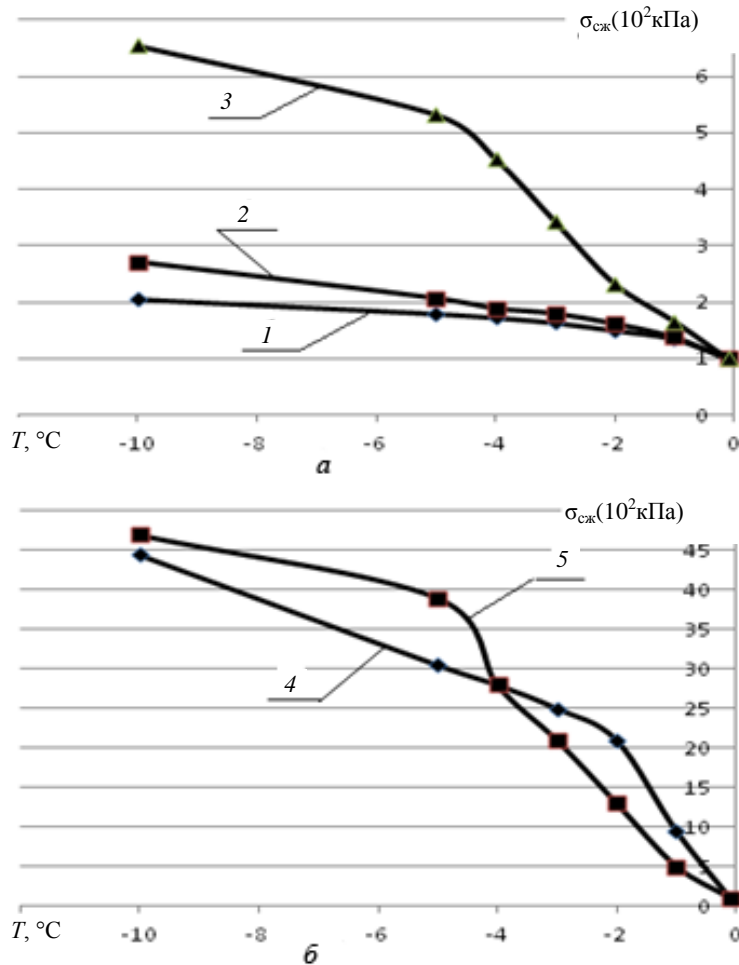


Рис. 3. Зависимость относительной величины  $\sigma_{сж}$  от  $T$  для МГ1 (1), МГ2 (2), МГ3 (3), МГ4 (4) и льда (5)

Fig. 3. Dependence of the relative value of  $\sigma_{сж}$  (ultimate compression strength) from  $T$  (temperature) for frozen soils (1–4) and ice (5)

Для глины при  $T = -3...-4$  °С снижение  $\sigma_{сж}$  от 5000 до 3500 кПа отмечается при росте  $W$  от 15 до 35 %. Для конкретных технологических условий необходимо определять соответствующую зависимость  $\sigma_{сж}(W)$ .

Рассмотрим еще один важный прочностной показатель – предел прочности на сдвиг  $\sigma_{сд}$ .

Касательные напряжения  $\tau$  по теории Кулона–Мора зависят от сцепления  $K$  и угла внутреннего трения  $\phi$ , которые в общем случае зависят от температуры  $T$  [1]. В свою очередь плотность мерзлого почвогрунта  $\rho$  тесно связана с углом  $\phi$ .

В табл. 2 приведены абсолютные значения прочности на сдвиг  $\sigma_{сд}$  ( $10^2$  кПа) для двух видов мерзлого грунта (для супеси МГ3 и глины МГ4) средней плотности ( $\rho = 1,7...1,9$  т/м<sup>3</sup>) в сравнении с прочностью на сдвиг льда по мере понижения  $T$ .

Таблица 2

**Изменение предела прочности на сдвиг  $\sigma_{сд}$  ( $10^2$  кПа)  
мерзлых грунтов и льда при понижении температуры**

$T, ^\circ\text{C}$	МГЗ	МГ4	Лед
-0,1	1,2	1,1	0,8
-0,5	4,0	3,0	2,0
-1,0	10,0	8,0	4,0
-2,0	14,0	12,0	15,0
-3,0	21,0	18,0	19,0
-4,0	26,0	22,0	25,0

На рис. 4 данные табл. 2 по аналогии с рис. 3 представлены в безразмерном виде.

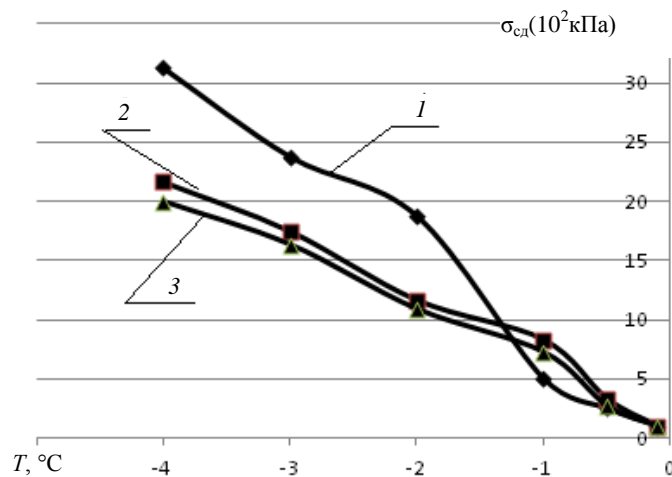


Рис. 4. Зависимости относительной величины  $\sigma_{сд}$  от  $T$  для льда (1), МГЗ (2) и МГ4 (3)

Fig. 4. Dependences of the relative value of  $\sigma_{сд}$  (ultimate shear strength) from  $T$  (temperature) for ice (1) and frozen soils (1–3)

Одной из основных характеристик упруго-деформационных свойств мерзлого почвогрунта является модуль упругости  $E$ , равный отношению сжимающих напряжений к относительной упругой деформации в условиях кратковременного действия нагрузок.

В табл. 3 приведены абсолютные значения модуля упругости для ряда грунтов в зависимости от их температуры [8].

Таблица 3

**Изменение модуля упругости мерзлых грунтов  
при понижении температуры  $T$**

Грунт	Значение $E$ ( $10^3$ кПа) при $T, ^\circ\text{C}$		
	-0,2...-0,5	-0,5...-1,5	-1,5...-6,0
Песок	1000	3000	5000
Супесь	800	2000	3000
Суглинок	500	1200	2000
Глина	300	600	1000

Зависимость безразмерного коэффициента  $K_E(T)$  по мере снижения температуры описывается практически функционально ( $R^2 = 1$ ):

$$K_E(T) = -0,545T^2 - 3,0435T + 0,0015. \quad (3)$$

Устойчивых корреляционных связей между модулем упругости и влажностью грунта  $W$  по данным [1] выявить не удалось.

В диапазоне изменения температуры от  $-0,1$  до  $-1,0$  °С коэффициент Пуассона  $\nu$  колеблется в пределах  $0,2...0,5$  [1, 2, 8], при этом он существенно зависит от влажности.

Характер поведения безразмерного коэффициента  $K_\nu(W)$  практически функционально описывается следующей экспоненциальной зависимостью:

$$K_\nu(W) = 0,38 \exp(0,0534 W). \quad (4)$$

Коэффициент Пуассона определяет величину коэффициента бокового распора:

$$\lambda = \nu / (1 - \nu).$$

Поскольку нормальные (сжимающие) и тангенциальные (растягивающие) компоненты тензора напряжений в моделях разрушения грунтов с внутренним трением [3, 10] отличаются именно на величину  $\lambda$ , то для влажных грунтов по мере приближения  $\lambda$  к значениям  $0,45...0,50$  главные напряжения будут практически совпадать.

Полученные оценки влияния параметров влажности и температуры на показатели физико-механических свойств мерзлых почвогрунтов позволяют перейти к решению задачи воздействия лесных машин и трелевочных систем на эти почвогрунты.

#### *Результаты исследования и их обсуждение*

Контактные задачи механики разрушения сплошных сред с заранее заданными свойствами, в частности немерзлых грунтов или массивов коры деревьев различной температуры, в результате воздействия инденторов разнообразной конфигурации подробно рассмотрены в работах [4, 11, 12].

Пусть трелевочная система состоит из трактора массой  $G$  и тележки с пачкой лесоматериалов массой  $Q$  и колесная база трелевочной системы имеет характерный радиус колеса (шины)  $R$ .

Под действием суммарной статической нагрузки массой  $P = G + Q$  на поверхности почвогрунта при условии его податливости образуется зона контакта радиусом  $a$ , площадью  $S = \pi a^2$  и глубиной контактного сближения (начальная глубина погружения колеса)  $h_0$ . Эти параметры являются определяющими [12] при оценке действующих начальных давлений трелевочной системы в зоне контакта шины с мерзлым почвогрунтом.

Основываясь на положениях [7], определим параметры  $a$  и  $h_0$ :

$$a = \sqrt[3]{\frac{3P(1-\nu^2)R}{4E}}; \quad h_0 = a^2/R. \quad (5)$$

Суммарная нагрузка  $P$ , распределенная по площади  $S$ , формирует начальное усредненное давление  $q_a$ , а также начальные максимальные вертикальное ( $\sigma_v$ ) и горизонтальное ( $\sigma_r$ ) давления в центре площадки:

$$q_a = \frac{P}{S}f; \quad \sigma_v = \frac{3}{2}q_a; \quad \sigma_r = \lambda\sigma_v, \quad (6)$$

где  $f$  – коэффициент сопротивления качению колеса.



Как следует из (6), для влажных грунтов при стремлении  $\nu$  к предельному значению 0,5 горизонтальная компонента  $\sigma_r \approx \sigma_v$  ( $\lambda \approx 1$ ) и напряженное состояние почвогрунта в плоской постановке близко к состоянию двустороннего сжатия.

Модуль упругости  $E$  учтен в (6) опосредованно через соотношение (5) как переменная величина, зависящая от температуры  $T$  в соответствии (3).

Значения указанных начальных параметров контактного разрушения при заданной статической нагрузке массой  $P$  (или удельной нагрузке  $m = P/R$ ) формируют начальные компоненты (вертикальные и горизонтальные) тензора напряжений и дальнейшее развитие процесса разрушения почвогрунта в зоне контакта при превышении расчетных напряжений пределов прочности мерзлого почвогрунта (на сжатие  $\sigma_{сж}$ , сдвиг  $\sigma_{сд}$  или разрыв  $\sigma_r$ ) в зависимости от принятого критерия разрушения. При этом учет температуры почвогрунта в прочностных характеристиках базируется на данных рис. 3 и 4.

Поскольку из отмеченных выше прочностных показателей минимальные значения принимает  $\sigma_r$ , то для оценок размеров зон разрушения целесообразно принять в качестве критерия разрушения следующее неравенство:  $\sigma_r > \sigma_p$ . Если данный критерий выполняется и несущая способность почвогрунта нарушена, то под действием нагрузки массой  $P$  (суммарной массы трелевочной системы) будет иметь место погружение колеса на величину контактного сближения  $h_0$ .

Таким образом, параметры  $a$  и  $h_0$  зависят от суммарной массы трелевочной системы, размера ее колесной базы, а интегрально – от удельной нагрузки  $m$ , а также от упругопластических свойств мерзлого почвогрунта, в первую очередь от модуля упругости  $E$ , коэффициента Пуассона  $\nu$ , корреляционно зависящих от его температуры и влажности.

Пробные расчеты были произведены для мерзлой супеси с плотностью в естественном залегании  $\rho = 1,7 \text{ т/м}^3$  при нормальной влажности ( $W = 25\%$ ) с температурой замерзания  $T_3 = -0,2 \text{ }^\circ\text{C}$  и при температуре на поверхности  $T_{п} = -0,1 \text{ }^\circ\text{C}$  (практически талый грунт). Мощность мерзлого слоя принята  $h_3 = 0,6 \text{ м}$ .

Параметры трелевочной системы в расчетах: масса  $G = 14 \text{ т}$ , масса  $Q = 5 \text{ т}$ , т. е. общая масса системы  $P = 19 \text{ т}$ ;  $R = 0,45 \text{ м}$  (статическая нагрузка  $m = 42,2 \text{ т/м}$ ), коэффициент  $f = 0,1$ . Коэффициент Пуассона  $\nu = 0,29$  определен для заданной влажности  $W$  с помощью соотношения (4).

Для принятой температуры  $T_{п} = -0,1 \text{ }^\circ\text{C}$  с учетом соотношения (2) получены значения  $\sigma_{сж}$  и  $\sigma_p$ , равные соответственно 48,52 и 9,70 кПа, а с учетом соотношения (3) – значение модуля упругости  $E = 240,32 \text{ кПа}$ .

В совокупности для этих данных из соотношений (6) имеем: среднее давление  $q_a = 72 \text{ кПа}$ ; максимальное вертикальное давление  $q_v = 107,85 \text{ кПа}$ ; максимальное горизонтальное давление  $q_r = 44,05 \text{ кПа}$ , т. е. полученные предельные нагрузки существенно превышают прочностные характеристики грунта в зоне его поверхностного залегания.

При выполнении разрушения за счет разрыва и тем самым формирования условий для податливости грунта произведем расчеты по определению зависимости параметров контактного взаимодействия трелевочной системы с поверхностью мерзлого почвогрунта.

Результаты расчетов представлены на рис. 5, где отражено влияние температуры  $T$  и влажности  $W$  на контактные параметры  $a$  (кривая 1 – радиус зоны контакта) и  $h_o$  (кривая 2 – глубина первичного погружения трелевочной системы).

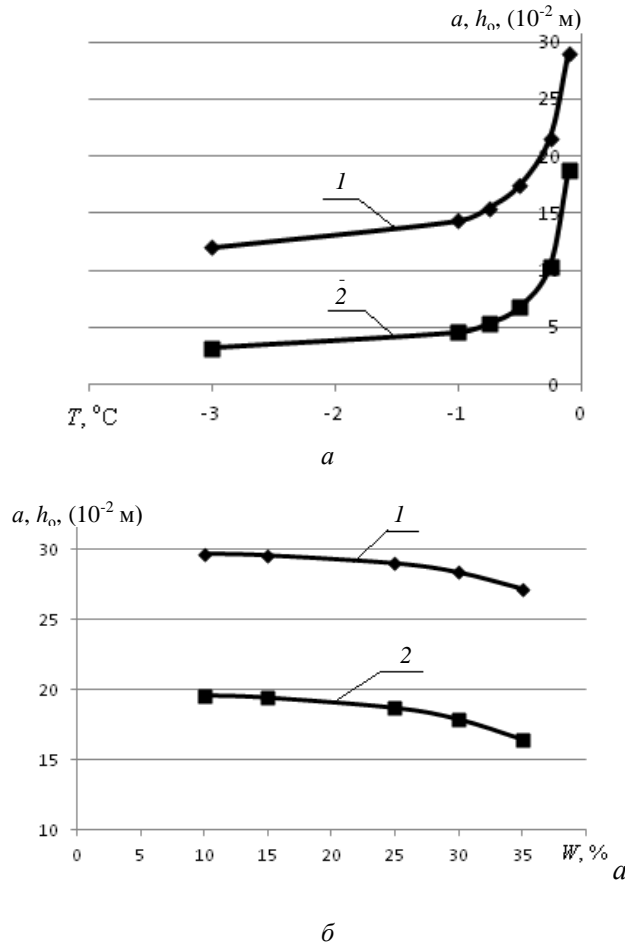


Рис. 5. Влияние температуры (а) и влажности грунта (б) на контактные параметры  $a$  и  $h_o$   
 Fig. 5. Influence of temperature (a) and soil humidity (б) on the contact parameters  $a$  and  $h_o$

Как видно из рис. 5, а, наиболее интенсивное снижение  $a$  и  $h_o$  наблюдается в диапазоне уменьшения температуры от  $-0,10$  до  $-0,35$  °C, т. е. при переходе температуры через  $-0,2$  °C. Характер дальнейшего снижения температуры можно считать асимптотическим.

Расчеты по выявлению влияния влажности  $W$  (рис. 5, б) на контактные параметры показали, что при ее увеличении и переходе от нормального состояния к влажному наблюдается некоторое относительное снижение  $a$  и  $h_o$ , не превышающее 12...15 %, что оказывает незначительное влияние на процесс уплотнения мерзлого почвогрунта под действием трелевочной системы.

Оценим влияние удельной статической нагрузки  $t$  на глубину первичного погружения трелевочной системы  $h_o$ . Результаты расчетов показали, что зависимость  $h_o(t)$  подчиняется степенному закону:

$$h_0 = 2,4546 m^{0,5452}. \quad (7)$$

Использование соотношения (7) в сочетании с формулой (1) позволяет установить связь между параметром удельной нагрузки  $m$  и прогнозными для расчетов значениями температуры почвогрунта в процессе контактного воздействия на него трелевочной системы и погружения на глубину  $h_0$ .

С учетом разнонаправленного влияния параметров  $T$  и  $m$  на  $h_0$  особый интерес вызывает анализ двумерной функции  $h_0(T, m)$ , результаты которого показали, что при температуре ниже  $-0,35...-1,00$  °С (т. е. при переходе почвогрунта в устойчивое мерзлое состояние) рост  $m$  до максимальных значений ( $m = 53,3$  т/м) не выводит значения глубины погружения  $h_0$  за пределы  $0,05$  м.

Для талых и слегка подмороженных на поверхности почвогрунтов ( $T > -0,35$  °С) относительно небольшие статические нагрузки (до  $m = 33,3$  т/м) от действия трелевочной системы увеличивают  $h_0$  в 3–4 раза, т. е.  $h_0 = 0,15...0,20$  м.

Эти выводы хорошо согласуются с положениями ГОСТ 12248–2010, где состояние оттаивания мерзлого грунта характеризуется как состояние перехода, при котором разрушаются криогенные структурные связи. При этом устойчивое состояние мерзлого грунта наблюдается при значениях температуры ниже температуры замерзания на  $0,5$  °С для слабо засоленных грунтов и на  $1,0$  °С для засоленных мерзлых грунтов.

#### Заключение

На установленных глубинах  $h_0$  при условии податливости почвогрунта формируется так называемое первичное ядро его уплотнения. В том случае, если компоненты поля напряжений на больших глубинах обеспечат выполнение принятых критериев разрушения мерзлого почвогрунта, ядро уплотнения будет перемещаться вниз и почвогрунт под действием трелевочной системы получит дополнительное уплотнение. Необходимо отметить, что процесс погружения ядра уплотнения сопровождается понижением температуры, что в свою очередь обуславливает рост прочности и модуля упругости.

Установленные закономерности влияния температуры и влажности мерзлых грунтов на показатели их физико-механических свойств позволяют более точно оценивать значения начальных контактных параметров в процессе трелевки пачки лесоматериалов с заранее заданными статическими нагрузками.

Полученные результаты являются основой для формирования начальных условий при расчетах параметров разрушения напряженно-деформированного массива мерзлого почвогрунта и процессов его уплотнения под действием статических нагрузок, возникающих при эксплуатации лесных машин и трелевочных систем.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Велли Ю.Я., Докучаев В.В., Федоров Н.Ф. Здания и сооружения на Крайнем Севере: справ. пособие. Л.: Госстройиздат, 1963. 492 с.
2. Вялов С.С. Реология мерзлых грунтов. М.: Стройиздат, 2000. 464 с.
3. 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.

4. Газизов А.М., Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Гумерова О.М. Моделирование процесса разрушения коры при окорке резанием // Изв. СПбЛТА. 2010. № 193. С. 211–221.

5. Григорьев И.В. Снижение отрицательного воздействия на почву колесных трелевочных тракторов обоснованием режимов их движения и технологического оборудования: науч. изд. СПб.: СПбЛТА. 2006. 236 с.

6. Далматов Б.И. Механика грунтов, основания и фундаменты: учеб. Л.: Стройиздат, 1988. 415 с.

7. Колесников Ю.В., Морозов Е.М. Механика контактного разрушения. М.: Изд-во ЛКИ, 2010. 224 с.

8. СП 287.1325800.2016. Сооружения морские причальные. Правила проектирования и строительства. М., 2016. 204 с.

9. Цытович Н.А. Механика грунтов. М.: Высш. шк., 1983. 288 с.

10. Шапиро В.Я., Григорьев И.В. Деформация и циклическое уплотнение почвогрунта между грунтозацепами крупногабаритных лесных шин // Техника и технология. 2006. № 2. С. 94–100.

11. Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Жукова А.И. Влияние сдвиговых деформаций на процесс циклического уплотнения почвы // Естеств. и техн. науки. 2006. № 1. С. 174–180.

12. Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Жукова А.И. Оценка процессов деформирования почвы при циклическом уплотнении // Лесн. журн. 2008. № 4. С. 44–51. (Изв. высш. учеб. заведений).

13. Antoniadu C., Şlincu C., Stan C., Ciobanu V., Ştefan V. Maximum Loading Heights for Heavy Vehicles Used in Timber Transportation C // Bulletin of the Transilvania University of Braşov. Series II: Forestry. Wood Industry. Agricultural Food Engineering. 2012. Vol. 5(54), no. 1. Pp. 7–12.

14. Bereziuc R., Alexandru V., Ciobanu V., Antoniadu C. The Analysis of the Unrigid Road Systems Bearing Capacity from the Forest Roads through the Actual Dimensioning Methods // Bulletin of the Transilvania University of Braşov. Series II: Forestry. Wood Industry. Agricultural Food Engineering. 2011. Vol. 4(53), no. 1. Pp. 1–6.

15. Grigorev I., Burmistrova O., Stepanishcheva M., Gasparian G. The Way to Reduce Ecological Impact on Forest Soils Caused by Wood Skidding // Proceedings of the 14th SGEM GeoConference on Water Resources. Forest, Marine and Ocean Ecosystems, June 19–25, 2014. Albena, Bulgaria, 2014. Vol. 2, no. SGEM2014. Pp. 501–508. DOI: 10.5593/SGEM2014/B32/S14.067

16. Sparchez Gh., Derczeni R., Iordache E., Drosos V. The Impact of Different Carriages on Soil and Trees during Skidding in the Romanian Forests // Bulletin of the Transilvania University of Braşov. Series II: Forestry. Wood Industry. Agricultural Food Engineering. 2009. Vol. 2(51). Pp. 35–44.

17. Ticu S., Alexandru V. Aspects Regarding Forest Pollution with Dust Provoked by Timber Road Transportation // Bulletin of the Transilvania University of Braşov. Series II: Forestry. Wood Industry. Agricultural Food Engineering. 2012. Vol. 5(54), no. 1. Pp. 115–122.

Поступила 03.07.18

UDC 634.037.4

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.1.106

**Features of Contact Interaction between the Skidding System and Frozen Soils***S.E. Rudov*<sup>1</sup>, *Candidate of Engineering Sciences**V.Ya. Shapiro*<sup>2</sup>, *Doctor of Engineering Sciences, Professor**I.V. Grigor'ev*<sup>3</sup>, *Doctor of Engineering Sciences, Professor**O.A. Kunitskaya*<sup>3</sup>, *Doctor of Engineering Sciences, Professor**O.I. Grigor'eva*<sup>2</sup>, *Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor*<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>Saint-Petersburg State Forest Technical University, 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, Republic of Sakha (Yakutia), 677007, Russian Federation; e-mail: silver73@inbox.ru, ola.ola07@mail.ru

Logging in the Far North is carried out under extremely difficult climatic conditions. In the traditional for timber harvesting winter period, forestry equipment in these areas cannot operate due to the extremely low temperatures which vehicle metal and hydraulics do not withstand. Therefore, the period of sustainable logging operations and removal of harvested wood is relatively short. Changes of ambient air temperature from negative to positive values are common to sharp continental climate, for example, to the Republic of Sakha (Yakutia). This stops logging in the most part of the cutting areas due to thawing of frozen soils. In operation of skidding systems it is important to take into account that frozen soil is a complex multicomponent environment. Based on the research results, it has been found that at certain depths, under the pliability condition, the so-called primary bulb of pressure is formed. If the stress field components at deep depths implement the accepted standards of frozen soil destruction, the bulb of pressure will move down and receive additional compaction under the weight of the skidding system. The immersing of bulb of pressure is accompanied by decrease in temperature followed by strength enhancement and modulus of elasticity increase. Thus, the established patterns of temperature and humidity influence of frozen soils on their physical and mechanical properties allow us to estimate more accurately the value of initial contact parameters during the skidding of a timber bundle with predetermined static loads. The obtained results provide a basis for the formation of initial conditions at calculations of destruction parameters of the stress-strain block of frozen soils and their compaction under the action of static loads arising from the operation of various forest machines and skidding systems.

*Keywords:* frozen soils, logging, skidding system, compaction and deformation of soils.

## REFERENCES

1. Velli Yu.Ya., Dokuchayev V.V., Fedorov N.F. *Zdaniya i sooruzheniya na Kraynem Severe: sprav. posobiye* [Buildings and Structures in the Far North: A Reference Book]. Leningrad, Gosstroyizdat Publ., 1963. 492 p. (In Russ.)

2. Vyalov S.S. *Reologiya merzlykh gruntov* [Rheology of the Frozen Soils]. Moscow, Stroyizdat Publ., 2000. 464 p. (In Russ.)

3. Gazizov A.M., Shapiro V.YA., Grigor'yev I.V. *Vliyaniye vlazhnosti na razvitiye protsessa razrusheniya kory pri rotornoy okorke* [Influence of Humidity on Development of

---

*For citation:* Rudov S.E., Shapiro V.Ya., Grigor'ev I.V., Kunitskaya O.A., Grigor'eva O.I. Features of Contact Interaction between the Skidding System and Frozen Soils. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2019, no. 1, pp. 106–119. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.1.106

Bark Destruction in Rotary Debarking]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoy vestnik* [Forestry Bulletin], 2008, no. 6, pp. 129–133.

4. Gazizov A.M., Shapiro V.Ya., Grigor'yev I.V., Gumerova O.M. Modelirovaniye protsessa razrusheniya kory pri okorke rezaniyem [Modeling of Bark Destruction during Barking by Cutting]. *Izvestiya SPbLTA* [Izvestia Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii], 2010, no. 193, pp. 211–221.

5. Grigor'yev I.V. *Snizheniye otritsatel'nogo vozdeystviya na pochvu kolesnykh trel-evochnykh traktorov obosnovaniyem rezhimov ikh dvizheniya i tekhnologicheskogo oborudovaniya: nauch. izdaniye* [Reduction of the Negative Effect from Wheeled Skidders on Soils by Substantiation of Modes of Their Movement and Technological Equipment: Scientific Publication]. Saint Petersburg, SPbSFTU Publ., 2006. 236 p. (In Russ.)

6. Dalmatov B.I. *Mekhanika gruntov, osnovaniya i fundamenty: ucheb.* [Soil Mechanics, Substructures and Foundations: Textbook]. Leningrad, Stroyizdat Publ., 1988. 415 p. (In Russ.)

7. Kolesnikov Yu.V., Morozov E.M. *Mekhanika kontaktnogo razrusheniya* [Mechanics of Contact Destruction]. Moscow, LKI Publ., 2010. 224 p. (In Russ.)

8. SP 287.1325800.2016. *Sooruzheniya morskoye prichal'nyye. Pravila proyektirovaniya i stroitel'stva* [Marine Berthing Facilities. Rules for Design and Construction]. Moscow, 2016. 204 p.

9. Tsytoich N.A. *Mekhanika gruntov* [Soil Mechanics]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1983. 288 p. (In Russ.)

10. Shapiro V.Ya., Grigor'yev I.V. Deformatsiya i tsiklicheskoye uplotneniye pochvogrunta mezhdru gruntozatsepami krupnogabaritnykh lesnykh shin [Deformation and Cyclic Compaction of Soils between the Cleats of Giant Forest Tires]. *Tekhnika i tekhnologiya*, 2006, no. 2, pp. 94–100.

11. Shapiro V.Ya., Grigor'yev I.V., Zhukova A.I. Vliyaniye sdvigovykh deformatsiy na protsess tsiklicheskogo uplotneniya pochvy [Influence of Shearing Deformation on Soil Cyclic Compaction]. *Estestvennyye i tekhnicheskiye nauki*, 2006, no. 1, pp. 174–180.

12. Shapiro V.Ya., Grigor'yev I.V., Zhukova A.I. Otsenka protsessov deformirovaniya pochvy pri tsiklicheskom uplotnenii [Assessment of Soil Deformation under Cyclic Compaction]. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2008, no 4, pp. 44–51.

13. Antoniadu C., Şlincu C., Stan C., Ciobanu V., Ştefan V. Maximum Loading Heights for Heavy Vehicles Used in Timber Transportation C. *Bulletin of the Transilvania University of Braşov. Series II: Forestry. Wood Industry. Agricultural Food Engineering*, 2012, vol. 5(54), no. 1, pp. 7–12.

14. Bereziuc R., Alexandru V., Ciobanu V., Antoniadu C. The Analysis of the Unrigid Road Systems Bearing Capacity from the Forest Roads through the Actual Dimensioning Methods. *Bulletin of the Transilvania University of Braşov. Series II: Forestry. Wood Industry. Agricultural Food Engineering*, 2011, vol. 4(53), no. 1, pp. 1–6.

15. Grigorev I., Burmistrova O., Stepanishcheva M., Gasparian G. The Way to Reduce Ecological Impact on Forest Soils Caused by Wood Skidding. *Proceedings of the 14th SGEM GeoConference on Water Resources. Forest, Marine and Ocean Ecosystems, June 19–25, 2014, Albena, Bulgaria*. 2014, vol. 2, no. SGEM2014, pp. 501–508. DOI: 10.5593/SGEM2014/B32/S14.067

16. Sparchez Gh., Derczeni R., Iordache E., Drosos V. The Impact of Different Carriages on Soil and Trees during Skidding in the Romanian Forests. *Bulletin of the Transilvania University of Braşov. Series II: Forestry. Wood Industry. Agricultural Food Engineering*, 2009, vol. 2(51), pp. 35–44.

17. Ticu S., Alexandru V. Aspects Regarding Forest Pollution with Dust Provoked by Timber Road Transportation. *Bulletin of the Transilvania University of Braşov. Series II: Forestry. Wood Industry. Agricultural Food Engineering*, 2012, vol. 5(54), no. 1, pp. 115–122.

Received on July 03, 2018