УДК 540:631.4 DOI: 10.18324/2077-5415-2018-3-73-78

Математическое моделирование процесса уплотнения мерзлого почвогрунта под воздействием лесных машин и трелевочных систем

С.Е. Рудов[1 a], В.Я. Шапиро[2 b], И.В. Григорьев[3 c], О.А. Куницкая[3 d], О.И. Григорьева[2 e]

[1]Военная академия связи им. С.М. Буденного, пр. Тихорецкий 3, Санкт-Петербург, Россия
[2]Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова,
пер. Институтский 5, Санкт-Петербург, Россия
[3]Якутская государственная сельскохозяйственная академия, Сергеляхское шоссе 3,
Якутск, Республика Саха (Якутия), Россия
[a]89213093250@mail.ru, [b]shapiro54vlad@mail.ru, [c]silver73@inbox.ru, [d]ola.ola07@mail.ru, [e]grigoreva_o@list.ru
[a]https://orcid.org/0000-0002-9900-0929, [b]https://orcid.org/0000-0002-6344-1239,
[c]https://orcid.org/0000-0002-5574-1725, [d]https://orcid.org/0000-0001-8542-9380,
[e]https://orcid.org/0000-0001-5937-0813
Статья поступила 3.06.2018, принята 8.07.2018

Проведение лесозаготовительных работ в районах Крайнего Севера характеризуется крайне сложными климатическими условиями. Например, тем, что в традиционный период заготовки древесины, зимой, лесные машины в районах Крайнего Севера работать не могут из-за экстремально низких температур, которых не выдерживают металл машин и гидравлика. Поэтому период устойчивого проведения лесосечных работ и вывозки заготовленной древесины сравнительно невелик. Быстрые переходы температуры окружающего воздуха от отрицательных к положительным, характерные для резко континентального климата, например, Республики Саха (Якутия), останавливают лесозаготовительный процесс на большей части лесосек из-за оттаивания мерзлотных почвогрунтов. Мерзлые почвогрунты как многокомпонентная среда представляют собой сложный объект механики грунтов, поскольку между агрегатами почвогрунта и их отдельными частицами присутствует лед, влияющий на все показатели физико-механических свойств. На определенных глубинах, 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 под действием трелевочной системы почвогрунт получит дополнительное уплотнение. Процесс погружения ядра уплотнения сопровождается понижением показателя температуры, что, в свою очередь, обусловливает рост показателей прочности и модуля упругости. Таким образом, установленные закономерности влияния температуры и влажности мерзлых грунтов на их физико-механические свойства позволяют произвести более точные оценки значений величин начальных контактных параметров в процессе трелевки пачки лесоматериалов с заранее заданными статическими нагрузками. Установленные закономерности влияния физико-механических свойств мерзлого почвогрунта и параметров его влажности и температуры на размеры контактного взаимодействия с трелевочной системой позволяют определять начальные условия для расчета напряженно-деформированного состояния мерзлого почвогрунта с целью детального исследования процесса деформации, уплотнения и разрушения его краевой части.

Ключевые слова: мерзлые почвогрунты; лесозаготовки; лесные машины; трелевочные системы; уплотнение и деформация почвогрунтов.

Mathematical modeling of compacting process of the frozen soil under the influence of forest machines and logging systems

S.E. Rudov[1 a], V.Ya. Shapiro[2 b], I.V. Grigorjev[3 c], O.A. Kunitskaya[3 d], O.I. Grigorjeva[2 e]

[1]Military Academy of Communication under name of S.M. Budenny; 3, Tikhoretsky Ave., St. Petersburg, Russia
[2]St. Petersburg State Forest Technical University under name of S.M. Kirov; 5, Institutsky Per., St. Petersburg, Russia
[3]Yakutsk State Agricultural Academy; 3rd km, 3, Sergelyakhskoe Highway, Yakutsk, Russia
[a]89213093250@mail.ru, [b]shapiro54vlad@mail.ru, [c]silver73@inbox.ru, [d]ola.ola07@mail.ru, [e]grigoreva_o@list.ru
[a]https://orcid.org/0000-0002-9900-0929, [b]https://orcid.org/0000-0002-6344-1239,
[c]https://orcid.org/0000-0002-5574-1725, [d]https://orcid.org/0000-0001-8542-9380,
[e]https://orcid.org/0000-0001-5937-0813
Received 3.06.2018, accepted 8.07.2018

Logging operations in the Far North are characterized by extremely difficult climatic conditions. For example, the fact that in the traditional period for wood – winter, forest machines in the Far North cannot work because of the extremely low temperatures that metal machines and hydraulics cannot withstand. Therefore, the period of sustainable logging and removal of harvested wood is relatively short. Rapid transitions of ambient air temperature from negative to positive, typical for sharply continental climate, for example, the Republic of Sakha (Yakutia), stop the logging process in most of the cutting areas due to thawing of permafrost soils. Frozen soils as a

multicomponent medium is a complex object of soil mechanics, since between the soil aggregates and their individual particles there is ice that affects all indicators of physical and mechanical properties. At certain depths, subject to the flexibility of soil, the so-called primary core of its compaction is formed. In the event that the components of the stress field at great depths ensure the implementation of the criteria-EV of destruction of frozen soil, the core of the seal moves down and under the action of the skidding system of the soil receives an additional seal. The process of immersion of the core of the seal is accompanied by a decrease in the temperature index, which in turn causes an increase in the strength and modulus of elasticity. Thus, the established regularities of the influence of temperature and humidity of frozen soils on their physical and mechanical properties allow to make more accurate estimates of the values of the initial contact steam meters during the skidding of a pack of timber with predetermined static loads. The established regularities of the influence of physical and mechanical properties of frozen soil and the parameters of its humidity and temperature on the size of the contact interaction with the skidding system allow to determine the initial conditions for the calculation of the stress-strain state of frozen soil for the purpose of a detailed study of the deformation, compaction and destruction of its.

Keywords: frozen soils; logging; forest machines; skidding systems; compaction and deformation of soils.

Введение

Мерзлые почвогрунты как многокомпонентная среда представляют собой сложный объект механики грунтов, поскольку между агрегатами почвогрунта и их отдельными частицами присутствует лед, влияющий на все показатели физико-механических свойств.

Механические свойства мерзлых грунтов подробно изучены в работах [1–4], авторы которых отмечают различные условия мгновенного и длительного приложения статических нагрузок, при которых показатели прочности мерзлых грунтов отличаются на порядок. При работе трелевочных систем условимся принимать характеристики мгновенных нагрузок.

Для всех видов мерзлых грунтов в соответствии с [1] установлены общие закономерности увеличения прочности:

а) при понижении температуры (*T*) мерзлого грунта;

б) при уменьшении степени дисперсности и, как следствие, снижении влажности (*W*);

в) при возрастании льдистости до полного насыщения пор грунта льдом;

г) при росте интенсивности приложения нагрузки.

Наиболее важной характеристикой мерзлого почвогрунта является его температура *T*.

Цель работы: установление закономерностей влияния физико-механических свойств мерзлого почвогрунта и параметров его влажности и температуры на размеры контактного взаимодействия с движителем лесной машины или трелевочной системой, позволяющих определять начальные условия для расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) мерзлого почвогрунта с целью детального исследования процесса деформации, уплотнения и разрушения его краевой части.

Материалы и методы исследования. Использованы справочные данные о физико-механических свойствах мерзлотных грунтов. Расчеты выполнены на основе механики разрушений. Использованы методы аппроксимации численных данных.

Результаты исследования. Исследование процесса замерзания воды [3] в грунте выявили четыре фазы: понижение температуры по мере переохлаждения поровой воды, повышение температуры вследствие кристаллизации части воды, резкий переход большей части воды в лед и, наконец, постепенное понижение температуры уже мерзлого грунта, когда окончательно замерзает вся вода.

На рис. 1 представлен график изменения температуры T (ось ординат, ^oC) с глубиной (*h*) залегания мерзлого грунта (ось абсцисс, *м*) при назначении величин нормативных нагрузок на мерзлый грунт, составленный на основе опытных данных [3] для мерзлых грунтов в районе Амдермы.

С высокой степенью достоверности зависимость описывается полиномом 2-й степени.

Если температуру на поверхности грунта принять за единицу, то безразмерный коэффициент $K_h(T)$ увеличения абсолютных значений температуры с ростом *h* с высокой степенью детерминации ($R^2 = 0{,}9663$) равен:

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

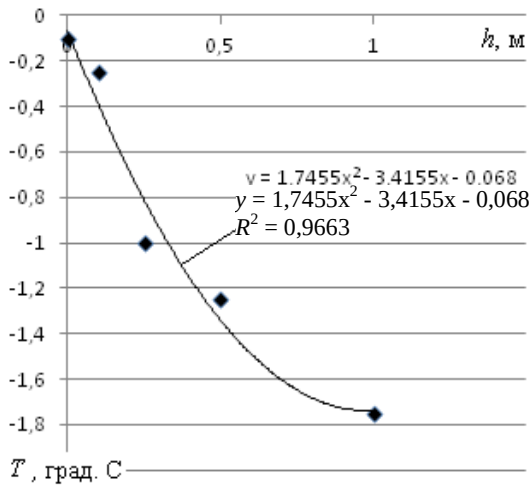

Рис. 1. Понижение температуры мерзлого грунта с ростом глубины залегания

Как отмечалось, параметр температуры существенно влияет на показатели прочности мерзлого почвогрунта, а именно пределы его прочности на сжатие $\sigma_{сж}$, сдвиг $\sigma_{сд}$ и разрыв $\sigma_р$.

Наиболее надежно определяются, информативно и достоверно формируются статистические выборки значений величины $\sigma_{сж}$.

В табл. 1 на основании опытных данных [1] представлены значения $\sigma_{сж}$ (10^2 кПа) для четырех мерзлых грунтов (МГ1 — пылевой песок, МГ2 — кварцевый песок, МГ3 — супесь, МГ4 — глина) и льда по мере понижения температуры *T*.

Анализ абсолютных значений данных табл. 1 свидетельствует о том, что даже для мерзлых грунтов, в частности песков, наблюдаются существенные (до 35–55 % и более) отличия величин $\sigma_{сж}$.

Таблица 1

Значения предела прочности на сжатие с понижением температуры

T, °С	МГ1	МГ2	МГ3	МГ4	Лед
–0,1	80	45	9	2	1
–1	108	62	15	19	5
–2	120	73	21	42	13
–3	131	81	31	50	21
–4	138	85	41	56	28
–5	144	93	48	61	39
–10	165	122	59	89	47

Для сравнительного анализа и качественного сопоставления данных табл. 1 на рис. 2 и 3 опытные данные $\sigma_{сж}$ представлены в безразмерном виде в отношении значений $\sigma_{сж}$ при заданной температуре на поверхности грунта, принятой T = –0,1 °С.

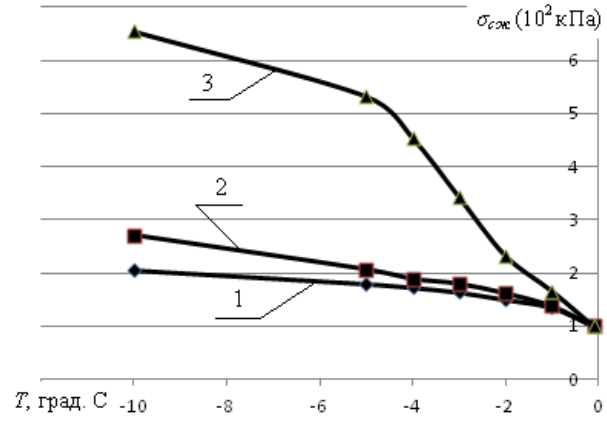

Рис. 2. Зависимости относительной величины $\sigma_{сж}$ от температуры: 1 — МГ1; 2 — МГ2; 3 — МГ3

Как видим (на примере песков), несмотря на существенные различия абсолютных значений $\sigma_{сж}$, достигающих в среднем 50 % и более, относительные величины $\sigma_{сж}$ отличаются менее чем на 10 %, и расхождение кривых 1 и 2 на рис. 1 можно считать несущественным.

Кривая 3 (супесь) свидетельствует уже о более существенном влиянии процесса понижения температуры на прочность мерзлого грунта при сжатии.

В этом контексте интерес представляет анализ поведения прочностных свойств глины при сравнении со льдом (рис. 3). Абсолютные значения $\sigma_{сж}$ отличаются кратно, тогда как кривые относительного увеличения прочности с понижением температуры весьма близки.

В частности, для супеси относительный рост $\sigma_{сж}$ при понижении температуры, выраженный коэффициентом $K_{сж}(T)$, хорошо описывается полиномиальной зависимостью (R^2 = 0,9744) вида:

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

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

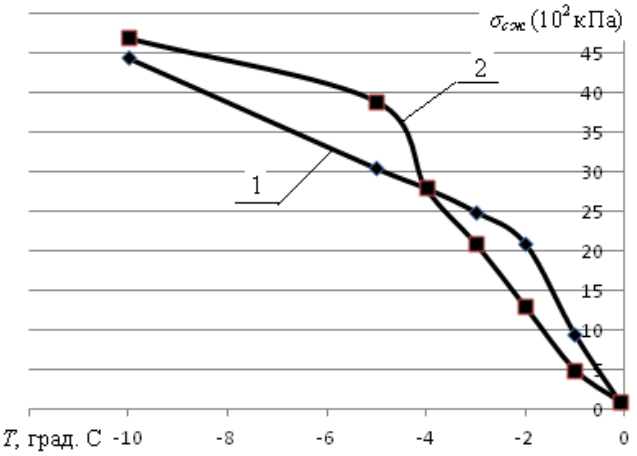

Рис. 3. Зависимости относительной величины $\sigma_{сж}$ от температуры: 1 — МГ4; 2 — лед

Для глины при T = –3…–4 °С снижение $\sigma_{сж}$ с 5 000 до 3 500 кПа отмечается при росте W с 15 до 35 %. Для конкретных технологических условий необходимо определять соответствующую зависимость $\sigma_{сж}(W)$.

Еще одним важным прочностным показателем является величина предела прочности на сдвиг $\sigma_{сд}$.

В табл. 2 представлены абсолютные значения $\sigma_{сд}$ (10^2 кПа) для двух видов мерзлых грунтов — МГ3 и МГ4 в сравнении с прочностью на сдвиг $\sigma_{сд}$ льда по мере понижения температуры T, а на рис. 4 — относительные значения $\sigma_{сд}$ по аналогии с представлением данных на рис. 2 и 3.

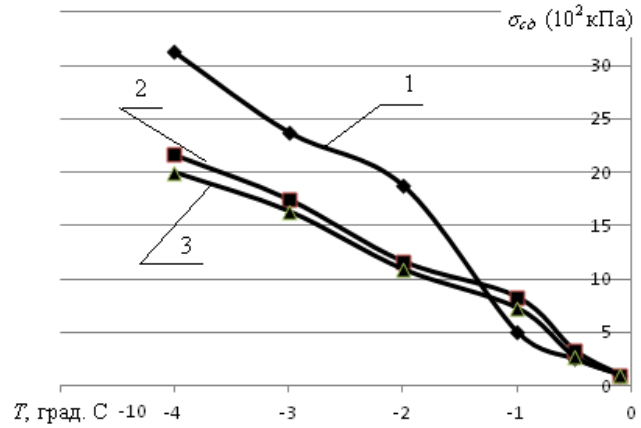

Рис. 4. Зависимости относительной величины $\sigma_{сд}$ от температуры: 1 — лед; 2 — МГ3; 3 — МГ4

Таблица 2

Значения предела прочности на сдвиг с понижением температуры

T, °С	МГ3	МГ4	Лед
–0,1	1,2	1,1	0,8
–0,5	4	3	2
–1	10	8	4
–2	14	12	15
–3	21	18	19
–4	26	22	25

Анализ показывает, что характеры процесса увеличения прочности на сжатие и сдвиг по мере снижения температуры в значительной мере совпадают.

Величина предела прочности мерзлого почвогрунта на растяжение σ_p, по данным [1], определяется теми же факторами, что и при сжатии. Сопоставительный анализ значений σ_p и $\sigma_{сж}$ показывает, что при прочих равных условиях величина σ_p составляет 20–40 % $\sigma_{сж}$.

Одной из основных характеристик упругодеформационных свойств мерзлого почвогрунта является модуль упругости (E), равный отношению величины сжимающих напряжений к величине относительной упругой деформации в условиях кратковременного действия нагрузок.

В табл. 3 представлены абсолютные значения E для ряда грунтов в зависимости от их температуры T [5], а на рис. 5 на примере супеси нормальной влажности W = 25 % представлена зависимость безразмерного коэффициента $K_E(T)$ увеличения модуля E по мере снижения температуры T:

$$K_E(T) = -0{,}545T^2 - 3{,}0435T + 0{,}0015 \; . \qquad (3)$$

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

Таблица 3

Модуль упругости мерзлых грунтов

Наименование грунта	Модуль упругости $E \cdot 10^3$ (*кПа*) при температуре грунта		
	от –0,2 до –0,5 °С	от –0,5 до –1,5 °С	от –1,5 до –6 °С
Песок	1 000	3 000	5 000
Супесь	800	2 000	3 000
Суглинок	500	1 200	2 000
Глина	300	600	1 000

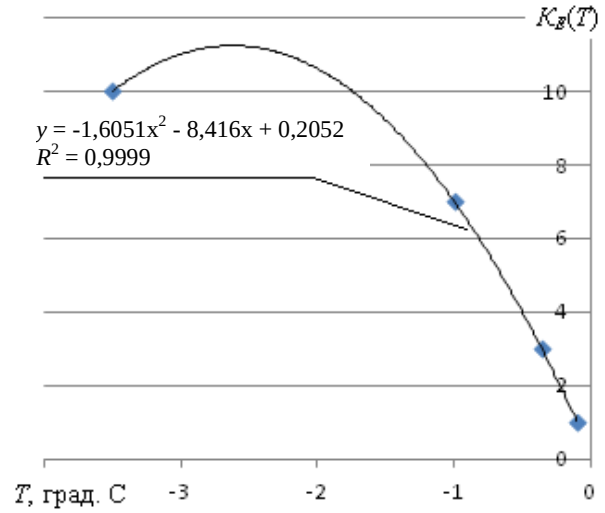

Рис. 5. Относительное увеличение модуля упругости с понижением температуры

Еще одной характеристикой упругопластических свойств почвогрунта является коэффициент Пуассона v, равный отношению упругой поперечной деформации к упругой продольной деформации. В диапазоне изменения температуры от –0,2 до –1,0 °С величина v колеблется в пределах 0,2–0,5 [1] и при этом существенно зависит от влажности W. Характер поведения безразмерного коэффициента $K_v(W)$ отражен на рис. 6 и описывается зависимостью:

$$K_v(W) = 0{,}38\mathrm{EXP}(0{,}0534W) \; . \qquad (4)$$

Полученные оценки влияния параметров влажности и температуры на физико-механические свойства мерзлого грунта позволяют перейти к постановке задачи контактного взаимодействия лесных машин трелевочных систем с поверхностью мерзлого почвогрунта.

Контактные задачи механики разрушения сплошных сред с заранее заданными свойствами, в частности, не мерзлых почвогрунтов и коры деревьев различной температуры, в результате воздействия инденторов различной природы и конфигурации, подробно рассмотрены в работах [6–8].

Пусть трелевочная система состоит из колесного трактора весом G с характерным радиусом колеса R, который трелюет пачку лесоматериалов весом Q.

Под действием суммарной нагрузки $P = G + Q$ на поверхности почвогрунта образуется контактная площадка радиусом a, с глубиной контактного сближения (начальная глубина погружения колеса в мерзлый почвогрунт), равной h_o. Величину удельной нагрузки определим как $m = P/R$.

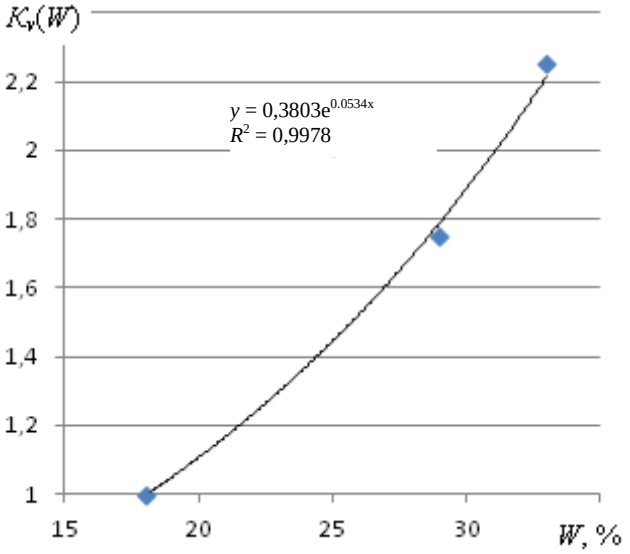

Рис. 6. Влияние влажности на коэффициент Пуассона грунта

Основываясь на положениях [9], параметры a и h определим как:

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

Таким образом, параметры a и h_o зависят от суммарного веса трелевочной системы, размера колеса трелевочного трактора и упругопластических свойств мерзлого почвогрунта, корреляционно зависящих от его температуры T и влажности W.

Суммарная нагрузка P, распределенная по площади контактной площадки $S = \pi a^2$ формирует начальное контактное усредненное давление q_a и максимальное

начальное давление σ_o в центре площадки, которые, согласно [9], оцениваются как:

$$q_a = \frac{P}{S} f; \quad \sigma_o = q_a , \qquad (6)$$

где f — коэффициент сопротивления качению колеса.

Результаты расчетов по определению зависимости параметров контактного взаимодействия трелевочной системы с поверхностью мерзлого почвогрунта от температуры T представлены на рис. 7: по оси абсцисс — T, ^oC, по оси ординат: кривая 1-a (10^{-2} м), кривая 2-h_o (10^{-2} м).

Расчеты произведены для супеси нормальной влажности W = 25 % с плотностью в естественном залегании ρ = 1,7 т/м^3 при следующих исходных данных: P = 14 + 5 = 19 т, R = 0,45 м, ν = 0,29, f = 0,1. Величина модуля упругости $E(T)$ определялась в соответствии с зависимостью (3).

Как видно на рис. 7, наиболее интенсивное снижение параметров a и h_o наблюдается в диапазоне понижения температуры от 0 до –1. Характер дальнейшего снижения является асимптотическим.

Расчеты по выявлению влияния влажности W на контактные параметры показали (рис. 8: ось абсцисс — W, %, ось ординат — по аналогии с рис. 7), что при фиксированной T = –0,1 ^{o}C увеличение W с 10 (сухая супесь) до 35 % (влажная супесь) оказывает незначительное влияние на величины a и h_o.

Детальнее, при увеличении W от нормального состояния МГ к влажному наблюдается некоторое снижение величин a и h_o, причем для контактного сближения (глубины начального погружения колеса, а по сути — глубины первичной колеи) относительное снижение значений h_o достигает 15 %, что определенным образом отразится при расчете уплотнения мерзлого почвогрунта под действием трелевочной системы.

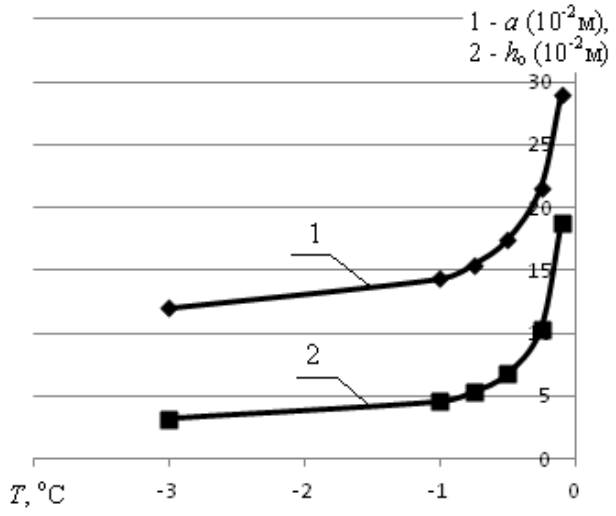

Рис. 7. Влияние температуры грунта на размеры контактных параметров

Полученные значения контактных величин a и h_o позволили, базируясь на соотношении (6), произвести оценку влияния параметров трелевки на максимальное начальное давление σ_o трелевочной системы на поверхность почвогрунта.

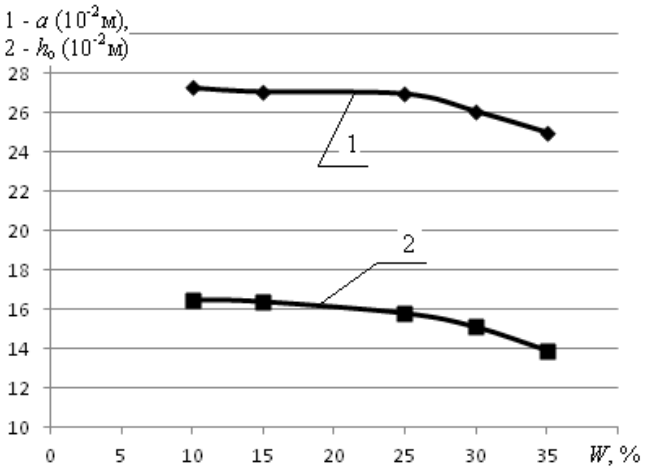

Рис. 8. Влияние влажности грунта на размеры контактных параметров

Расчеты представлены на рис. 9, где по оси ординат — $\sigma_o \cdot 10^2$ кПа, по оси абсцисс — параметр удельной нагрузки m, *т/м*. С высокой степенью детерминации указанная зависимость подчиняется экспоненциальному закону.

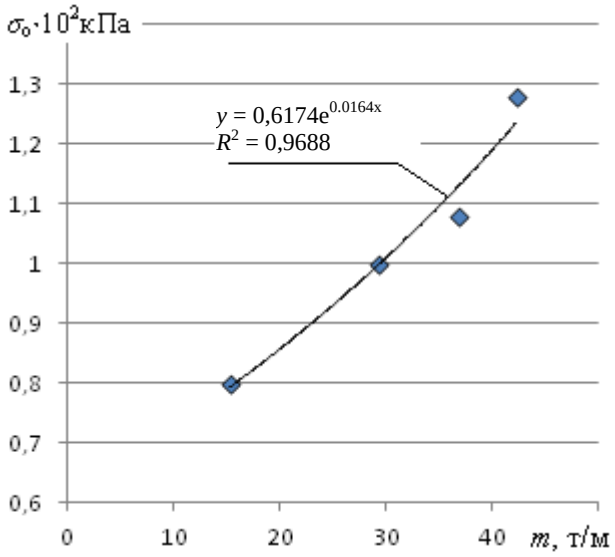

Рис. 9. Влияние удельной нагрузки трелевочной системы на величину максимального начального давления на грунт

Начальная деформация $e_o = \sigma_o/E$ на границе «шина – почвогрунт» определяет величину начального относительного уплотнения $\bar{\rho} = 1 + e_0$ почвогрунта на поверхности контакта.

На рис. 10 представлен график двумерной функции безразмерной величины $\bar{\rho}$ от T, ^oC, и удельной нагрузки m, *т/м*.

Как видим, тяжелые трелевочные системы (m = 45–55 т/м) при воздействии на талый почвогрунт (T от 0 до –0,25 ^{o}C) формируют высокое начальное уплотнение ($\bar{\rho}$ > 1,35 вплоть до 1,5), тогда как в слегка подмороженном грунте (T < –0,5 ^{o}C) в широком диапазоне изменения параметра m величина $\bar{\rho}$ не превышает значений 1,10–1,2.

Таким образом, установленные закономерности влияния физико-механических свойств мерзлого почвогрунта и параметров его влажности и температуры на размеры контактного взаимодействия с трелевочной системой позволяют определять начальные условия для расчета НДС мерзлого почвогрунта с целью детального исследования процесса деформации, уплотнения и разрушения его краевой части.

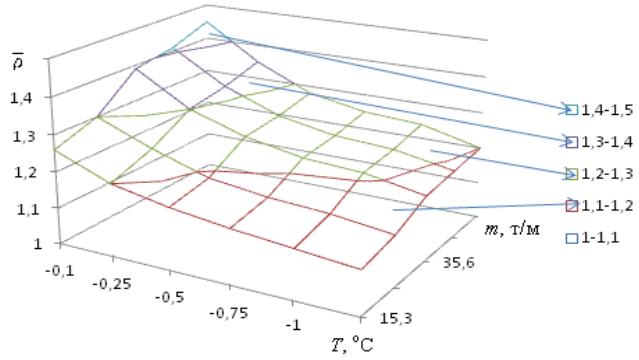

Рис. 10. Зависимость относительного уплотнения мерзлого почвогрунта от температуры и внешней нагрузки

Литература

1. Велли Ю.Я., Докучаев В.В., Федоров Н.Ф. Здания и сооружения на крайнем Севере. Л., Госстройиздат. 1963. 492 с.

2. Цытович Н.А. Механика мерзлых грунтов. М.: Высшая школа, 1983. 288 с.

3. Долматов Б.И. Механика грунтов, основания и фундаменты. СПб.: Стройиздат, 1988. 416 с.

4. Вялов С.С. Реология мерзлых грунтов. М.: Стройиздат. 2000. 464 с.

5. СП 287.1325800. 2016[Электронный ресурс]. Сооружения и морские причалы. Правила проектирования и строительства. Р.15. Особенности проектирования причальных сооружений для условий Арктики. Дата введения 2017-16-17// Кодекс: сайт. URL. http://www.kodeks.ru (дата обращения:12.06.2018).

6. Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Жукова А.И. Оценка процессов деформирования почвы при циклическом уплотнении // Изв. высш. учеб. заведений. Лесной журнал. 2008. № 4. С. 44-51.

7. Газизов А.М., Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Гумерова О.М. Моделирование процесса разрушения коры при окорке резанием // Изв. С.-Петерб. лесотехн. акад. 2010. № 193. С. 211-221.

8. Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Жукова А.Я. Влияние сдвиговых деформаций на процесс циклического уплотнения почвы // Естественные и технические науки 2006. № 1. С. 174-180.

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

References

1. Velli Yu.YA., Dokuchaev V.V., Fedorov N.F. Buildings and structures on far North. L., Gosstrojizdat. 1963. 492 p.

2. Cytovich N.A. Mechanics of frozen soils. M.: Vysshaya shkola, 1983. 288 p.

3. Dolmatov B.I. Mechanics of soils, bases and foundations. SPb.: Strojizdat, 1988. 416 p.

4. Vyalov S.S. Rheology of frozen soils. M.: Strojizdat. 2000. 464 p.

5. SP 287.1325800. 2016[Elektronnyj resurs]. Buildings and sea berths. Rules of design and construction. R. 15. Design features of berthing facilities for Arctic conditions. Data vvedeniya 2017-16-17// Kodeks: sajt. URL. http://www.kodeks.ru (data obrashcheniya:12.06.2018).

6. Shapiro V.YA., Grigor'ev I.V., Zhukova A.I. Evaluation of soil deformation processes in cyclic compaction. News of higher educational institutions // Bulletin of higher educational institutions. Lesnoy zhurnal (Forestry journal). 2008. № 4. P. 44-51.

7. Gazizov A.M., Shapiro V.YA., Grigor'ev I.V., Gumerova O.M. Modeling of process of destruction of bark during debarking by cutting // Izvestia SPbLTA. 2010. № 193. P. 211-221.

8. Shapiro V.YA., Grigor'ev I.V., Zhukova A.YA. Influence of shear strains on the process of cyclic soil compaction // Natural sciences and engineering.2006. № 1. P. 174-180.

9. Kolesnikov Yu.V., Morozov E.M. Mechanics of contact fracture. M.: Izd-vo LKI, 2010. 224 p.