

## Обоснование исходных требований математической модели взаимодействия колесных лесных машин с мерзлым и оттаивающим грунтом

С.Е. Рудов<sup>1а</sup>, В.Я. Шапиро<sup>2б</sup>, И.В. Григорьев<sup>3с</sup>, О.А. Куницкая<sup>3д</sup>, О.И. Григорьева<sup>2е</sup>

<sup>1</sup> Военная академия связи им. С.М. Буденного, пр. Тихорецкий, 3, Санкт-Петербург, Россия

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

<sup>3</sup> Якутская государственная сельскохозяйственная академия, Сергеляхское шоссе, 3, Якутск, Республика Саха (Якутия)

<sup>а</sup> 89213093250@mail.ru, <sup>б</sup> shapiro54vlad@mail.ru, <sup>с</sup> silver73@inbox.ru, <sup>д</sup> ola.ola07@mail.ru, <sup>е</sup> grigoreva\_o@list.ru

<sup>а</sup> <https://orcid.org/0000-0002-9900-0929>, <sup>б</sup> <https://orcid.org/0000-0002-6344-1239>, <sup>с</sup> <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>,

<sup>д</sup> <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>, <sup>е</sup> <https://orcid.org/0000-0001-5937-0813>

Статья поступила 09.01.2020, принята 10.02.2020

*Актуальность темы работы обоснована целым рядом обстоятельств, во-первых — началом реализации семи крупнейших инвестиционных проектов в области освоения лесов Дальнего Востока, которые предусматривают кратное увеличение объемов заготовки древесины при помощи современных машинных комплексов, представленных в основном колесными машинами большой мощности и грузоподъемности, если говорить о трелевочных машинах. Причем большая часть объемов этих лесозаготовок приходится на спелые и перестойные эксплуатационные лесные массивы на мерзлотных почвогрунтах, также называемые лесами криолитозоны. Во-вторых, очевидным резким потеплением климата, в том числе в регионах, где расположены леса криолитозоны. В-третьих, существенным пробелом в области теоретических и практических исследований процессов и показателей взаимодействия движителей колесных лесных машин с мерзлотными почвогрунтами. В статье обосновано, что оперативный учет реального состояния почвогрунта возможен только опытным путем непосредственно в зоне производства работ. В этой связи представляется единственно возможным комбинированный подход к моделированию процессов взаимодействия, когда ряд параметров носит эмпирический характер, а уравнения их связи в моделях деформирования вытекают из фундаментальных понятий естествознания. На основании выполненных в статье обобщений и анализа можно сделать вывод о том, что рассмотренные условия формирования параметров взаимодействия колесных лесных машин, включая трелевочные системы, с мерзлым и оттаявшим почвогрунтом выступают в качестве основных требований разработки адекватной математической модели — системы формальных связей между действующими многократными циклическими нагрузками и массивом грунта как сложного объекта геомеханики.*

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

## Justification of the initial requirements of the mathematical model of interaction of wheeled forest vehicles with frozen and thawing soil

S.E. Rudov<sup>1а</sup>, V.Ya. Shapiro<sup>2б</sup>, I.V. Grigorjev<sup>3с</sup>, O.A. Kunitskaya<sup>3д</sup>, O.I. Grigorjeva<sup>2е</sup>

<sup>1</sup> Military Academy of Communication under name of S.M. Budenny; 3, Tikhoretsky Ave., St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup> St. Petersburg State Forest Technical University under name of S.M. Kirov; 5, Institutsky Per., St. Petersburg, Russia

<sup>3</sup> Yakutsk State Agricultural Academy; 3rd km, 3, Sergelyakhskoe Highway, Yakutsk, Republic of Sakha (Yakutia)

<sup>а</sup> 89213093250@mail.ru, <sup>б</sup> shapiro54vlad@mail.ru, <sup>с</sup> silver73@inbox.ru, <sup>д</sup> ola.ola07@mail.ru, <sup>е</sup> grigoreva\_o@list.ru

<sup>а</sup> <https://orcid.org/0000-0002-9900-0929>, <sup>б</sup> <https://orcid.org/0000-0002-6344-1239>, <sup>с</sup> <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>,

<sup>д</sup> <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>, <sup>е</sup> <https://orcid.org/0000-0001-5937-0813>

Received 09.01.2020, accepted 10.02.2020

*The relevance of the topic is justified by a number of circumstances. First, the launch of seven major investment projects in forest development in the Far East, which provide for magnification of volume of wood, with the help of modern machinery systems, which are mostly wheeled machines of great power and capacity, talking about the harvesting machines. Moreover, a large part of the volumes of these logging is accounted for by ripe and mature production forests on permafrost soils, also called cryolithozone forests. Secondly, by the obvious sharp warming of the climate, including in the regions where permafrost forests are located. Thirdly, a significant gap in the field of theoretical and practical research of processes and indicators of the interaction of the engines of wheeled forest machines with permafrost soil. The article proves that the operational accounting of the real state of the soil is possible only empirically directly in the area of work. In this regard, it is the only possible combined approach to modeling interaction processes, when a number of parameters is empirical in nature, and the equations of their relationship in deformation models are derived from the fundamental con-*

*cepts of natural science. Based on the article summaries and analysis, it is possible to conclude that the conditions of formation of parameters of the interaction of wheeled forestry equipment, including skidders system, with the frozen and thawed soil, are main requirements for the formulation of adequate mathematical model of the system of formal linkages between existing multiple cyclic loads and soil as a complex object of geomechanics.*

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

**Введение.** Актуальность проблемы взаимодействия колесных лесных машин с массивом почвогрунта не вызывает сомнений, и ее различные аспекты в контексте сохранения экосистемы и разработки средооформляющих технологий в традиционных условиях эксплуатации подробно изучены в работах как отечественных [1; 2], так и зарубежных ученых [3; 4].

Основное внимание при математическом моделировании указанного взаимодействия преимущественно направлено на адекватный учет следующих факторов [5–9]: физико-механических свойств сплошного массива почвогрунта; сезонно-климатических особенностей его состояния; параметров и характеристик внешнего воздействия на грунт с учетом его несущей способности; особенностей протекания процессов деформирования грунта под действием статических и динамических нагрузок; циклического характера взаимодействия трелевочной системы с массивом грунта с учетом изменчивости трассы движения.

Разработанные модели ([5–9] и др.) достаточно полно отвечают на поставленные вопросы. Однако факторы сверхнизких температур, наличия зоны мерзлоты и особенностей оттаивания грунта в ее пределах изучены не в полной мере и нуждаются в более детальном исследовании.

*Цель работы:* обосновать направления разработки математической модели, адекватно описывающей параметры и показатели процессов взаимодействия колесных лесных машин с мерзлыми и оттаивающими почвогрунтами.

*Материалы и методы исследования.* Используются справочные данные о физико-механических свойствах мерзлых и оттаивающих почвогрунтов. Расчеты выполнены на основе механики разрушений. Используются методы аппроксимации численных данных.

**Результаты исследования.** Не вызывает сомнения, что лесозаготовительные работы в районах с резко континентальным климатом характеризуются крайне сложными, можно сказать, экстремальными сезонно-климатическими условиями. Так, в традиционные зимние периоды заготовки древесины лесные машины работать не могут из-за чрезвычайно низких температур (до  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  и ниже), при которых не выдерживают металл и гидравлика. В связи с этим весенне-летний период устойчивого проведения лесосечных работ и вывозки заготовленной древесины сравнительно невелик, но и он характеризуется либо достаточно высокими (до  $40\text{--}45\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) дневными температурами, либо быстрыми переходами температуры окружающего воздуха от отрицательных значений к положительным.

Этим можно объяснить необходимость приостановки лесозаготовительного процесса на большей части лесосек из-за интенсивного оттаивания мерзлотных почвогрунтов.

Лесные экосистемы на мерзлотных грунтах являются особо ранимыми, и вредное воздействие лесных машин через механизмы уплотнения и деформации массива отмечаются в работах [1; 2].

Отметим три основные субстанции мерзлого почвогрунта:

- 1) твердый высокоплотный скелет грунта;
- 2) вода в различном состоянии, в первую очередь, свободном и связанном с переменной плотностью, засоленностью и, как следствие, существенно отличными температурами замерзания;
- 3) лед.

Эти составляющие, с учетом фактора низкой температуры ( $T$ ), переменной влажности ( $W$ ) и засоленности ( $c$ ) мерзлого почвогрунта, оказывают существенное влияние на характеристики его физико-механических свойств.

Физико-механические свойства мерзлых грунтов являются первоочередными исходными требованиями при разработке математических моделей.

Детальному их изучению посвящены работы [10–13], где различают условия мгновенного и длительного приложения статических нагрузок, в процессе которых показатели физико-механических свойств, в частности упругие и прочностные, отличаются весьма существенно — кратно, а в ряде случаев — на порядок.

При разработке математических моделей однократного взаимодействия трелевочных систем с мерзлым грунтом условимся принимать характеристики физико-механических свойств, соответствующие приложениям мгновенных нагрузок. Однако при прохождении многосекционных систем имеет место многократное воздействие колесной пары на грунт, и в сочетании с циклическим характером нагрузки модели деформаций грунта должны учитывать особенности их длительного приложения.

Для основных разновидностей мерзлых грунтов — песков, супесей, суглинков и др. в работах [10–13] отмечают некоторые общие закономерности:

– прочность мерзлого грунта возрастает с понижением температуры  $T$ , уменьшением степени дисперсности, снижением влажности  $W$ , возрастанием льдистости до полного насыщения пор грунта льдом и ростом величины внешней нагрузки;

– прочностные характеристики мерзлого грунта (пределы прочности на сжатие  $\sigma_{сж}$ , сдвиг  $\sigma_{сд}$  и разрыв  $\sigma_p$ ), а также величина его несущей способности  $p_s$  снижаются по мере увеличения пористости и снижения плотности естественного залегания грунта ( $\rho$ ). Наряду с величиной  $\rho$  необходимо учитывать плотность скелета грунта  $\rho_c$  и состояние воды для заданных значений  $T$ .

В табл. 1 для четырех видов грунтов различной влажности  $W$  приведены данные о соотношении показателей  $\rho_c$  и  $\rho$  [13] при положительных температурах  $T$ .

**Таблица 1.** Значения  $\rho_c$  и  $\rho$  для некоторых грунтов определенной влажности  $W$ 

Грунт	$c$ , кг/м <sup>3</sup>	$c_c$ , кг/м <sup>3</sup>	$W$ , %
Песок пылеватый	1 800	1 630	10,4
Супесь легкая	1 700	1 540	10,2
Суглинок тяжелый	1 850	1 610	14,9
Глина пылеватая	1 950	1 740	17,4

Данные табл. 1 хорошо описываются соотношением:

$$\rho = \rho_c(1 + W/100). \quad (1)$$

В том случае, если с понижением  $T$  часть объема воды переходит в лед, плотность которого составляет в среднем 0,9175 (в зависимости от количества соли и примесей) от плотности воды, на эту величину как поправку следует умножить показатель  $W$  в соотношении (1), тем самым незначительно уменьшая плотность естественного залегания грунта  $\rho$ .

Массив мерзлого грунта представляет собой сложный многоагрегатный объект механики грунтов, в первую очередь из-за наличия воды в переменном температурном поле. Вода между его агрегатами и отдельными частицами при отрицательных температурах переходит в лед, который в ходе воздействия на него статической силы начинает деформироваться, вначале как упругое тело, затем, с ростом нагрузки, как пластическое тело и в момент разрушения — как хрупкое тело [14].

Установлено, что лед, по сравнению с другими кристаллическими телами, при длительных нагрузках отчетливо проявляет пластические свойства и под внешним воздействием может изменять свою форму без изменения объема, т. е. «течь». Этому состоянию льда соответствует режим течения вязкой жидкости.

Температура грунта с ростом глубины его залегания снижается [14], причем в диапазоне глубины до 0,5 м понижение  $T$  происходит практически линейно. Необходимо подчеркнуть, что мощность мерзлого слоя грунтов, как правило, изменяется в пределах от 0,6 до 2,5 м, таким образом, процесс контактного взаимодействия трелевочной системы с массивом грунта происходит в пределах мощности мерзлого слоя.

Общая величина сжатия (общая деформация)  $\varepsilon$  состоит из остаточных  $\varepsilon_{\text{л}}$  (структурного уплотнения, пластических) и упругих деформаций  $\varepsilon_y$  [7], причем упругие деформации могут достигать 60 % и более от величины  $\varepsilon$ . Для талых и оттаивающих грунтов с  $T \approx 0$  °C при длительном воздействии величина  $\varepsilon_y \rightarrow 0$ . При быстром нагружении, к которому можно отнести однократное взаимодействие колеса с грунтом, упругие деформации всегда имеют место. Для оценки соотношения  $\varepsilon_{\text{л}}$  и  $\varepsilon_y$  вводят безразмерный параметр  $\psi = \varepsilon_{\text{л}}/\varepsilon_y$ .

Таким образом, принимая во внимание принятые условия мгновенного однократного внешнего воздействия на грунт, при математическом моделировании можно пренебречь остаточными деформациями. Это позволяет в рамках упругой модели деформирования грунта принимать близкими значения модулей общей деформации  $E$  и упругости  $E_y$ . При многократном воз-

действии модуль  $E_y$  превосходит величину  $E$ , т. е. общая деформация  $\varepsilon$  будет увеличиваться.

С модулем  $E$  (МПа), по данным [15], связаны такие важные характеристики физико-механических свойств грунта, как удельный вес  $\gamma$  (кН/м<sup>3</sup>), величина внутреннего сцепления  $C$  (кПа), угол внутреннего трения  $\varphi$  (град.), коэффициент Пауссона  $\nu$ , глубина залегания твердого основания  $H$  (м), при этом связь параметра  $E$  с фактором температуры  $T$  и влажности  $W$  не установлена. В то же время, для мерзлых грунтов эта связь чрезвычайно важна.

Следуя положениям [11], выделим четыре основные фазы влияния параметра  $T$  на процесс промерзания влажного грунта:

- 1) понижение  $T$  по мере переохлаждения поровой воды;
- 2) повышение  $T$  вследствие кристаллизации части воды;
- 3) резкий переход большей части воды в лед;
- 4) постепенное понижение  $T$  уже мерзлого грунта, когда окончательно замерзает вся вода.

Количественно, по фазам, учесть влияние перечисленных факторов на физико-механические свойства мерзлого грунта с изменением  $T$  не представляется возможным, в связи с чем под температурой понимают значение  $T$  последней фазы замерзания. При этом для каждого грунта существует своя температура начала замерзания грунта  $T_z$ , которая в основном зависит от начальной температуры на поверхности грунта  $T_n$ , уровня засоленности ( $c$ , %), и влажности ( $W$ , %).

В табл. 2 по данным [16] представлены значения  $T_z$  для ряда мерзлых грунтов при влажности  $W = 20$  %, при этом с ростом показателя  $W$  наблюдается снижение  $T_z$ .

**Таблица 2.** Температура замерзания мерзлых грунтов

Наименование мерзлых грунтов	Температура замерзания, °C
Пески мелкие и пылеватые	-0,3
Супесь	-0,6
Суглинок	-1,0
Глина	-1,5

Параметр влажности требует более детального анализа. Если пренебречь процентной долей воды, находящейся в парообразном состоянии (тысячные доли процентов от общего объема), то схематично можно сказать, что вода содержится в грунте в двух основных состояниях — связанном и свободном.

Связанная высокоплотная (до 1200–1400 кг/м<sup>3</sup>) вода, занимающая до 40 % и более от общего объема, под действием статических нагрузок практически не уплотняется. Градиент ее перемещения — в направлении действия нагрузки и в сторону понижения  $T$ . Такая вода переходит в лед при достаточно низких температурах замерзания воды  $T_e \approx -4 \div -6$  °C.

Свободная вода состоит из гравитационной и капиллярной составляющих. Капиллярная вода замерзает при  $T$ , близких к значениям температуры замерзания связанной воды, процесс перехода гравитационной во-

ды в лед происходит уже при любых отрицательных  $T \leq 0$  °С.

Таким образом, с позиций механики деформирования и разрушения мерзлого влажного грунта можно выделить два основных состояния присутствующей в нем воды:

1. Высокоплотная, до 1 400 кг/м<sup>3</sup>, с низкой (до –6 °С) температурой замерзания вода, включающая связанную и свободную капиллярную воды;

2. Вода свободная гравитационная с плотностью 1 000 кг/м<sup>3</sup>, переходящая в лед при достижении любых отрицательных температур.

Как отмечалось выше, информативным показателем упругопластических и деформационных свойств грунтов, в том числе мерзлых и оттаивающих, выступает величина модуля общей деформации  $E$ , равная отношению величины сжимающих напряжений  $\sigma$  к величине относительной общей деформации  $\varepsilon$  в условиях кратковременного действия статической нагрузки  $q$ . Модуль  $E$  в общем случае составляет часть  $E_y$ , пропорционально доле упругих деформаций  $\varepsilon_y$  в общей величине  $\varepsilon$ .

При незначительных отрицательных значениях температуры (близких к нулю) мерзлые грунты, даже при небольших нагрузках, могут значительно уплотняться [10], не переходя в талое состояние. Такие грунты относят к категории сжимаемых, а степень сжимаемости определяется именно параметром модуля упругости  $E_y$ .

В табл. 3 представлены значения величины  $E_y$  для ряда грунтов в зависимости от их температуры  $T$  [16].

**Таблица 3.** Модуль упругости  $E_y$  мерзлых грунтов

Наименование грунта	Модуль упругости $E_y$ (МПа) 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

Устойчивых корреляционных связей между модулем упругости и влажностью грунта  $W$  по данным [10] выявить не удалось.

Кратное (в 3–5 раз) увеличение показателя  $E_y$  (табл. 2) по мере понижения температуры до –6 °С обусловлено переходом как свободной, так и связанной воды из жидкого состояния ( $E_y$  порядка 2 000 МПа) в лед ( $E_y$  порядка 6000–10000 МПа), т. е. имеет место аналогичное кратное увеличение показателя модуля упругости мерзлого грунта.

Математические модели механики контактного взаимодействия [17] инденторов различной формы (плоских, конусных, сферических и др.) свидетельствуют о том, что величина контактного сближения и радиус контактной площадки зависят, наряду с показателем модуля  $E$ , от такой характеристики упругопластических свойств среды, как коэффициент Пуассона  $\nu$ .

Величина коэффициента Пуассона во многом определяется показателем влажности  $W$ , причем это влияние установлено при моделировании контактного взаи-

модействия не только в массиве грунта, но и при взаимодействии инденторов с массивом древесины различной структуры [18; 19].

Наряду с этим коэффициент  $\nu$  в задачах механики разрушения грунтов в моделях с внутренним трением [6–9] определяет коэффициент пропорциональности  $\alpha$  между вертикальными  $\sigma$  и тангенциальными  $\tau$  напряжениями элементарного объема грунта.

В табл. 4 по данным [11] приведены значения коэффициента Пуассона для ряда мерзлых грунтов в диапазоне изменения  $T$  от –0,2 до –1 °С, т. е. в том диапазоне, когда часть объема свободной воды переходит в лед.

**Таблица 4.** Показатели коэффициента Пуассона мерзлых грунтов

Наименование грунта	Влажность $W$ , %	Коэффициент $\nu$
Пески и супеси	18	0,2–0,4
Суглинок легкий пылеватый	29	0,3–0,4
Глина	33	0,4–0,5
Пресный лед	–	0,34

Анализ данных табл. 4 показывает, что с ростом  $W$  коэффициент  $\nu$  увеличивается пропорционально  $\bar{W}$ , при этом меняется и характер деформации элементарного объема грунта.

Так, если при  $\nu = 0,2$  значения горизонтальных напряжений  $\tau$  составляют 25 % от вертикальных сжимающих напряжений  $\sigma$ , то при  $\nu \rightarrow 0,5$  имеет место предельное стремление  $\tau \rightarrow \sigma$ , т. е. элемент массива будет находиться в состоянии всестороннего сжатия. Это состояние хорошо описывается математическими моделями несжимаемой жидкости.

Как уже отмечалось выше, параметр  $T$  существенно влияет на прочностные показатели мерзлых грунтов, а именно пределы его прочности на сжатие  $\sigma_{сж}$ , сдвиг  $\sigma_{сд}$  и разрыв  $\sigma_p$ .

Наиболее надежно определяются [10], информативно и достоверно формируются статистические выборки значений величины  $\sigma_{сж}$ .

В табл. 5 на основании опытных данных представлены значения  $\sigma_{сж}$  ( $10^2$  кПа) для четырех мерзлых грунтов и льда по мере понижения температуры  $T$ .

**Таблица 5.** Значения предела прочности на сжатие  $\sigma_{сж}$  ( $10^2$  кПа) с понижением температуры  $T$

$T$ , °С	Песок пылеватый	Песок кварцевый	Супесь	Глина	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	65	122	59	89	47

Анализ данных табл. 5 свидетельствует о том, что даже для мерзлых песков наблюдаются существенные

отличия величин  $\bar{\sigma}_{сж}$ . Показатель прочности льда кратко, а в некоторых случаях до 20 и более раз ниже прочности грунтов, особенно при небольших (до  $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) отрицательных температурах. Это означает, что в условиях повышенной влажности грунтов ( $W$  более 30–40 %) с понижением  $T$  прочность грунта на сжатие существенно снижается.

Этот вывод для показателя предела прочности на сдвиг  $\sigma_{сд}$  в общем случае сделать неправомерно, о чем свидетельствуют данные табл. 6, где представлены значения  $\bar{\sigma}_{сд}$  ( $10^2$  кПа) для супеси и глины по мере понижения температуры  $T$ . Поскольку доминирующим механизмом при разрушении является механизм сдвига, то можно заключить, что с понижением  $T$  отмечается рост прочности мерзлого грунта.

**Таблица 6.** Значения предела прочности на сдвиг  $\bar{\sigma}_{сд}$  ( $10^2$  кПа) с понижением температуры  $T$

$T, ^{\circ}\text{C}$	Супесь	Глина	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

Таким образом, фактор температуры в сочетании с влажностью массива грунта обуславливает особые условия взаимодействия с ним трелевочных систем, которые имеют место при производстве лесосечных работ на мерзлых и оттаивающих почвогрунтах.

Отношение пределов прочности на сжатие к сдвигу ( $\chi$ ), т. е.  $\chi = \sigma_{сж}/\sigma_{сд}$ , также косвенно характеризует пластические свойства мерзлого грунта: чем ближе это отношение к 1, тем более пластические свойства проявляет мерзлый грунт. В этом случае при многократном и циклическом характере взаимодействия с ним трелевочной системы уплотнение грунта будет больше, чем при расчетах в рамках упругих моделей.

При низких температурах в массиве мерзлого почвогрунта в достаточно большом объеме присутствует лед, оказывающий влияние на повышение несущей способности грунта под действием начальной вертикальной нагрузки ( $q_0$ , кПа) трелевочной системы. Величина  $q_0$  заполняет достаточно широкий диапазон от 20 до 80 кПа.

При высоких положительных значениях показателя  $T$  в условиях интенсивного оттаивания мерзлого почвогрунта происходит перенасыщение его влагой, в связи с чем ослабевают природные связи между твердыми частицами, и 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 концентрацию воды на границе с оттаивающим почвогрунтом. Это приводит к повышению его общей влажности ( $W$ ), снижению величины сцепления  $C$  и несущей способности  $p_s$  в целом.

Этот вывод подтверждается данными исследований [16], которые представлены в табл. 7, характеризующей влияние увеличения параметра  $W$  (%) на процесс снижения величины сцепления  $C$  (кПа) и угла внутреннего трения  $\varphi$  (град.) во внутренних зонах грунта и на границе его оттаивания (зона мерзлоты).

**Таблица 7.** Характеристики  $C$  и  $\varphi$  оттаявших грунтов и на границе оттаивания

Грунт	$W_0, \%$	Оттаивающий грунт		На границе оттаивания	
		$C$	$\varphi$	$C$	$\varphi$
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 видим, если угол  $\varphi$  в массиве почвогрунта и на границе с мерзлотой изменяется незначительно (отличие не более 7–13 %), то величина сцепления  $C$  для песков снижается в 5 раз, для остальных грунтов — в среднем на 25–35 %, что необходимо учитывать в расчетных моделях.

Повышение влажности кардинально снижает показатели  $C$  и  $\varphi$ , особенно величину сцепления  $C$ .

Математические модели разрушения сплошных сред, в том числе и грунтов, широко используют модели предельного состояния, в частности Кулона – Мора. Согласно этому подходу между величиной сопротивления сдвигу  $\tau$  и сжимающей (нормальной)  $\sigma$  компонентами напряжений установлена связь:

$$\tau = C + \sigma \cdot \text{tg}\varphi. \tag{2}$$

Данные табл. 7 однозначно свидетельствуют о том, что по мере погружения колесной пары лесной машины, например, форвардера, в массив оттаявшего грунта и приближения к границе с мерзлотой предельное значение  $\tau$  будет снижаться.

Этот вывод можно соотнести с результатами исследований [20], где получено корреляционное соотношение между величиной несущей способности грунта  $p_s$  и параметрами  $C$  и  $\varphi$ :

$$p_s = 4,2C^3 \overline{\varphi}. \tag{3}$$

Соотношение (3) также свидетельствует о достаточно сильном снижении показателя  $p_s$  по мере снижения параметров  $\varphi$  и особенно  $C$ , обусловленных повышением влажности по мере насыщения массива грунта влагой и ее концентрацией вблизи водонепроницаемого слоя вечной мерзлоты.

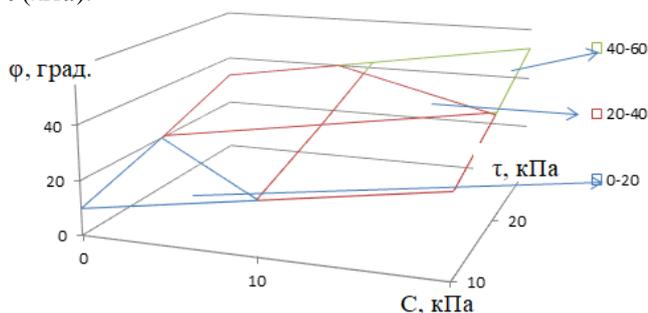
В табл. 8 на основе (2) при  $\sigma = q_0 = 56$  кПа приведены оценочные данные о предельной величине  $\tau$  (кПа) в зависимости от значений  $C$  и  $\varphi$ .

**Таблица 8.** Предельные значения сопротивления сдвигу массива грунта  $\tau$  (кПа)

Угол $\varphi$ , град.	Величина внутреннего сцепления $C$ , кПа		
	0	10	20
10	9,87	19,87	29,87
20	20,37	30,37	40,37
30	32,31	42,31	52,31

Данные табл. 8 показывают, что диапазон изменения величины  $\tau$  практически составляет 10–50 кПа, т. е. 17–90 % величины начальной нагрузки трелевочной системы  $q_0$ .

Для наглядности данные табл. 8 проиллюстрированы на рис. 1, где отложены значения  $C$  (кПа),  $\varphi$  (град.),  $\tau$  (кПа).

**Рис. 1.** Влияние параметров сцепления  $C$  и  $\varphi$  на уровень предельного сопротивления грунта сдвигу  $\tau$ 

Если взять в качестве примера песок, то в сухом состоянии ( $W = 8\%$ ) величина его предельного сопротивления сдвигу превышает 75 % начальной нагрузки трелевочной системы на почву, тогда как на границе с зоной мерзлоты его влажность возрастает в 4 раза, до  $W = 32\%$ , и величина  $\tau$  составляет уже менее 30 %  $q_0$ .

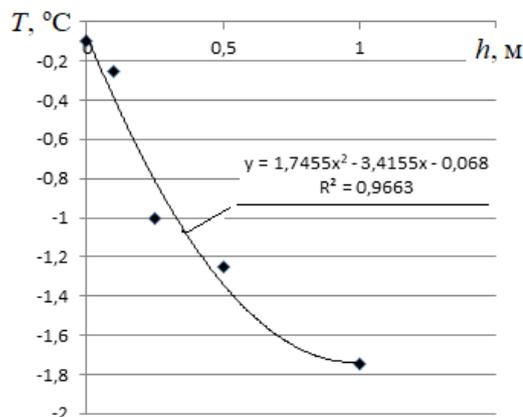
При этом необходимо учитывать, что по одному и тому же волоку трелевочная многоосная система проходит несколько раз, и такое циклическое воздействие усиливает процесс фильтрации воды в жидком состоянии в направлении действия вертикальной сжимающей нагрузки, т. е. в направлении к границе зоны мерзлоты.

В этой связи математические модели должны учитывать фильтрационные особенности грунта и циклический характер изменения его свойств по мере повышения общей влажности и снижения температуры  $T$  по мере приближения к зоне мерзлоты и перехода воды в лед, тем самым трансформируя упругопластические и прочностные свойства грунта.

На рис. 2 на основе опытных данных [12] для ряда мерзлых грунтов представлен обобщенный график изменения величины  $T$  (ось ординат,  $^{\circ}\text{C}$ ) с глубиной залегания пласта грунта ( $h$ ) (ось абсцисс, м). С высокой степенью достоверности зависимость  $T(h)$  носит полиномиальный характер, причем действительно, как уже отмечалось выше, до глубины 0,5 м снижение температуры происходит линейно при дальнейшем уменьшении интенсивности понижающей зависимости  $T(h)$ . Как видим, в этих пределах изменения  $h$  весь объем свободной воды перейдет в лед.

Очевидно, что указанные циклические процессы фильтрации воды и изменения физико-механических

свойств мерзлого и оттаявшего грунта носят вероятностный характер, и при обосновании требований математической модели необходимо использовать аппарат теории вероятностей в контексте теории переходных состояний в условиях неполной информации о параметрах взаимодействия с ним трелевочной системы.

**Рис. 2.** Характер понижения температуры грунта с ростом глубины его залегания

Теорию переходных состояний, в частности цепи Маркова, широко используют в различных областях знаний, например, в работах [21; 22], где случайные параметры характеризуются матрицей вероятностей их переходов из одного состояния в другое.

Особое место в формулировании требований к моделированию процессов взаимодействия трелевочной системы с массивом грунта занимает обоснование учета параметров штампа.

В работах [5; 15] отмеченный учет осуществляют через использование таких параметров, как длина и ширина штампа, размеры площадки контакта, величина нагрузки на колесо и величина внутреннего давления в камере шины и ряда других.

В контактных задачах механики разрушения используют начальное давление индентора, размер радиуса контактной площадки и глубину зоны сближения [17].

Многофакторность процесса учета параметров штампа осложняет задачу определения начального напряженно-деформированного состояния контактной зоны грунта. В этой связи представляется целесообразным учитывать интегральный, технологически обоснованный показатель взаимодействия — величину начального давления  $q_0$  трелевочной системы на грунт.

В табл. 9 приведены характеристики некоторых форвардеров с указанием достигаемых начальных значений  $q_0$  под колесными парами, каждую из которых можно принимать за соответствующие одиночные штампы.

Как видим, эксплуатация 8–10-колесных трелевочных систем с использованием гусениц при нагрузке  $P = 19–20$  т создает давление  $q_0 = 35–37$  кПа, что в 2 и более раз меньше действующих давлений  $q_0 = 68–80$  кПа при использовании 4–6-колесных систем без применения гусениц, причем применение последних в 6-колесной системе снижает давление практически на 33 %, с 40 до 27 кПа.

**Таблица 9.** Характеристики трелевочных систем и давление их на грунт

Трелевочная система	Вес Р, т	$q_0$ , 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

Методы управления начальным давлением при лесозаготовках в сложных геотехнических и сезонно-климатических условиях развиты в работах [23; 24], где отмечается, что при необходимости можно оперативно снижать величину  $q_0$  до значений уровня 10 кПа.

Оперативный учет реального состояния почвы возможен только опытным путем непосредственно в зоне производства работ. В этой связи представляется единственно возможным комбинированный подход к моделированию процессов взаимодействия, когда ряд параметров носит эмпирический характер, а уравнения их

#### Литература

- Бурмистрова О.Н., Чемшикова Ю.М., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Тамби А.А. Теоретическое обоснование параметров средоадаптивного движителя гусеничного вездехода // Системы. Методы. Технологии. 2019. № 3 (43). С. 81–88.
- Zhuk A.Yu., Nahina A.M., Grigorev I.V., Ivanov V.A., Gasparyan G.D., Manukovsky A.Y., Kunitskaya O.A., Danilenko O.K., Grigoreva O.I. Modelling of indenter pressed into heterogeneous soil // J. of Engineering and Applied Sciences. 2018. Т. 13, № S8. С. 6419–6430.
- Sparchez G., 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 Brasov. Series II: Forestry. Wood Industry Agricultural Food Engineering. 2009. Vol. 2 (51). 2009. P. 35–44.
- S. Ticu V.A. Aspects regarding forest pollution with dust provoked by timber road transportation // Bulletin of the Transilvania University of Brasov. Series II: Forestry. Wood Industry Agricultural Food Engineering. 2012. Vol. 5 (54). № 1. P. 115–122.
- Агейкин Я.С. Вездеходные колесные и комбинированные движители. М.: Машиностроение, 1972. 184 с.
- Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Жукова А.И. Влияние сдвиговых деформаций на процесс циклического уплотнения почвы // Естественные и технические науки. 2006. № 1 (21). С. 174–180.
- Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Шкрум В.Д. Моделирование циклического воздействия единичного грунтозацепа на процесс уплотнения почвы // Техника и технология. 2006. № 1 (13). С. 43–47.
- Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Жукова А.И. Особенности динамического уплотнения почвы при ее циклическом нагружении // Актуальные проблемы современной науки. 2006. № 3 (29). С. 301–309.
- Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Лепилин Д.В., Жукова А.И. Моделирование уплотнения почвогрунта в боковых полосах трелевочного волока с учетом изменчивости трассы движения // Учен. записки Петрозав. гос. ун-та. Сер. Технические науки. 2010. № 6 (111). С. 61–64.

связи в моделях деформирования вытекают из фундаментальных понятий естествознания.

При этом модель должна быть открытой для корректировки на определенном шаге циклического взаимодействия системы с почвогрунтом.

Так, прогнозная модель предложена в работе [25], где до начала работ на нулевом цикле ( $N = 0$ ) фиксируют исходные параметры взаимодействия и используют их в расчетных моделях. На стадии следующих двух циклов ( $N = 1$  и  $N = 2$ ) корректируют модель и делают прогноз на долгосрочную перспективу. Представляет интерес оценить глубину прогноза при таком подходе и обосновать шаг корректировки параметров.

Таким образом, на основании выполненных обобщений и анализа можно сделать вывод о том, что рассмотренные в настоящей работе условия формирования параметров взаимодействия трелевочной системы с мерзлым и оттаявшим почвогрунтом выступают в качестве основных требований разработки адекватной математической модели — системы формальных связей между действующими многократными циклическими нагрузками и массивом грунта как сложным объектом геомеханики.

- Велли Ю.Я., Докучаев В.В., Федоров Н.Ф. Здания и сооружения на крайнем Севере. Л.: Госстройиздат, 1963. 492 с.
- Цытович Н.А. Механика мерзлых грунтов. М.: Высш. школа. 1983. 288 с.
- Долматов Б.И. Механика грунтов, основания и фундаменты. СПб.: Стройиздат, 1988. 416 с.
- Вялов С.С. Реология мерзлых грунтов. М.: Стройиздат, 2000. 464 с.
- Бычковский Н.Н., Гурьянов Ю.А. Ледовые строительные площадки, дороги и переправы. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2005. 260 с.
- Хитров Е.Г., Божбов В.Е., Ильющенко Д.А. Расчет несущей способности лесных почвогрунтов под воздействием колесных движителей // Системы. Методы. Технологии. 2014. № 4 (24). С. 122–126.
- Роман Л.Т., Котов П.И., Царапов М.Н. Модуль деформации мерзлых грунтов при компрессионных испытаниях. Основания, фундаменты и механика грунтов. 2016. № 5. С. 35–40.
- Морозов Е.М., Зернин М.В. Контактные задачи механики разрушения. Изд. 2-е. М.: Либроком, 2010. 544 с.
- Газизов А.М., Шапиро В.Я., Григорьев И.В. Влияние влажности на развитие процесса разрушения коры при роторной окорке // Вестн. Моск. гос. ун-та леса – Лесной вестник. 2008. № 5. С. 129–133.
- Куницкая О.А., Шапиро В.Я., Бурмистрова С.С., Григорьев И.В. Определение оптимальных параметров процесса прессования и обезвоживания пропитанных древесных материалов // Вестн. Моск. ун-та леса – Лесной вестник. 2012. № 4. С. 110–115.
- Хитров Е.Г., Бартнев И.М. Расчет глубины колеи колесного движителя лесных тракторов на склонах. Лесотехнический журнал. 2016. Т. 6, № 4 (24). С. 233–239.
- Шапиро В.Я., Шапиро Н.А. Использование цепей Маркова для прогноза эффективности ПИФов // Экономическое развитие и практика: материалы междунар. науч. конф. М., 2007. С. 79–81.
- Шапиро В.Я., Шапиро Н.А. Моделирование портфельных инвестиций в условиях негативных сценариев развития фондового рынка // Финансы и кредит. 2008. № 15 (303). С. 39–51.

23. Прядкин В.И. Воздействие экологичной шины на почву // Вестн. Воронежского гос. лесотехн. ун-та. 2011. Т. 7, № 3. С. 198–200.
24. Сюнев В.С., Давыдков Г.А. Воздействие машин на лесные почвы // Труды лесоинж. ф-та Петрозав. гос. ун-та. 2001. С. 88–91.
25. Сюнев В.С., Ратькова Е.И. Методика прогнозирования воздействия лесозаготовительных машин на почвогрунты в межсезонные периоды // Учен. записки Петрозав. гос. ун-та. Сер. Технические науки. 2012. № 6. С. 70–74.
10. Velli YU.YA., Dokuchaev V.V., Fedorov N.F. Buildings and structures in the far North. L.: Gosstrojizdat, 1963. 492 p.
11. Cytovich N.A. Mechanics of frozen soils. M.: Vyssh. shkola. 1983. 288 p.
12. Dolmatov B.I. Soil mechanics, foundations and foundations. SPb.: Strojizdat, 1988. 416 p.
13. Vyalov S.S. Rheology of frozen soils. M.: Strojizdat, 2000. 464 p.
14. Bychkovskij N.N., Gur'yanov Yu.A. Ice construction sites, roads, and PE reprove. Saratov: Sarat. gos. tekhn. un-t, 2005. 260 p.
15. Hitrov E.G., Bozhbov V.E., Il'yushenko D.A. Distribution of bearing capacity of forest soils under the influence of wheel movers // Systems. Methods. Technologies. 2014. № 4 (24). P. 122–126.

#### References

1. Burmistrova O.N., SChemshikova YU.M., Grigor'ev I.V., Kunickaya O.A., Tambi A.A. Theoretical justification of the parameters of the environmentally acceptable motor of a tracked all- terrain vehicle // Systems. Methods. Technologies. 2019. № 3 (43). P. 81–88.
2. Zhuk A.Yu., Hahina A.M., Grigorev I.V., Ivanov V.A., Gasparyan G.D., Manukovsky A.Y., Kunitskaya O.A., Danilenko O.K., Grigoreva O.I. Modelling of indenter pressed into heterogeneous soil // J. of Engineering and Applied Sciences. 2018. V. 13, № S8. P. 6419–6430.
3. Sparchez G., 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 Brasov. Series II: Forestry. Wood Industry Agricultural Food Engineering. 2009. Vol. 2 (51). 2009. P. 35–44.
4. S. Ticu V.A. Aspects regarding forest pollution with dust provoked by timber road transportation // Bulletin of the Transilvania University of Brasov. Series II: Forestry. Wood Industry Agricultural Food Engineering. 2012. Vol. 5 (54). № 1. P. 115–122.
5. Agejkin YA.S. Off-road wheeled and combined propulsion. M.: Mashinostroenie, 1972. 184 p.
6. SHapiro V.YA., Grigor'ev I.V., ZHukova A.I. Influence of shear deformations on the process of cyclic soil compaction // Natural sciences and engineering. 2006. № 1 (21). P. 174–180.
7. SHapiro V.YA., Grigor'ev I.V., SHkrum V.D. Modeling of cyclical impact of a single ground hook on the soil compaction process // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. 2006. № 1 (13). P. 43–47.
8. SHapiro V.YA., Grigor'ev I.V., ZHukova A.I. Features of dynamic compaction of soil under its cyclic loading // Aktual'nye problemy sovremennoj nauki. 2006. № 3 (29). P. 301–309.
9. SHapiro V.YA., Grigor'ev I.V., Lepilin D.V., ZHukova A.I. Modeling of soil compaction in the side bands of the skidding hair taking into account the variability of the traffic route // Proceedings of Petrozavodsk State University. Natural & Engineering Sciences. 2010. № 6 (111). P. 61–64.
16. Roman L.T., Kotov P.I., Carapov M.N. The deformation modulus of frozen soils under compression trials // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2016. № 5. P. 35–40.
17. Morozov E.M., Zernin M.V. Contact problems of fracture mechanics. Izd. 2-e. M.: LIBROKOM, 2010. 544 p.
18. Gazizov A.M., SHapiro V.YA., Grigor'ev I.V. Influence of humidity on the development of the process of bark destruction in rotary debarking // Moscow state forest university bulletin – Lesnoy vestnik. 2008. № 5. P. 129–133.
19. Kunickaya O.A., SHapiro V.YA., Burmistrova S.S., Grigor'ev I.V. Determination of optimal parameters of the process of pressing and dewatering of impregnated wood materials // Moscow state forest university bulletin – Lesnoy vestnik. 2012. № 4. P. 110–115.
20. Hitrov E.G., Bartenev I.M. Calculation of the depth of the wheel drive of forest tractors on the slopes // Lesotekhnicheskij zhurnal. 2016. V. 6, № 4 (24). P. 233–239.
21. SHapiro V.YA., SHapiro N.A. Using Markov targets for forecasting the effectiveness of PIFOV // Ekonomicheskoe razvitiye i praktika: materialy mezhdunar. nauch. konf. M., 2007. P. 79–81.
22. SHapiro V.YA., SHapiro N.A. Modeling of portfolio investments under negative scenarios of stock market development // Finance and credit. 2008. № 15 (303). P. 39–51.
23. Pryadkin V.I. Impact of ecological tires on the soil // The Bulletin of Voronezh State Technical University. 2011. V.7, № 3. P. 198–200.
24. Syunev V.S., Davydkov G.A. Impact of machines on forest soils // Trudy lesoinzh. f-ta Petrozav. gos. un-ta. 2001. P. 88–91.
25. Syunev V.S., Rat'kova E.I. Method of forecasting the impact of logging machines on soils in the off-season periods // Proceedings of Petrozavodsk State University. Natural & Engineering Sciences. 2012. № 6. P. 70–74.