

## Оценка несущей способности мерзлого и оттаявшего грунта при неполной информации о состоянии его взаимодействия с трелевочной системой

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, Тихорецкий пр. 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, Россия

<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 11.03.2019, принята 16.04.2019

*Вариационные (вероятностно-статистические) методы расчета и оценки параметров различных процессов (систем) — механических, технологических, финансово-экономических и др. широко применяют в практических приложениях, когда исходные данные являются неполными (неточными или нечеткими), и их законы распределения неизвестны. Особое место в этих исследованиях занимает теория катастроф, и применительно к технологическим процессам и механизмам — теория катастрофы сборки как модель предельного состояния системы. Под катастрофой сборки понимаются качественные изменения параметров системы. Методы статистических испытаний с учетом вероятностных переходных состояний с некоторым приближением позволяют, задавшись гипотетическим (как правило) нормальным законом распределения нечетких управляющих переменных произвести оценку допустимых диапазонов вариации заданных конечных показателей. При этом принимается допущение о случайной природе плавного (непрерывного) перехода процесса из одного состояния в другое. В статье оценивается возможность применения положений теории катастроф к решению вопроса эффективности взаимодействия трелевочной системы с мерзлым и оттаявшим почвогрунтом. Несущая способность почвогрунта как определенной системы рассмотрена с позиций положений механики контактного разрушения сплошной среды. При оценке несущей способности мерзлого и оттаявшего почвогрунта учтены следующие особенности: при отрицательных температурах параметры, характеризующие несущую способность почвогрунта, в частности, пределы прочности на сжатие и сдвиг, а также модуль общей деформации существенно возрастают по сравнению с аналогичными показателями при положительной температуре, в связи с чем система находится в более устойчивом состоянии. При положительной температуре оттаявший почвогрунт в непосредственной близости от границы зоны вечной мерзлоты в силу ее водонепроницаемости характеризуется высокими показателями общей влажности. Следствием этого является существенное снижение несущей способности почвогрунта, что приводит к образованию глубокой колеи и ухудшению показателей эксплуатации форвардеров. В статье для принятых в качестве нечетких переменных характеристик температуры и влажности мерзлого и оттаивающего почвогрунта установлена связь между ними с оценкой вероятных диапазонов переходных состояний. Показано, что моделирование статических нагрузок на почвогрунт и, как следствие, параметров процесса образования колеи различной глубины в заданных пределах изменения нечетких переменных позволяет дать обоснованный прогноз несущей способности почвогрунта для эффективной эксплуатации конкретной трелевочной системы.*

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

## Assessment of the carrying capacity of frozen and thawed soil with incomplete information on the state of its interaction with the logging system

S.E. Rudov<sup>1а</sup>, V.Ya. Shapiro<sup>2б</sup>, I.V. Grigoriev<sup>3с</sup>, O.A. Kunitskaya<sup>3д</sup>, O.I. Grigorieva<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, Russia

<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>a</sup><https://orcid.org/0000-0002-9900-0929>,  
<sup>b</sup><https://orcid.org/0000-0002-6344-1239>,  
<sup>c</sup><https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>,  
<sup>d</sup><https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>,  
<sup>e</sup><https://orcid.org/0000-0001-5937-0813>  
 Received 11.03.2019, accepted 16.04.2019

*Variational (probabilistic and statistical) methods of calculation and evaluation of parameters of various processes (systems): mechanical, technological, financial and economic, and others are widely used in practical applications when the initial data are incomplete (inaccurate or fuzzy) and their distribution laws are not known. A special place in these studies is occupied by the theory of catastrophes and in relation to technological processes and mechanisms – the theory of assembly catastrophe, as a model of the limiting state of the system. Qualitative changes in the system parameters are referred as a catastrophe assembly. With some approximation, statistical testing methods with probabilistic transition states allow, given a hypothetical (as a rule) normal distribution law for fuzzy control variables, to estimate the allowable ranges of variation of specified end indicators. In this case, an assumption is made about the random nature of a smooth (continuous) transition of the process from one state to another. The article assesses the possibility of applying the provisions of the theory of catastrophes to the solution of the question of the effectiveness of the interaction of the logging system with frozen and thawed soils. The bearing capacity of the soil as a specific system is considered from the standpoint of the mechanics of contact destruction of a continuous medium. When assessing the carrying capacity of frozen and thawed soil, the following features are taken into account: at negative temperatures, the parameters characterizing the bearing capacity of the soil, in particular, the limits of compressive strength and shear strength, as well as the modulus of total deformation, significantly increase compared with similar indicators at positive temperature, due to with which the system is in a more stable state. At a positive temperature, the thawed soil in the immediate vicinity of the border of the permafrost zone due to its water resistance is characterized by high levels of total humidity. The consequence of this is a significant reduction in the carrying capacity of the soil, which leads to the formation of deep gauge and deterioration in the performance of forwarders. In the article, for the adopted characteristics of temperature and humidity of frozen and thawing ground, taken as a fuzzy variable, the relationship between them with the estimated probable ranges of transition states was established. It is shown that the simulation of static loads on the soil and, as a consequence, the parameters of the process of formation of gauge of different depth within specified limits of change of fuzzy variables allows us to give a reasonable prediction of the bearing capacity of the soil for efficient operation of a particular logging system.*

**Keywords:** frozen soils; statistical tests; logging; forest machines; skidding systems; soil compaction and deformation.

## Введение

Вариационные (вероятностно-статистические) методы расчета и оценки параметров различных процессов (систем) — механических, технологических, финансово-экономических и др. широко применяют в практических приложениях, когда исходные данные являются неполными (неточными или нечеткими), и их законы распределения неизвестны [1; 2].

Особое место в этих исследованиях занимает теория катастроф и, применительно к технологическим процессам и механизмам, — теория катастрофы сборки как модель предельного состояния системы [3; 4]. Под катастрофой сборки понимаются качественные изменения параметров системы.

В частности, для двух управляющих нечетких параметров  $a$  и  $b$  с известными математическими ожиданиями (соответственно  $m_a$  и  $m_b$ ), но неизвестными законами распределения в работе [4] показаны условия, при которых система переходит из устойчивого состояния в состояние неустойчивого равновесия с последующим вероятным наступлением катастрофы сборки.

Методы статистических испытаний с учетом вероятностных переходных состояний [5–7] с некоторым приближением позволяют, задавшись гипотетическим (как правило) нормальным законом распределения нечетких управляющих переменных, произвести оценку допустимых диапазонов вариации заданных конечных показателей. При этом принимается допущение о случайной природе плавного (непрерывного) перехода процесса из одного состояния в другое.

*Цель работы:* установить связь для нечетких переменных характеристик температуры  $\bar{T}$  и влажности  $\bar{W}$

мерзлого и оттаивающего почвогрунта с оценкой вероятных диапазонов переходных состояний.

**Материалы и методы исследования.** Использованы справочные данные о физико-механических свойствах мерзлотных грунтов. Расчеты выполнены на основе механики разрушений. Использованы методы статистических испытаний с учетом вероятностных переходных состояний.

**Результаты исследования.** Следуя [2–4], обозначим за  $\lambda$  аргумент функции  $\xi_b(\lambda)$  распределения возможностей для дискриминанта  $D$  кубического уравнения  $x^3 + ax + b = 0$ , описывающего многообразие катастрофы (величина  $x$  — переменная состояния системы), что приводит к соотношению:

$$\lambda = 4(m_a - \sigma_a \beta)^3 + 27(m_b - \sigma_b \beta)^2, \quad (1)$$

где  $\sigma_a$ ,  $\sigma_b$  — среднеквадратические отклонения соответственно переменных  $a$  и  $b$ ;  $\beta$  — параметр отношения статистических показателей  $\lambda$ , равный  $\beta = m_\lambda / \sigma_\lambda$ , т. е. по своей статистической природе  $\beta$  является величиной, обратной коэффициенту вариации  $\eta_\lambda$  аргумента  $\lambda$ .

Условие неустойчивого равновесия записывается в виде неравенства  $\lambda > 0$ , устойчивого — в виде неравенства  $\lambda < 0$ . Переход из одного состояния в другое — это переход аргумента  $\lambda$  через 0.

Определив  $\beta$ , меру возможностей  $Q$  возникновения катастрофы сборки оценивают как  $Q = \exp(-\beta^2)$ .

Допустим, что  $\beta \rightarrow 0$ . В этом случае  $Q \rightarrow 1$ , т. е. возникновение катастрофы сборки есть событие достоверное.

Действительно, в этом случае коэффициент вариации  $\eta_\lambda \rightarrow \infty$ , и аргумент  $\lambda$  заполняет всю свою числовую

ось. Распределение случайной величины по всей числовой оси при любой заданной функции плотности вероятностей обуславливает вероятность достоверного события. В этом случае  $m_\lambda = 0$  и математические ожидания нечетких переменных связаны уравнением:

$$\lambda = 4(m_a)^3 + 27(m_b)^2 = 0. \quad (2)$$

Оценим возможность применения указанных положений к решению вопроса эффективности взаимодействия трелевочной системы с мерзлым и оттаявшим почвогрунтом. Несущую способность почвогрунта как определенной системы будем рассматривать с позиций положений механики контактного разрушения сплошной среды [8].

В современных трелевочных системах, в частности, на базе колесных форвардеров, техническим регламентом предусмотрена эффективная эксплуатация системы при максимально допустимых значениях глубины колеи  $h_k \leq 0,1$  м.

Если в мерзлых почвогрунтах данное условие, как правило, выполняется, то в оттаявших переувлажненных грунтах величина  $h_k$  значительно превышает указанное предельное значение, достигая 0,3 м и более. На экспертном уровне допускается предельное технологическое превышение (не более 50 %) строгого ограничения  $h_k \leq 0,1$  м.

При оценке несущей способности мерзлого и оттаявшего почвогрунта необходимо учитывать следующие особенности.

Дело в том, что при отрицательных температурах  $T$  параметры, характеризующие несущую способность почвогрунта (в частности, пределы прочности на сжатие ( $\sigma$ ) и сдвиг ( $\tau$ ), а также модуль общей деформации  $E$ ) существенно возрастают по сравнению с аналогичными показателями при положительных значениях  $T$ , в связи с чем система находится в более устойчивом состоянии [9–14].

Наряду с этим при положительных значениях  $T$  оттаявший почвогрунт в непосредственной близости от границы зоны вечной мерзлоты в силу ее водонепроницаемости характеризуется весьма высокими показателями общей влажности  $W$ , достигающими 35–40 % и более. Следствием этого является существенное снижение несущей способности почвогрунта, что приводит к образованию глубокой колеи и ухудшению показателей эксплуатации форвардеров.

С учетом отмеченных обстоятельств примем в качестве переменной состояния  $x$  глубину колеи  $h_k$ , одной управляющей нечеткой переменной  $a$  — температуру  $T$  (°C) грунта, а другой переменной,  $b$ , — его влажность  $W$  (%), причем в силу разных размерностей переменных  $T$  и  $W$  для корректности использования соотношений (1) и (2) имеет смысл представить нечеткие переменные в безразмерном виде, а именно как  $\bar{T} = T/T_0$  и  $\bar{W} = W/W_0$ .

За базовую температуру  $T_0$  принимаем 1 °C (нулевое значение  $T_0$  приводит при делении к неопределенности), а в качестве  $W_0 = 10$  % принимаем влажность весьма сухого почвогрунта. Таким образом, математические ожидания и среднеквадратические отклонения переменных принимаются безразмерными и, как след-

ствие, аргумент  $\lambda$  также является безразмерной величиной.

На рис. 1 в соответствии с (2) представлен график двумерной функции  $\lambda$ . Как видим, при условии  $\beta = 0$  устойчивая область системы ( $\lambda < 0$ ) характеризуется отрицательными значениями переменной  $\bar{T} \leq -2,4$  в достаточно широком диапазоне изменения переменной  $\bar{W}$ . По мере повышения  $\bar{T}$  аргумент  $\lambda$  принимает сугубо положительные и достаточно высокие значения.

Отход от этого состояния ( $\beta = 0$  и  $Q = 1$ ) означает принятие альтернативного и более вероятного условия, а именно:  $\beta \neq 0$ ,  $Q < 1$ . В этом случае необходимо при заданных статистических парах ( $m_a, \sigma_a$ ) и ( $m_b, \sigma_b$ ) определить  $\beta$ , при котором аргумент  $\lambda = 0$ .

Расчеты величины  $\lambda$  по формуле (1) показали, что в диапазоне изменения  $\bar{T}$  от  $-2,4$  до 1 при коэффициенте вариации не более 10 % (имеет место слабое рассеяние переменной  $\bar{T}$ ) и изменении переменной  $\bar{W}$  от 1,5 до 4,5 при коэффициенте вариации, близком к 35 % (сильное рассеяние переменной  $\bar{W}$ ), значения  $\beta$  заполняют диапазон в границах от 2,52 до 3,2. При среднем значении  $\beta = 2,86$  обеспечивается выполнение условия  $\lambda = 0$ . Этот вывод иллюстрируют данные рис. 2.

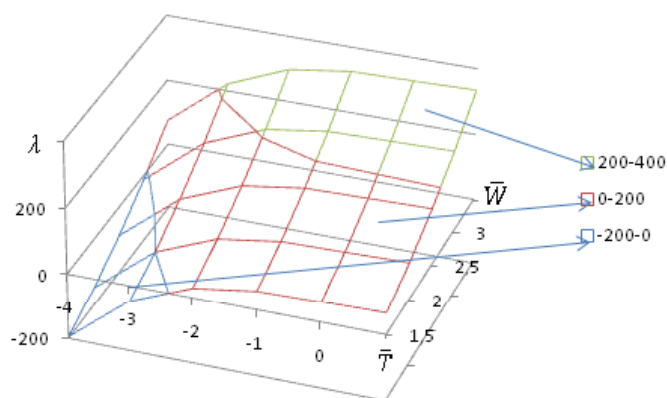


Рис. 1. Зависимость аргумента  $\lambda$  от нечетких переменных

Установленная величина  $\beta$  позволяет также оценить диапазон вариации переменной состояния (выходного параметра — вероятной глубины колеи  $h_k$ ):

$$h_k = 0,1 \left( 1 \pm \frac{1}{\beta} \right) = 0,7 \div 0,14 \text{ м.} \quad (3)$$

Таким образом, будем считать, что по достижении величиной  $h_k$  верхнего предела диапазона (0,14 м) система выхлтит из состояния устойчивого равновесия, и вероятность наступления катастрофы сборки существенно возрастает.

Необходимо отметить (рис. 3) влияние нечеткой переменной  $\bar{T}$  на величину аргумента  $\lambda$ .

В диапазоне  $\bar{T} = -0,25 \div 0,5$  величина  $\lambda \approx 0$ , и этот температурный диапазон, близкий к нулю, можно считать переходным от устойчивого состояния системы (несущей способности почвогрунта) к неустойчивому.

Сравнивая данные рис. 1 и 3, можно заключить, что достижение аргументом  $\lambda$  нулевого значения при  $\beta \neq 0$  и переход системы в неустойчивое состояние происходят при более высоких значениях переменной  $\bar{T}$ .

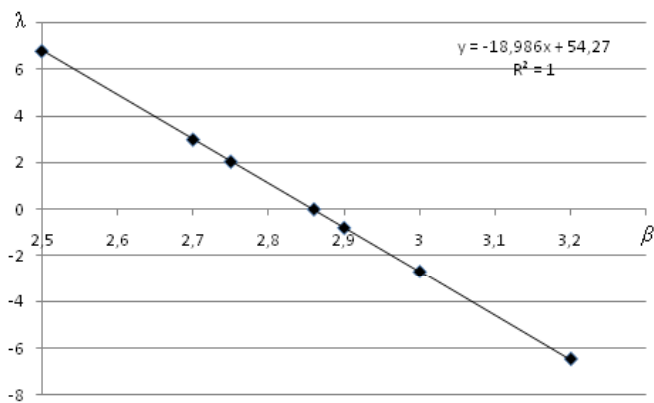


Рис. 2. Зависимость аргумента  $\lambda$  от параметра  $\beta$

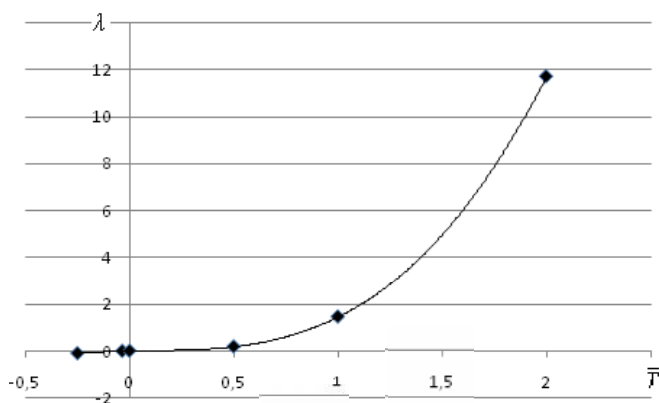


Рис. 3. Влияние нечеткой переменной  $\bar{T}$  на аргумент  $\lambda$  при  $\beta \neq 0$

При превышении  $\bar{T}$  значения 0,5 увеличение аргумента  $\lambda$  происходит по параболическому закону, что свидетельствует о существенном росте вероятности реализации катастрофы сборки.

В то же время, как видно на рис. 4, параметр  $\beta$  слабо зависит от переменной  $\bar{T}$  при весьма незначительном рассеянии параметра  $\beta$  — коэффициент вариации его значений не выходит за пределы 2%, что свидетельствует об устойчивости процесса перехода системы из одного состояния в другое.

Очевидно, что процесс взаимодействия форвардера с почвогрунтом не ограничивается только двумя отмеченными переменными температуры и влажности.

Наряду с факторами прочностных характеристик, модуля деформации, коэффициента Пуассона и другими физико-механическими свойствами почвогрунта его несущая способность обусловлена также действующими статическими нагрузками  $P$  и начальным вертикальным давлением  $q_0$ , которое передается грунту через колесные пары или гусеницы форвардера.

Основываясь на положениях [15; 16] моделей разрушения сдвигом насыщенной влагой среды с внутренним трением, наряду с нечеткими переменными почвогрунта, на процесс разрушения оказывают существенное влияние величины предела прочности на сдвиг ( $\tau$ ), модуля общей деформации ( $E$ ) и коэффициента Пуассона ( $\nu$ ).

Установим связь между отмеченными характеристиками почвогрунта и нечеткими переменными.

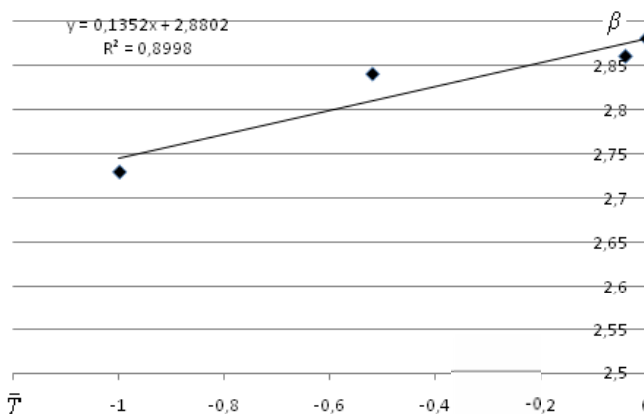


Рис. 4. Влияние нечеткой переменной  $\bar{T}$  на параметр  $\beta$

Обработка опытных данных [17; 18] по влиянию температуры  $T$  на величины  $E$  и  $\tau$ , представление результатов в безразмерном виде с отнесением их значений к соответствующему значению при максимальной температуре  $T = -0,1 \div -0,2$  °С, позволила получить зависимости (рис. 5) коэффициентов увеличения модуля деформации  $K_E$  и предела прочности на сдвиг  $K_\tau$  от нечеткой переменной  $\bar{T}$ .

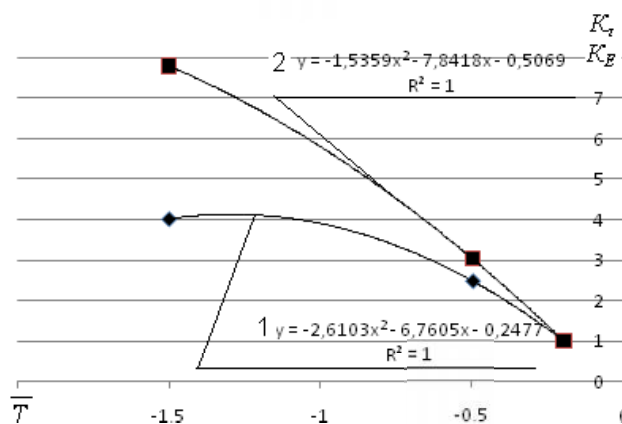


Рис. 5. Влияние нечеткой переменной  $\bar{T}$  на изменение показателей прочности и модуля деформации почвогрунта: 1 — коэффициент увеличения модуля деформации  $K_E$ ; 2 — коэффициент увеличения предела прочности на сдвиг  $K_\tau$

Как видим, расхождение кривых незначительно в диапазоне изменения переменной до диапазона  $\bar{T} = -0,25 \div -0,5$ . За пределами этого диапазона расхождение данных отличается существенным образом (в 1,5–2 раза).

Коэффициент Пуассона  $\nu$  слабо зависит от температуры почвогрунта и существенно зависит от его влажности [17; 18].

При этом параметр  $\alpha = \nu / (1 - \nu)$  является коэффициентом бокового распора и в моделях разрушения сплошной среды с внутренним трением [19] является коэффициентом пропорциональности между главными вертикальными и горизонтальными компонентами тензора напряжений и присутствует в показателе степени их затухания при воздействии штампа на почвогрунт.

Обработка опытных данных (рис. 6) [17; 18] в соответствии с подходом, предложенным в [9], выявила зависимость безразмерных характеристик  $\nu$  и  $\alpha$  от нечеткой переменной  $\bar{W}$ .

Как видно на рис. 6, с ростом переменной  $\bar{W}$  происходит существенное увеличение по экспоненциальному закону коэффициентов Пуассона  $\nu$  и бокового распора  $\alpha$ , причем в весьма увлажненных почвогрунтах ( $\bar{W} \geq 3,5$ ) коэффициент  $\nu \rightarrow 0,5$ , а параметр  $\alpha$  достигает значения 1.

Этот результат свидетельствует о том, что при повышенной влажности массив почвогрунта находится в состоянии всестороннего сжатия и ведет себя при деформировании подобно несжимаемой жидкости.

В работе [20] выявлены особенности сопротивления почвогрунта различной влажности действию внешней сдвиговой нагрузки в массиве оттаявшего грунта и на его границе с зоной мерзлоты.

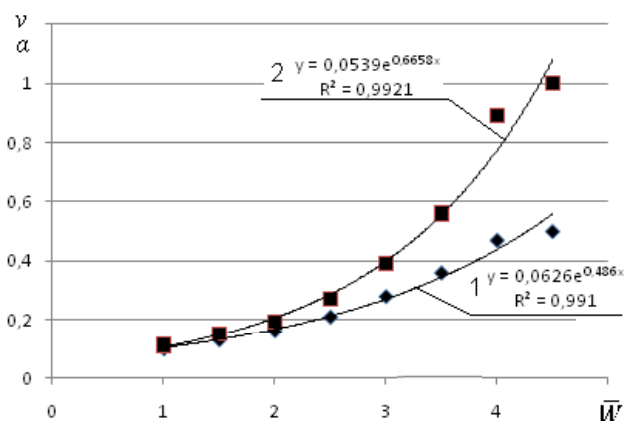


Рис. 6. Влияние нечеткой переменной  $\bar{W}$  на параметры  $\nu$  и  $\alpha$ : 1 — зависимость безразмерной характеристики  $\nu$ ; 2 — зависимость безразмерной характеристики  $\alpha$

Для супеси и суглинка в таблице представлены данные о влиянии  $\bar{W}$  на величину сцепления  $C$  ( $\kappaПа$ ) и угол внутреннего трения  $\phi$  ( $град.$ ). Величина предела прочности на сдвиг  $\tau$  рассчитана по закону Кулона – Мора как  $\tau = C + q_0 \text{tg } \phi$  при  $q_0 = 27 \text{ кПа}$ .

На примере супеси обработка данных таблицы позволила отразить (рис. 7) характер изменения величины  $\tau$  внутри массива и на границе сезонной мерзлоты с ростом переменной  $\bar{W}$ .

Анализ данных (рис. 7) показывает, что оба графика функции  $\tau$  ( $\bar{W}$ ) являются эквидистантными (равноудаленными друг от друга), что свидетельствует о совпадении характера влияния нечеткой переменной  $\bar{W}$  на прочность почвогрунта.

Таблица 1

Влияние переменной  $\bar{W}$  на характеристики прочности почвогрунта

Грунт	$\bar{W}$	Внутри массива			На границе с мерзлотой		
		$C$	$\phi$	$\tau$	$C$	$\phi$	$\tau$
Супесь Суглинок	1,00	21	19	29,64	16	17	23,78
Супесь	1,13	14	17	21,78	8	15	14,91
Суглинок	1,33	17	21	26,48	12	18	20,21
Супесь	1,53	7	16	14,35	5	11	10,12
Суглинок	1,87	8	17	15,78	4	12	9,57

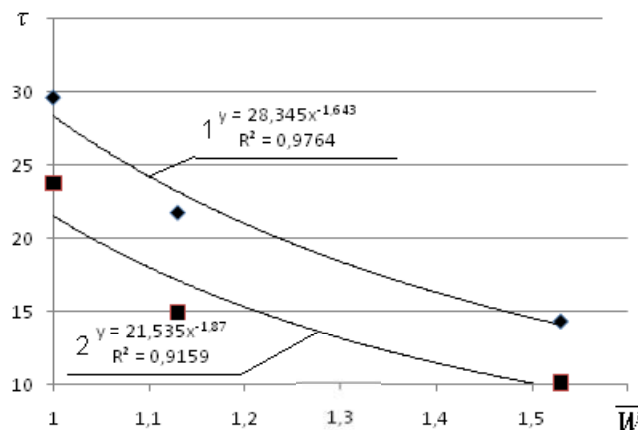


Рис. 7. Влияние переменной  $\bar{W}$  на величину предела прочности на сдвиг: 1 — характер изменения величины  $\tau$  внутри массива; 2 — характер изменения величины  $\tau$  на границе сезонной мерзлоты

По мере роста переменной  $\bar{W}$  прочность почвогрунта в непосредственной близости от границы зоны мерзлоты снижается практически на 30–50 % по сравнению с прочностью почвогрунта в глубине массива. Это означает, что при расположении зоны мерзлоты в относительной близости к поверхности почвогрунта (в диапазоне  $0,3 \div 0,6$  м) глубина колеи  $h_k$  может достигать этих значений, что при определенных условиях имеет место на практике.

Основываясь на полученных результатах, произведем в соответствии с положениями [8; 9] расчет несущей способности почвогрунта при воздействии на него движителя трелевочной системы.

В качестве критерия несущей способности примем значение максимальной глубины  $h_k$  погружения колеса (штампа) с характерным размером  $R$  в грунт при статической нагрузке  $P$ .

Основываясь на положениях [8], радиус контактной площадки  $a$  и глубину зоны контактного сближения  $h_0$  определим как:

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

Статическая сила  $P$ , распределенная по площади контакта, формирует начальное вертикальное давление  $q_0$ , которое в массиве грунта на глубине  $h$  определяет значения компонент некоторого поля напряжений.

При этом главные — вертикальная  $\sigma_v$  и горизонтальная  $\sigma_z$  компоненты с ростом  $h$  снижаются по закону [19]:

$$\sigma_v = q_0/\bar{h}^n, \quad \sigma_z = \alpha\sigma_v, \quad (5)$$

где  $\bar{h} = \frac{h}{h_0}$  - относительная глубина;  $\alpha$  — коэффициент бокового распора;  $n = k - \alpha$  — коэффициент затухания, зависящий от формы штампа: для сферического  $k = 3$ , цилиндрического  $k = 2$  и плоского  $k = 1$ . Максимальное касательное напряжение  $\tau_{max} = 0,5(\sigma_v - \sigma_z)$  при превышении на определенной глубине  $h$  величины предела прочности элемента почвогрунта на сдвиг  $\tau$  обуславливает разрушение массива и погружение штампа на эту глубину  $h = h_k$ .

В итоге получено соотношение для определения величины  $h_k$ :

$$h_k = h_0 \left[ \frac{q_0(1-2\nu)}{2\tau(1-\nu)} \right]^{\frac{1-\nu}{1-2\nu}} \quad (6)$$

На рис. 8 представлена зависимость  $h_k$  от нечеткой переменной  $\bar{W}$  для различных значений давления  $q_0$  под штампом с характерным размером  $R = 0,45$  м при взаимодействии движителя трелевочной системы с мерзлой и оттаивающей супесью.

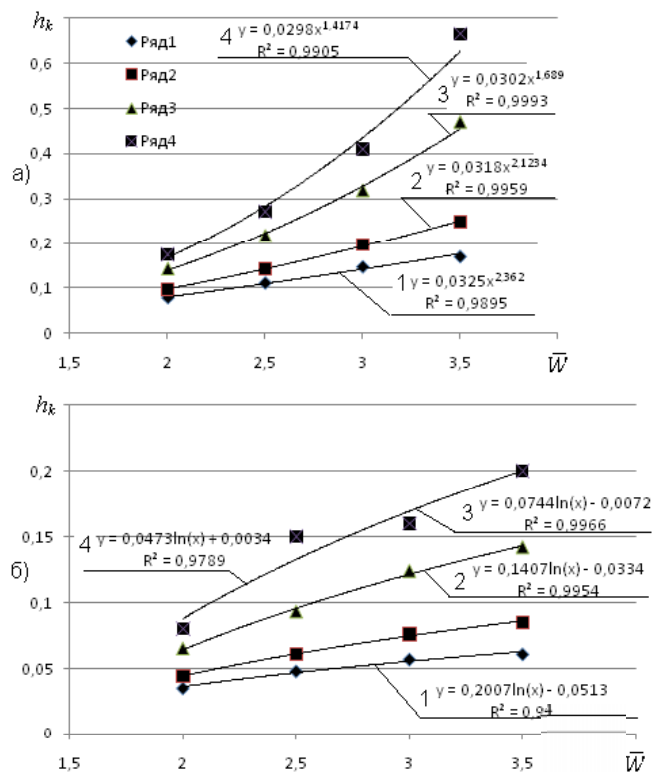


Рис. 8. Зависимость глубины колеи от переменной  $\bar{W}$  при  $q_0$ : а — оттаивающая супесь; б — мерзлая супесь. 1 — 27 кПа; 2 — 35 кПа; 3 — 58 кПа; 4 — 80 кПа

Расчеты выполнены при фиксированном значении коэффициента Пуассона  $\nu = 0,25$  для двух граничных состояний переменной  $\bar{T}$ : а) при положительном значении ( $\bar{T} = 0,5$ ) и б) при отрицательном значении ( $\bar{T} = -0,25$ ).

**Выводы**

Кривые 1 и 2 соответствуют параметрам плоского штампа ( $k = 1$ ) при низких значениях давления  $q_0$  на почвогрунт от действия гусениц, кривые 3 и 4 — цилиндрического штампа ( $k = 2$ ) при средних и высоких значениях  $q_0$  под действием колесной пары.

Анализ полученных кривых на рис. 8 а, б свидетельствует об их качественном различии, а именно степенном возрастающем характере зависимостей  $h_k$  от  $\bar{W}$  при положительной переменной  $\bar{T}$ , причем с увеличением давления  $q_0$  показатель степени возрастает на 65–70 %, с 1,4174 до 2,362, при практически постоянном коэффициенте, равном 0,03 при степенной функции.

Сравнивая данные на рис. 8 а с ограничительным соотношением (3), можно сделать вывод о том, что при начальном давлении  $q_0$  до 35 кПа в почвогрунтах уме-

ренной влажности (до 25 %) эффективные условия эксплуатации форвардеров выполняются.

При отрицательной переменной  $\bar{T}$  зависимости  $h_k$  от  $\bar{W}$  подчиняются логарифмическому, т. е. асимптотическому закону, причем коэффициент пропорциональности при натуральном логарифме со снижением давления  $q_0$  на почвогрунт уменьшается более чем в 4 раза, с 0,2 до 0,0473.

Условие (3) (см. данные на рис. 8 б) выполняется в более широком диапазоне изменения начальных давлений  $q_0$  (вплоть до максимальных значений  $q_0 = 80$  кПа) для почвогрунтов как умеренной влажности так и переувлажненных.

Принципиально различный характер поведения кривых на рис. 8 а, б свидетельствует о том, что при переходе через ноль переменной  $\bar{T}$  из области отрицательных в область положительных значений и наоборот процесс сопротивления почвогрунта при внешней статической нагрузке испытывает качественные изменения.

Так, повышение  $\bar{T}$  существенно (по степенному закону) снижает несущую способность почвогрунта и, как следствие, увеличивает глубину колеи и вероятность катастрофы сборки системы взаимодействия форвардера с почвогрунтом.

Наоборот, с понижением переменной  $\bar{T}$  несущая способность почвогрунта растет, глубина колеи уменьшается, асимптотически приближаясь к своему пределу, в результате чего показатели эффективности взаимодействия трелевочной системы с почвогрунтом стабилизируются в заданных пределах, и вероятность катастрофы сборки снижается, стремясь к нулю.

Таким образом, для принятых в качестве нечетких переменных характеристик температуры  $\bar{T}$  и влажности  $\bar{W}$  мерзлого и оттаивающего почвогрунта установлена связь между ними с оценкой вероятных диапазонов переходных состояний.

Моделирование статических нагрузок на почвогрунт и, как следствие, параметров процесса образования колеи различной глубины  $h_k$  в заданных пределах изменения нечетких переменных позволяет дать обоснованный прогноз несущей способности почвогрунта для эффективной эксплуатации конкретной трелевочной системы.

*Литература*

1. Уткин Л.В. Анализ риска и принятие решений при неполной информации. СПб.: Наука, 2007. 404 с.
2. Zadeh L.A. Fuzzy sets // Information and Control. 1965. Vol. 8. P. 338-353.
3. Арнольд В.Н. Теория катастроф. 3-е изд. доп. М.: Наука, 1990. 128 с.
4. Питухин А.В. Оценка возможностей возникновения катастрофы сборки при неполной статистической информации // Системы Методы Технологии. 2018. № 4 (40). С. 26-31.
5. Газизов А.М., Шапиро В.Я., Григорьев И.В. Вариационный метод расчета и стабилизации параметров роторной окорки // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2009. № 7 (148). С. 47-51.
6. Шапиро В.Я., Шапиро Н.А. Использование цепей Маркова для прогноза эффективности ПИФов // Экономиче-

ское развитие: теория и практика: сб. материалов междунар. науч. конф. М., 2007. С. 79-81.

7. 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.

8. Морозов Е.М., Зернин М.В. Контактные задачи механики разрушения. М.: Librokom, 2010. 544 с.

9. Рудов С.Е., Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Григорьева О.И. Математическое моделирование процесса уплотнения мерзлого почвогрунта под воздействием лесных машин и трелевочных систем // Системы Методы Технологии. 2018. № 3 (39). С. 73-78.

10. Рудов С.Е., Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Григорьева О.И. Особенности контактного взаимодействия трелевочной системы с мерзлым почвогрунтом // Изв. высш. учеб. заведений. Лесной журнал. 2019. № 1 (367). С. 106-119.

11. Rudov S., Shapiro V., Grigorev I., Kunitskaya O., Druzyanova V., Kokieva G., Filatov A., Sleptsova M., Bondarenko A., Radnaed D. Specific features of influence of propulsion plants of the wheel-tyre tractors upon the cryomorphic soils, soils, and soil grounds // International Journal of Civil Engineering and Technology. 2019. T. 10, № 1. С. 2052-2071.

12. Рудов С.Е., Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Григорьева О.И. Особенности взаимодействия трелевочной системы с оттаивающим почвогрунтом // Лесной вестник. 2019. Т. 23, № 1. С. 52-61.

13. Рудов С.Е., Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Григорьев М.Ф., Пучнин А.Н. Особенности учета состояния массива мерзлых грунтов при циклическом взаимодействии с трелевочной системой // Лесотехнический журнал. 2019. № 1. С. 116-128.

14. Рудов С.Е., Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Григорьева О.И. Вариационный метод расчета параметров взаимодействия трелевочной системы с массивом мерзлых и оттаивающих почвогрунтов // Системы Методы Технологии. 2019. № 1 (41). С. 68-77.

15. 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. № 6. С. 129-133.

16. Куницкая О.А., Шапиро В.Я., Бурмистрова С.С., Григорьев И.В. Определение оптимальных параметров процесса прессования и обезвоживания пропитанных древесных материалов // Вестн. моск. гос. ун-та леса - Лесной вестник. 2012. № 4. С. 110-115.

17. Цытович Н.А. Принципы механики мерзлых грунтов. М., Изд-во АН СССР. 1952. 168 с.

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

19. Мосинец В.Н., Абрамов А.В. Разрушение трещиноватых и нарушенных горных пород. М.: Недра, 1982. 248 с.

20. Царапов М.Н. Формирование прочностных характеристик грунтов в процессе оттаивания // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4: Геология. 2007. № 6. С. 31-34.

4. Pitukhin A.V. The evaluation of the possibilities of occurrence of cusp catastrophe in case of incomplete statistical information. System Methods Technologies. 2018. № 4 (40). P. 26-31.

5. Gazizov A.M., Shapiro B.Y., Grigorev I.V. Variational method of calculation and stabilization of parameters of rotary debarking // Directory. Engineering journal with the app.2009. № 7 (148). P. 47-51.

6. Shapiro B.Y., Shapiro N.A. The use of Markov chains to predict the efficiency of mutual Funds // In the book: Ekonomicheskoe development: theory and practice. Materials of the International scientific conference. Chairman of the editorial Board Boyko I. P. 2007. P. 79-81.

7. Shapiro V.Y., Shapiro N.A. Modeling of portfolio investments in the conditions of negative scenarios of the stock market // Finance and credit. 2008. № 15 (303). P. 39-51.

8. Morozov E. M., Zernin M.V. Contact problems of fracture mechanics. Ed.2-E. M. Librokom. 2010. 544 p.

9. Rudov S.E., Shapiro V.Y., Grigorev I.V., Kunitskaya O.A., Grigoreva O.I. Mathematical modeling of the process of compaction of frozen soil under the influence of forest machines and skidding systems. Systems Methods Technologies. 2018. № 3 (39). P. 73-78.

10. Rudov S.E., Shapiro V.Y., Grigorev I.V., Kunitskaya O.A., Grigoreva O.I. Features of contact interaction of skidding system with frozen soil // proceedings of higher educational institutions. Forest journal. 2019. № 1 (367). P. 106-119.

11. Rudov S., Shapiro V., Grigorev I., Kunitskaya O., Druzyanova V., Kokieva G., Filatov A., Sleptsova M., Bondarenko A., Radnaed D. Specific features of influence of propulsion plants of the wheel-tyre tractors upon the cryomorphic soils, soils, and soil soils // International Journal of Civil Engineering and Technology. 2019. Vol. 10. No. 1. P. 2052-2071.

12. Rudov S.E., Shapiro B.Y., Grigorev I.V., Kunitskaya O.A., Grigoreva O.I. Peculiarities of the interaction of the system with the thawing of the soils // Forest Bulletin / Forestry Bulletin, 2019. Vol. 23. No. 1. P. 52-61.

13. Rudov S.E., Shapiro V.Y., Grigorev I.V., Kunitskaya O.A., Grigorev M.F., Puchnin A.N. Features of accounting for the state of the array of frozen soils in the cyclic interaction with the skidding system // Forestry journal. 2019. No. 1. P. 116-128.

14. Rudov S.E., Shapiro V.Y., Grigorev I.V., Kunitskaya O.A., Grigoreva O.I. Variational method of calculation of parameters of interaction of skidding system with an array of frozen and thawing soils. Systems Methods Technologies. 2019. № 1 (41). P. 68-77.

15. Gazizov A.M., Shapiro B.Y., Grigorev I.V. Influence of humidity on the development of the process of bark destruction at rotor debarking // Bulletin of the Moscow state University of forests - Forest Bulletin. 2008. No. 6. P. 129-133.

16. Kunitskaya O.A., Shapiro V.Y., Burmistrova S.S., Grigorev I.V. Determination of optimal parameters of the process of pressing and dehydration of impregnated wood materials. Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta Lesa - Lesnoy Vestnik. 2012. No. 4. P. 110-115.

17. Tsytovich N.Ah. Principles of mechanics of frozen soils. M. publishing house of the USSR Academy of Sciences. 1952. 168 p.

18. Valley J.I., Dokuchaev V.V., Fedorov N.F. Buildings and structures in the far North. L.: State Construction. 1963. 492 p.

19. Mosinets V.N., Abramov A.V. Destruction of fractured and disturbed rocks. M.: Nedra. 1982. 248 p.

20. Zaripov M. N. The formation of strength characteristics of soils in the thawing process // Vestnik of Moscow University. Series 4: Geology. 2007. No. 6. P. 31-34.

#### References

1. Utkin L.V. Risk Analysis and decision making with incomplete information. SPb. Science. 2007. 404 p.

2. Zadeh L.A. Fuzzy sets // Information and Control. 1965. Vol. 8. P. 338-353.

3. Arnold V.N. The theory of catastrophes. 3-e Izd. EXT., Moscow: Nauka. 1990. 128 p.