

ОСОБЕННОСТИ УЧЕТА СОСТОЯНИЯ МАССИВА МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ТРЕЛЕВОЧНОЙ СИСТЕМОЙ

кандидат технических наук **С.Е. Рудов**¹

доктор технических наук, с.н.с. **В.Я. Шапиро**²

доктор технических наук, профессор **И.В. Григорьев**³

доктор технических наук, доцент **О.А. Куницкая**³

М.Ф. Григорьев³

А.Н. Пучнин³

1 – ФГБОУ ВО «Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

2 – ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

3 – ФГБОУ ВО «Якутская государственная сельскохозяйственная академия», г. Якутск, Российская Федерация

Проведение лесозаготовительных работ в районах Крайнего Севера характеризуется крайне сложными климатическими условиями. Эксплуатация трелевочных систем применительно к мерзлым почвогрунтам обуславливает необходимость учета его как многокомпонентной сложной среды. Необходимость минимизации техногенной нагрузки на окружающую среду выдвигает проблему оптимизации числа проходов трелевочной системы по одному и тому же волоку в разряд наиболее актуальных. Представленные в статье данные позволяют количественно оценить эффект от применения различных систем в конкретных климатических и технологических условиях. Разработанные в статье методические положения легли в основу пробных расчетов по выявлению адекватности математической модели технологическим условиям эксплуатации трелевочных систем при их циклическом воздействии на мерзлый почвогрунт. Результаты выполненных исследований и произведенные оценки влияния параметров трелевочной системы, температуры, влажности, льдистости, физико-механических свойств и состояния мерзлого почвогрунта на процесс его деформирования можно принять в качестве исходных требований при моделировании и оптимизации процесса циклического уплотнения почвогрунта.

Ключевые слова: мерзлые почвогрунты, лесозаготовки, трелевочные системы, уплотнение и деформация почвогрунтов.

FEATURES OF TAKING INTO ACCOUNT THE CONDITION OF FROZEN SOILS SOLID MASS IN CYCLIC INTERACTION WITH THE SKIDDING SYSTEM

PhD (Engineering) **S.E. Rudov**¹

DSc (Engineering), senior staff scientist **V.Ya. Shapiro**²

DSc (Engineering), Professor **I.V. Grigoriev**³

DSc (Engineering), Associate Professor **O.A. Kunitskaya**³

M.F. Grigoriev³

A.N. Puchnin³

1 – FSBEI HE S. M. Budjonny Military Academy of the Signal Corps, Saint-Petersburg, Russian Federation

2 – FSBEI HE Saint Petersburg State Forest Technical University under name of S.M Kirov, Saint-Petersburg, Russian Federation

3 – FSBEI HE Yakut State Agricultural Academy, Yakutsk, Russian Federation

Abstract

Logging in the regions of the Far North is characterized by extremely difficult climatic conditions. Operation of skidding systems in relation to frozen soils necessitates taking it into account as a multicomponent complex environment. The need to minimize the anthropogenic load on the environment raises the problem of optimizing the number of skidding system passes through the same runway to the category of the most relevant ones. The data presented in the

article allows quantifying the effect of the use of various systems in specific climatic and technological conditions. The methodological provisions developed in the article formed the basis of test calculations to determine the adequacy of the mathematical model to the technological conditions of logging systems operation with their cyclical effect on frozen soil. The results of studies and estimates of the influence of skidding system parameters, temperature, humidity, ice content, physical and mechanical properties and the state of frozen soil on its deformation can be taken as initial requirements for modeling and optimizing the process of cyclic soil compaction.

Keywords: frozen soils, logging, skidding systems, compaction and deformation of soil.

Трелевочная система при воздействии на почвогрунт через шины создает определенное давление, обуславливающее формирование напряженно-деформированного состояния массива в зоне контакта «шина-почвогрунт», который при достижении предельных нагрузок, подвергается разрушению.

По данным исследований [1], в результате разрушения плодородного слоя при проходе трелевочной системы установлены и классифицированы четыре состояния массива грунта: слабое повреждение слоя почвы, умеренное (до 50 %), сильное (от 50 до 100 %) и очень сильное повреждение, когда полезный слой полностью удален.

Эти обстоятельства в сочетании с необходимостью минимизации техногенной нагрузки на окружающую среду выдвигают проблему оптимизации числа проходов трелевочной системы по одному и тому же волоку в разряд наиболее актуальных [2-4].

При этом по данным [5] однократный проход трелевочной системы даже при невысоком среднем давлении на грунт (не более 47 кПа) приводит к отдельным разрывам сплошного массива, двукратный проход разрушает до 30 %, а трехкратный – до 80 % объема контактного слоя.

Эти выводы в основном относятся к разного вида связным грунтам при положительных значениях температуры (T) окружающей среды.

Применительно к условиям воздействия на мерзлые грунты процесс их деформирования и разрушения будет дополнительно характеризоваться влиянием фактора отрицательных температур и, как следствие, льда на физико-механические свойства грунта, в первую очередь, его упругие, пластические и прочностные характеристики.

Основное разрушающее воздействие трелевочная система оказывает на мерзлый грунт со слабым поверхностным слоем, содержащим лед до

60 и более процентов в единице объема. Именно лед радикально влияет на характер поведения грунта при статических нагрузках.

В связи с этим при эксплуатации современных трелевочных систем, в частности форвардеров различной модификации, одним из способов управления процессом воздействия на грунт является выбор оптимального количества колесных пар с целью снижения величины давления.

В табл. 1 представлены характеристики ряда трелевочных систем и величина (q) создаваемого ими давления на грунт под колесами в результате их динамического и статического воздействия [6]. Под первым штампом понимается движитель, под вторым - транспортная тележка.

Таким образом, использование 8-10-колесных трелевочных систем при нагрузке $P=19-20$ т создает давление на почвогрунт, в частности под движителем, равным $q=35$ кПа, что практически в 2 раза меньше значений соответствующего давления при использовании 4-6 колесных систем. При эксплуатации на слабонесущих грунтах применение гусениц позволяет снизить величину q до 27 кПа, однако подобные устройства приводят к дополнительным материальным и трудовым затратам.

Давление на грунт приводит к формированию зоны сжатия мерзлого почвогрунта. Чем больше размер этой зоны, тем большее усилие можно передать на почвогрунт с целью реализации тяги движителя.

Общая величина сжатия (общая деформация) ε состоит из остаточных ε_{II} (структурного уплотнения, пластических) и упругих деформаций ε_y [7], причем упругие деформации могут достигать 60 % и более от величины ε . Для талых грунтов с $T \approx 0$ °C при длительном воздействии величина $\varepsilon_y \rightarrow 0$. При быстром нагружении, к которому можно

отности взаимодействие колеса с грунтом, упругие деформации всегда имеют место. Для оценки соотношения ε_{Π} и ε_y введем безразмерный параметр $\psi = \varepsilon_{\Pi} / \varepsilon_y$.

Таблица 1

Характеристики трелевочных систем и давление на почвогрунт

Трелевочная система	Вес, т	q, кПа	
		штамп 1/ число колесных пар	штамп 2/ число колесных пар
4-х колесная	15	68 / 1	80 / 1
6-ти колесная	16	72 / 1	27 / 2
8-ми колесная	19	35 / 2	58 / 2
10-ти колесная	20	35 / 2	37 / 3

Отношение величины q к ε характеризуется модулем общей деформации E , причем по данным [8] величина E при изменении T от -2 до -6 °C в диапазоне изменения q от 100 до 300 кПа существенно зависит от q для мерзлой супеси и слабо зависит для суглинка. На рис. 1 представлена зависимость модуля общей деформации от давления на почвогрунт для супеси и суглинка.

При $q < 100$ кПа (диапазон давлений для трелевочных систем по данным табл. 1) зависимость E от q не установлена.

С понижением T величина E линейно растет практически для всех мерзлых грунтов.

Так, в частности, для супеси при значениях $-0,1$ °C $> T > -3,6$ °C значения E определяются в соответствии с зависимостью ($R^2=0,9625$):

$$E(T) = -1,2793T + 0,6835, \text{ МПа.} \quad (1)$$

Для каждого мерзлого грунта и конкретных условий необходимо устанавливать соответствующую связь (1).

В итоге на базе (1) для мерзлой супеси будем использовать соотношение по расчету ε с учетом T и q

$$\varepsilon(q, T) = q / (-1,2793T - 0,6835), \quad (2)$$

т.е. величина ε является двумерной функцией параметров q и T и растет пропорционально q .

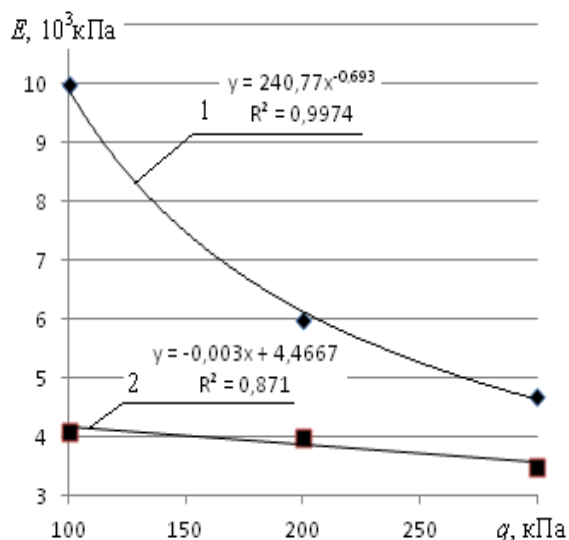


Рис. 1. Зависимость модуля общей деформации от давления на почвогрунт: 1 – супесь; 2 – суглинок

Из этого вывода следует, что рост давления штампа на почвогрунт вызывает развитие в нем существенных деформаций, приводящих к его уплотнению, а при превышении несущей способности — к разрушению. Величина относительного уплотнения определяется как: $\bar{\rho} = \rho / \rho_0 = 1 + \varepsilon$, где ρ_0 — начальная плотность грунта, ρ — плотность, полученная в результате сжатия почвогрунта от воздействия колеса.

На рис. 2 на основе соотношения (2) представлен график двумерной функции относительного уплотнения мерзлого грунта от его температуры и внешнего давления штампа.

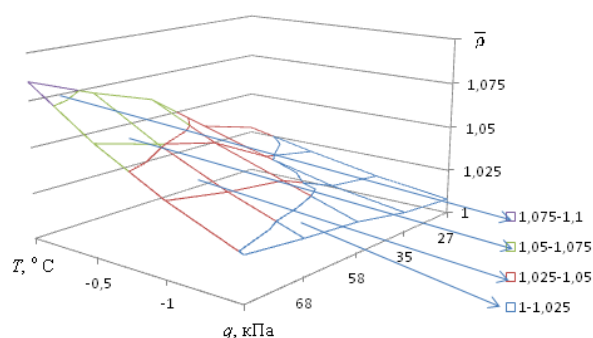


Рис. 2. Зависимость относительного уплотнения мерзлого грунта от его температуры и внешнего давления штампа

Как видно из рис. 2, для талого грунта использование 10-колесных транспортных систем приводит к определенному уплотнению ($\bar{\rho} \approx 1,04$)

уже после первого цикла воздействия штампа, причем возможное применение гусениц снижает уровень уплотнения на 32 %. В этих условиях эксплуатация 4-колесных систем обуславливает существенное уплотнение ($\bar{\rho} \approx 1,09$).

Для устойчиво мерзлого грунта все системы из табл. 1 на первом цикле не выводят параметр $\bar{\rho}$ за пределы 1,025.

Особый интерес представляет изучение процесса роста общей деформации и уплотнения мерзлого грунта по мере прохождения транспортной системы и реализации циклического действия штампов. Имеется в виду необходимость учета пластических и упругих свойств почвогрунта в контексте накопления остаточных деформаций. Очевидно, что эти особенности зависят от влажности мерзлого грунта, его температуры и, следовательно, льдистости.

Для мерзлых грунтов устойчивых корреляционных связей между E и W не установлено [8-10] и разброс значений E достигает десятки процентов.

Для талых грунтов величина E зависит от влажности W и может изменяться от 0,1-1,0 МПа для переувлажненных грунтов с показателем W выше предела их текучести до 35-50 МПа для грунтов с W ниже их предела пластичности [7]. Отмечается рост значений коэффициента Пуассона ν с ростом показателя W .

Учитывая, что величина ν при прочих равных условиях характеризует пластичность грунта, можно на экспертном уровне принять:

а) грунты сухие ($W=0,1-0,2$) с коэффициентом Пуассона ν не более 0,15-0,2 при деформировании в основном проявляют свойства хрупкости и параметр $\psi=0,25/0,75=0,3$;

б) грунты умеренной влажности ($W=0,2-0,3$) с коэффициентом Пуассона ν до 0,2-0,3 при деформировании проявляют как хрупкость так и пластичность и параметр $\psi=0,5/0,5=1$;

в) грунты высокой влажности ($W=0,35-0,55$ и более) с коэффициентом Пуассона $\nu=0,3-0,5$ при деформировании проявляют в основном свойства пластичности и параметр $\psi=0,75/0,25=3$.

Уплотнение и разрушение грунта приводит к погружению колеса на некоторую глубину h_0 и ухудшает условия эксплуатации трелевочных сис-

тем. Максимальная сила тяги, обусловленная силой поверхностного трения, зависит от величины предела прочности грунта на сдвиг $\sigma_{сд}$.

В моделях механики грунтов с внутренним трением [3] вертикальное давление q связано с горизонтальным давлением τ соотношением

$$\tau = \mu q, \quad (4)$$

где $\mu = \nu / (1 - \nu)$ – коэффициент бокового распора, определяемый коэффициентом Пуассона ν .

Анализ (4) показывает, что для переувлажненных почвогрунтов при $\nu \rightarrow 0,5$ $\mu \rightarrow 1$ и $\tau \approx q$. Почвогрунт находится в условиях объемного сжатия и его поведение описывается моделями несжимаемой жидкости.

При $\nu \rightarrow 0,2$, т.е. сухой почвогрунт при деформировании в значительной степени проявляет свойства хрупкости, величина τ составляет $0,25q$. В ряде случаев это приводит к тому, что усилий по сдвигу мерзлого почвогрунта будет недостаточно, доминировать будут усилия вертикального сжатия, приводящие к формированию соответствующих зон уплотнения.

Для исследования процессов возможного разрушения мерзлого почвогрунта под действием штампов необходимо произвести оценки характеристик прочности и их зависимости от реального состояния массива грунта.

Фактор температуры мерзлого почвогрунта T существенно влияет на его прочностные показатели, а именно: пределы прочности на сжатие $\sigma_{сж}$, сдвиг $\sigma_{сд}$ и разрыв σ_p . Чем ближе эти значения друг к другу, в первую очередь характеристики $\sigma_{сж}$ и $\sigma_{сд}$, тем большую пластичность проявляет массив почвогрунта. В основном для указанных прочностных характеристик имеют место следующие неравенства:

$$\sigma_{сж} > \sigma_{сд} > \sigma_p.$$

В табл. 2 сведены данные о прочности образцов мерзлой супеси и льда на сжатие $\sigma_{сж}$ (числитель) и сдвиг $\sigma_{сд}$ (знаменатель).

Для величины σ_p есть только отдельные выборочные данные для некоторых грунтов, в частности для мерзлой супеси $\sigma_p = 700-800$ кПа при $T < -1^\circ\text{C}$ и $\sigma_p \approx 2000$ кПа при $T \approx -4^\circ\text{C}$. Эти показатели соизмеримы с величиной несущей способности

сухих, связных грунтов [7] при положительных значениях T . Для влажных и переувлажненных грунтов их несущая способность снижается до 10-80 кПа и величина $\tau \approx q = 35 \div 80$ кПа (табл. 1) может превысить предельные значения прочности почвогрунта, что приведет к его разрушению.

Таблица 2

Значения пределов прочности на сжатие и сдвиг (кПа) с учетом T

$T, ^\circ\text{C}$	Супесь	χ	Лед	χ
-0,1	900/120	7,50	100/80	1,25
-1	1500/1000	1,50	500/400	1,25
-2	2100/1400	1,50	1300/1500	0,90
-3	3100/2100	1,48	2100/1900	1,11
-4	4100/2600	1,58	2800/1900	1,47

Интерес представляет величина χ , равная отношению прочностных характеристик $\sigma_{сж}$ к $\sigma_{сд}$, что отражено на рис. 3, на котором график иллюстрирует зависимость величины отношения $\chi = \sigma_{сж} / \sigma_{сд}$ от T ($^\circ\text{C}$) для супеси и льда.

Как видно из рис. 3, для состояния устойчиво мерзлого почвогрунта (T не более -1 $^\circ\text{C}$) отличия величин χ для супеси и льда незначительны.

Известно, что чем ближе χ к 1, тем в большей степени мерзлый почвогрунт проявляет пластичные свойства. По этому поводу в работе [8] отмечается, что супесь при $T \approx -3$ - -4 $^\circ\text{C}$ ведет себя с позиций пластичности как лед. Данные табл. 2 и рис. 2 подтверждают этот вывод.

Если показатели прочности для талого почвогрунта при $T = -0,1$ $^\circ\text{C}$ принять за масштабную единицу, то представляет интерес установление зависимостей безразмерных коэффициентов $K_{сж}$ и $K_{сд}$ от T .

Результаты расчетов отражены на рис. 4 (кривая 1 для показателя предела прочности на сдвиг, кривая 2 – на сжатие).

Установлено, что зависимость $K_{сж}(T)$ хорошо описывается линейной функцией, а $K_{сд}(T)$ – полиномом второй степени, причем по углу наклона кривых к оси T (первым производным соответствующих функций) можно сделать вывод о том, что интенсивность роста прочности на сдвиг кратно (до 5 и более раз) превосходит интенсивность роста прочности на сжатие. Этот результат приобретает особую актуальность, если учесть, что на силу тяги

двигателя оказывает влияние размер разрушаемого слоя, т.е. величина несущей способности почвогрунта, которая в зависимости от характера разрушения равна либо пределу прочности на сдвиг либо разрыв.

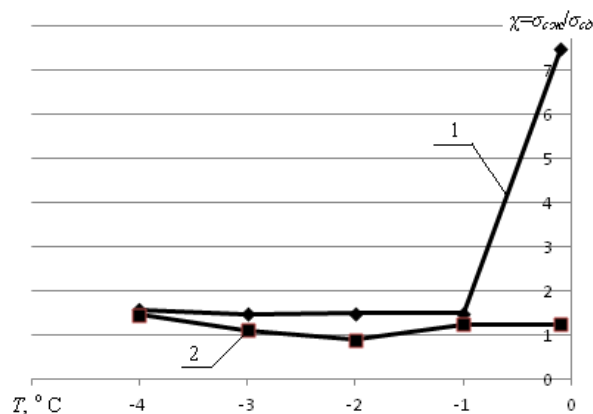


Рис. 3. Зависимость величины χ от T :

1 – супесь; 2 – лед

Величина предела прочности грунта на растяжение (разрыв) σ_p 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 в среднем $(0,2 \div 0,4) \sigma_{сж}$.

Если обратиться к количественной оценке влияния влажности на прочностные свойства мерзлых грунтов, то для мерзлых супесей в диапазоне изменения W от 10-15 % (сухие супеси) до 35-40 % (весьма влажные супеси) зависимость $\sigma_{сж}(W)$ подчиняется закону квадратичной гиперболы.

Для песков при изменении W с 5 до 20 % величина $\sigma_{сж}$ возрастает более чем в 2 раза.

Для глины при $T = -3$ - -4 $^\circ\text{C}$ снижение $\sigma_{сж}$ с 5000 до 3500 кПа отмечается при росте W с 15 до 35 %.

Общего для всех мерзлых грунтов и однозначного влияния параметра влажности на величину $\sigma_{сж}$ установить не удалось и для конкретных технологических условий необходимо определять соответствующую зависимость $\sigma_{сж}(W)$.

В работах [10-11] отмечается, что практически все мерзлые грунты обладают реологическими свойствами, причем наличие льда является основным связующим фактором.

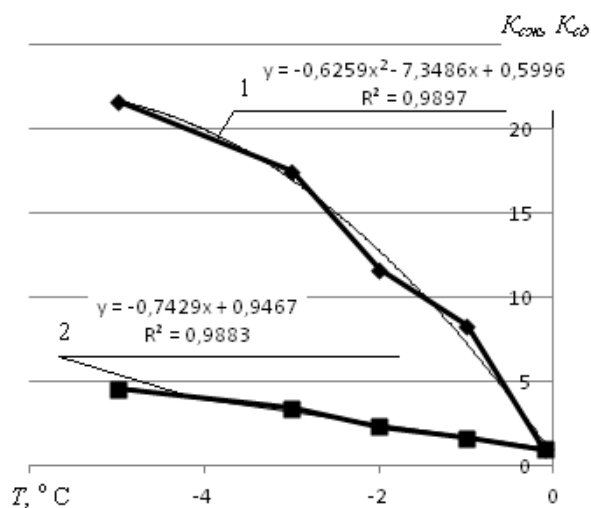


Рис. 4. Рост относительных показателей прочности на сжатие и сдвиг с понижением температуры мерзлого грунта:

1 – предел прочности на сдвиг; 2 – предел прочности на сжатие

Вследствие влияния реологии испытания прочностных и деформационных характеристик мерзлых грунтов – как лабораторные, так и полевые очень трудоемки и требуют значительного времени (каждое испытание длится от 1 до 4 недель). Наряду с этим данные о физико-механических свойствах даже одной группы мерзлых грунтов отличаются кратно, что затрудняет их практическое использование в расчетах начальных параметров контактного разрушения в зоне взаимодействия колеса и мерзлого почвогрунта.

Отмечается, что чем выше W тем более существенно влияние параметра T на характер реализации процесса разрушения, особенно при переходе T через температуру замерзания воды, перехода ее в состояние льда и, как следствие, повышения сцепления массива.

Лед по сравнению с другими кристаллическими телами отчетливо проявляет пластические свойства и под длительным воздействием нагрузки может изменять свою форму без изменения объема, т.е. «течь». Этому состоянию льда соответствует режим течения вязкой жидкости. При этом в случае воздействия на лед статической силы P он начинает деформироваться, при этом может вести себя как упругое, пластическое или в момент разрушения

хрупкое тело [12]. Характер поведения зависит от времени приложения нагрузки.

Действие движителя (первого штампа) можно считать мгновенным. При скорости движения системы, равной 2,5 км/ч и расстоянии между штампами 2 м интервал времени начала воздействия второго штампа не превысит 3 с. Однако лед, в течение не менее 100-1000 с, ведет себя как упругое тело, т.е. при воздействии трелевочной системы можно считать, что упругие деформации при разрушении льда будут доминировать.

Исследование замерзания воды в мерзлом грунте выявили четыре основные фазы протекания процесса: 1) понижение T по мере переохлаждения поровой воды; 2) повышение T вследствие кристаллизации части воды; 3) резкий переход большей части воды в лед и 4) постепенное понижение T уже мерзлого грунта, когда окончательно замерзает вся вода.

Количественно по фазам учесть влияние перечисленные 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 мерзлого грунта температура начала его замерзания T_z зависит от начальной температуры T_n , уровня засоленности (C , %), и влажности (W , %).

Если пренебречь процентной долей воды, находящейся в парообразном состоянии (тысячные доли процентов от общего объема), то схематично можно сказать, что вода в жидкой фазе содержится в почвогрунте в двух основных состояниях: связанном и свободном.

Связанная высокоплотная (до 1200-1400 кг/м³) 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 $T_g \approx -4 \div -6$ °C.

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

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

Таким образом, с позиций механики деформирования мерзлого почвогрунта определенной влажности, можно выделить три основных состояния присутствующей в нем воды в жидкой и твердой фазах:

1 – связанная высокоплотная до 1400 кг/м^3 с низкой (до -6 °С) температурой замерзания вода, включающая связанную и свободную капиллярную воды;

2 – свободная гравитационная вода с плотностью 1000 кг/м^3 , переходящая в лед при достижении любых отрицательных температур;

3 – лед.

В работе [13] отмечается, что все мерзлые грунты подразделяются на твердомерзлые и пластично-мерзлые грунты.

К первым относят практически несжимаемые грунты с коэффициентом сжимаемости $m_f < 0,01 \text{ МПа}^{-1}$, тогда как ко вторым – грунты с $m_f > 0,01 \text{ МПа}^{-1}$, при этом твердомерзлые должны рассчитываться только по несущей способности, тогда как пластично-мерзлые как по несущей способности, так и по деформациям.

Наряду с показателем сжимаемости для твердомерзлых грунтов принимается также состояние, когда $T < T_3$, для пластично-мерзлых – температура грунта T лежит в диапазоне: $T_3 < T < T_6$, где T_6 – температура замерзания воды, близкая к 0 °С.

В табл. 3 по данным [13] представлены значения T_3 для ряда мерзлых грунтов.

Как отмечалось выше, параметр T_3 зависит от влажности и засоленности мерзлого грунта.

Обработка опытных данных [13] для засоленного в разной степени суглинка (параметр C изменяется от $0,2$ до $1,1$ %) в диапазоне изменения влажности W от 20 до 50 % позволила построить графики функции $T_3 = f(C)$, представленные на рис. 5, где по оси абсцисс – C , %, ординат – отрицательные значения T_3 , °С в зависимости от значений W , %.

Как видно, при сильной засоленности и низкой влажности параметр T_3 попадает в диапазон значений $-2,5 \div -3$ тогда как в слабозасоленном со-

стоянии и высокой влажности мерзлого грунта температура его замерзания не опускается ниже значения $T_3 = -0,5$.

Таблица 3

Температура замерзания мерзлых грунтов

Наименование мерзлого грунта	Температура замерзания, °С
Пески мелкие и пылеватые	-0,3
Супесь	-0,6
Суглинок	-1,0
Глина	-1,5

Таким образом, для почвогрунта с заданной степенью засоленности его температура T – доминирующий фактор состояния, который будет изменяться с глубиной залегания слоя почвогрунта.

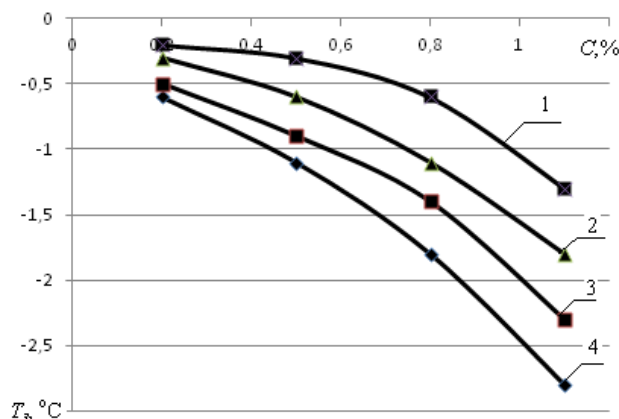


Рис. 5. Зависимость температуры замерзания от засоленности мерзлого грунта при его влажности: 1 – 20 %; 2 – 30 %; 3 – 40 %; 4 – 50 %

Прохождение трелевочной системы по мерзлому почвогрунту обуславливает циклическую реализацию статического воздействия на него штампов.

После первого прохода трелевочной системы (двух циклов статического воздействия штампов) колесо будет погружаться на определенную величину, зависящую от параметров трелевочной системы, физико-механических свойств и состояния мерзлого почвогрунта.

При этом под действием вертикальной статической нагрузки P часть свободной воды, переместившись на образованную глубину, где температура почвогрунта существенно ниже параметра T

на поверхности, перейдет в свою твердую фазу, т.е. лед. Связанная вода менее всего подвержена миграции и температура ее замерзания существенно ниже 0 °С. Описанный процесс с определенной степенью вероятности будет, по всей видимости, многократно повторяться для одного и того же пятна контакта.

Циклически воспроизводимые вероятностные процессы любой природы (физико-механической, финансово-экономической, социально-психологической и других) хорошо описываются аппаратом цепей Маркова, который развит в работах [14, 15].

Пусть начальное распределение в единице объема мерзлого грунта свободной, связанной воды и льда определяется соответствующими компонентами вектора $\vec{v}_0=(\omega_1, \omega_2, \omega_3)$, причем $\omega_1+\omega_2+\omega_3=1$.

Матрица Маркова переходных состояний применительно к поставленной задаче давления на грунт представляет собой квадратную размерностью 3x3 матрицу вероятностей P_c , на главной диагонали которой расположены вероятности p_{11}, p_{22}, p_{33} , отражающие факт количественного (в процентах) сохранения исходного состояния воды во всех трех своих фазах.

Другие элементы матрицы, а именно вероятности p_{ij} описывают вероятности переходов воды из i -го состояния в j -е и наоборот.

Тогда согласно теории Маркова умножение вектора \vec{v}_0 на матрицу P_c определяет вектор \vec{v}_1 - распределение состояний воды после первого цикла воздействия (прохода первой колесной пары трелевочной системы).

Пусть начальное состояние характеризуется вектором \vec{v}_0 , равным

$$\vec{v}_0=(0,3; 0,4; 0,3). \quad (5)$$

Допустим, что при использовании 10-колесной системы и давлении на грунт $q=35$ кПа при $T = -0,2$ °С матрица переходных состояний P_c имеет вид

$$P_c = \begin{pmatrix} 0,80 & 0,15 & 0,05 \\ 0,05 & 0,90 & 0,05 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

В частности, последняя строка матрицы P_c означает, что по мере погружения штампа в мерзлый почвогрунт лед не может переходить в жидкую

фазу, тогда как вероятность реализации обратного процесса, описываемая первыми двумя строками матрицы, будем считать малой, но отличной от нуля, допустим равной 5 % ($p_{13}=p_{23}=0,05$).

Тогда умножение вектора (5) на матрицу (6) дает вектор состояния воды и льда после первого цикла прохода, равный $\vec{v}_1=(0,26; 0,4; 0,34)$.

Умножение \vec{v}_1 на P_c дает вектор \vec{v}_2 состояний следующего цикла прохода и т.д.

На рис. 6 представлены графики изменения компонент ω_i по мере роста числа циклов N .

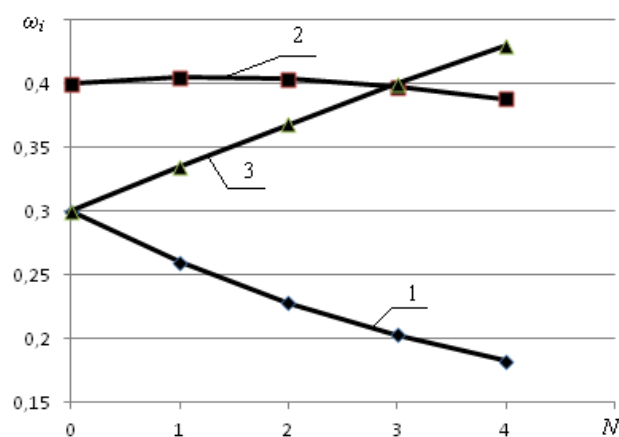


Рис. 6. Изменение состояний воды и льда с ростом циклов проходов 10-ти колесной трелевочной системы: 1 - ω_1 ; 2 - ω_2 ; 3 - ω_3

Как видно из рис. 6, количество связанной воды в единице объема мерзлого почвогрунта даже по завершении четвертого цикла (двух проходов трелевочной системы) практически не изменилось, при этом весьма значительный объем свободной воды при $T < 0$ °С может перейти в лед, что, принимая во внимание существенно различные деформационные характеристики воды и льда, скажется на процессе деформирования и разрушения почвогрунта.

Деформационные свойства воды и льда существенно различаются. Так величина E для свободной воды составляет 2030 МПа, для высокоплотной связанной $E \approx 2840$ МПа, тогда как для льда $E = 9000$ МПа. Это позволяет при исходном значении вектора состояния влаги \vec{v}_0 оценить величину E как средневзвешенную, равную $E_0 = 4445$ МПа.

После реализации первого цикла, в связи с увеличением объемной доли льда, модуль общей

деформации увеличился на 5,6 % и составил $E_0=4694$ МПа.

На рис. 7 представлены графики изменения коэффициента увеличения модуля E для воды и почвогрунта в зависимости от количества циклов N .

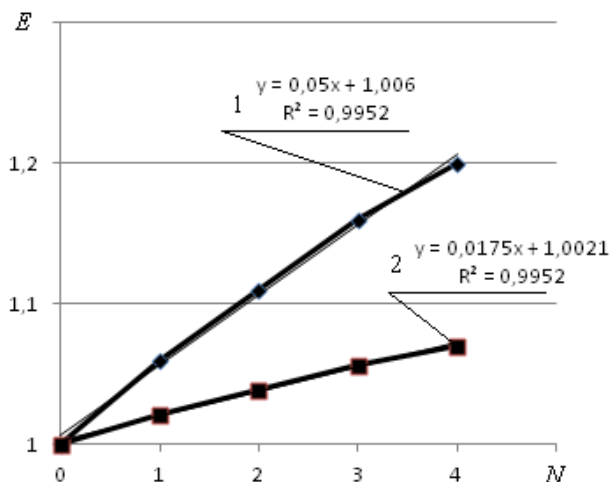


Рис. 7. Увеличение модуля упругости воды и грунта по мере роста числа проходов 10-колесной трелевочной системы: 1 – вода; 2 - почвогрунт

После четвертого цикла (двух проходов системы) при $N=4$ модуль достиг значения $E_0=5341$ МПа, т.е. вырос более чем на 20 %. Если принять, что влажность W мерзлого почвогрунта умеренная и составляет 35 %, то рост общего модуля деформации почвогрунта E за счет роста объемного содержания льда составит 7 %. Поскольку параметр ε обратно пропорционален параметру E , естественно заключить что общая относительная деформация мерзлого почвогрунта снизится на 7 %.

Выполним аналогичные оценки при использовании 4-колесной системы и давлении на грунт $q=68$ кПа.

Если допустить, что при таких нагрузках пропорционально росту давления усиливается процесс перехода воды из жидкой фазы в лед и в матрице переходных состояний $p_{13}=p_{23}=0,1$, то результаты расчетов показывают, что увеличение общего модуля E за счет роста объемного содержания льда составит 13 %, т.е. увеличится в 1,85 раз, что обуславливает соответствующее снижение величины общей деформации ε .

Однако, с другой стороны, учитывая зависимость (2), при увеличении q с 35 до 68 кПа, общая относительная деформация ε увеличится в 1,94 раза и в итоге суммарный рост ε не превысит 5 %.

Этот вывод дополнительно подчеркивает целесообразность оптимизации параметров воздействия штапов трелевочной системы на мерзлый почвогрунт с целью увеличения числа проходов и выполнения природоохранных требований.

Разработанные методические положения легли в основу пробных расчетов по выявлению адекватности математической модели технологическим условиям эксплуатации трелевочных систем при их циклическом воздействии на мерзлый почвогрунт. Данные модели, во многом основаны на походах и результатах ранее выполненных работ [16-20].

На данном этапе исследований за рамками расчетов остались процессы разрушения почвогрунта, формирования первичного ядра и дополнительного уплотнения в его пределах сжимаемого слоя. Эти факторы будут определять увеличение величины \bar{p} по мере углубления колеи и погружения колеса в почвогрунт, особенно при высоких значениях влажности и давления штапов. С увеличением глубины колеи необходимо также учитывать понижение температуры T почвогрунта, рост модуля E и соответствующее снижение общих деформаций. Рост льдистости с глубиной будет способствовать повышению пластичности деформируемого почвогрунта.

Следовательно, выполненные расчеты необходимо принимать как нижнюю границу области возможных значений уплотнения мерзлых почвогрунтов.

На рис. 8 приведены графические зависимости \bar{p} от N для талого (а) и мерзлого (б) суглинка при прохождении соответственно 10-колесного и 4-колесного форвардеров.

На рис. 8, а: кривая 1 соответствует сухому почвогрунту с $W=0,15$ и $q=35$ кПа, кривая 2 – влажному с $W=0,5$ и $q=35$ кПа, кривая 3 - $W=0,5$ и $q=27$ кПа (использование гусениц).

На рис. 8, б при $q=68$ кПа: кривая 4 соответствует сухому почвогрунту с $W=0,15$, кривая 5 – влажному с $W=0,5$.

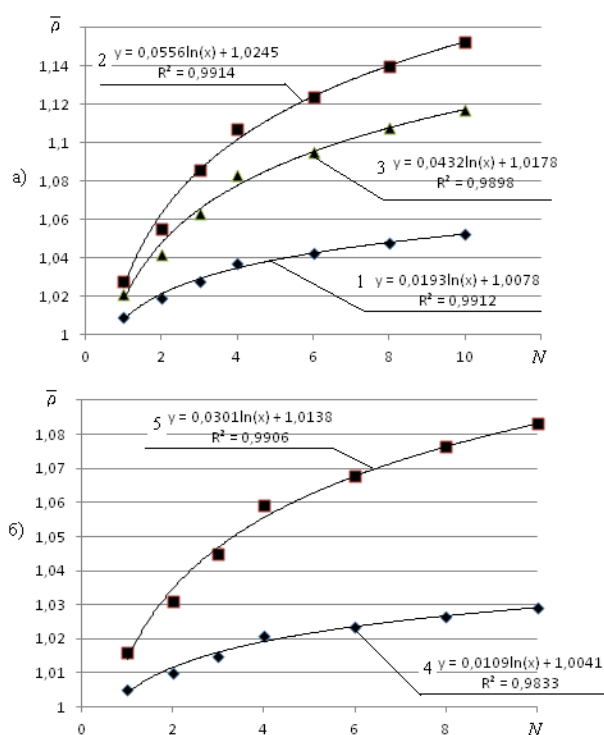


Рис. 8. Зависимость величины относительного уплотнения от количества циклов воздействия штампов на грунт:

а) талый суглинок; б) мерзлый суглинок

1 - сухой почвогрунт, $W=0,15$, $q=35$ кПа;

2 – влажный почвогрунт, $W=0,5$, $q=35$ кПа;

3 - влажный почвогрунт, $W=0,5$ и $q=27$ кПа

(использование гусениц); 4 - сухой почвогрунт,

$W=0,15$; 5 – влажный почвогрунт, $W=0,5$

Представленные данные позволяют количественно оценить эффект от применения различных систем в конкретных климатических и технологических условиях.

Таким образом, результаты выполненных исследований и произведенные оценки влияния параметров трелевочной системы, температуры, влажности, льдистости, физико-механических свойств и состояния мерзлого почвогрунта на процесс его деформирования можно принять в качестве исходных требований при моделировании и оптимизации процесса циклического уплотнения почвогрунта.

Библиографический список

1. G. Sparchez, R. Derczeni, E. Iordache, V. Drosos. 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 . Vol. 2 (51) .2009.P.35-44

2. S. Ticu, V. Alexandru. 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 . Vol. 5 (54) No. 1 .2012.P.115-122

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

4. Исследование механических процессов циклического уплотнения почвогрунта при динамических нагрузках / В. Я. Шапиро, И. В. Григорьев, А. И. Жукова, В. А. Иванов // Вестник КрасГАУ. – 2008. – № 1. – С. 163-175.

5. Котляренко, В. И. Основные направления повышения проходимости колесных машин / В. И. Котляренко - М., 2008 – 285 с.

6. Григорьев, И. В. Совершенствование конструкции активного полуприцепа форвардера на базе сельскохозяйственного колесного трактора / И. В. Григорьев, А. А. Чураков // Транспортные и транспортно-технологические системы: Матер. Междунар. науч.-техн. конференции ; отв. ред. Н. С. Захаров. – 2018.– С. 84-88.
7. Агейкин, Я. С. Вездеходные колесные и комбинированные движители / Я. С. Агейкин. - М. : Машиностроение, 1972. – 184 с.
8. Велли, Ю. Я. Здания и сооружения на крайнем Севере / Ю. Я. Велли, В. В. Докучаев, Н. Ф. Федоров. - Л. : Госстройиздат. 1963. – 492 с.
9. Цытович, Н. А. Механика мерзлых грунтов / Н. А. Цытович. - М. : Высш. шк., 1983. – 288 с.
10. Вялов, С. С. Реология мерзлых грунтов / С. С. Вялов. – М. : Стройиздат, 2000. – 464 с.
11. Иоспа, А. В. Комплексные исследования свойств мерзлых грунтов при изысканиях крупных инфраструктурных проектов / А. В. Иоспа // Технологии проектирования и строительства фундаментов на вечномерзлых грунтах : матер. Междунар. науч.-техн. конференции. – М., 2014. – С. 4-8.
12. Ледовые строительные площадки, дороги и переправы / Н. Н. Бычковский, Ю. А. Гурьянов ; под общ. ред. Н. Н. Бычковского. – Саратов, 2005. – 260 с.
13. Роман, Л. Т. Модуль деформации мерзлых грунтов при компрессионных испытаниях / Л. Т. Роман, П. И. Котов, М. Н. Царапов // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2016. – № 5. – С. 35-40.
14. Шапиро, В. Я. Использование цепей Маркова для прогноза эффективности ПИФов [Текст] / В. Я. Шапиро, Н. А. Шапиро // В сб.: Экономическое развитие: теория и практика: Матер. междунар. науч. конференции. – 2007. – С. 79-81.
15. Шапиро, В. Я. Моделирование портфельных инвестиций в условиях негативных сценариев развития фондового рынка / В. Я. Шапиро, Н. А. Шапиро // Финансы и кредит. – 2008. – № 15 (303). – С. 39-51.
16. Математическое моделирование процесса уплотнения мерзлого почвогрунта под воздействием лесных машин и трелевочных систем / С. Е. Рудов [и др.] // Системы. Методы. Технологии. – 2018. – № 3 (39). – С. 73-78.
17. Ivanov V.A. et al. Environment-friendly logging in the context of water logged soil and knob-and-ridge terrain // Journal of Mechanical Engineering Research and Developments. 2018. Т. 41. № 2. С. 22-27. (вклад по авторам из ЯГСХА 0,5)
18. Manukovsky A.Y. et al. Increasing the logging road efficiency by reducing the intensity of rutting: mathematical modeling // Journal of Mechanical Engineering Research and Developments. 2018. Т. 41. № 2. P. 35-41.
19. Zhuk A.Yu. et al. Modelling of indenter pressed into heterogeneous soil // Journal of Engineering and Applied Sciences. 2018. Т. 13. № S8. P. 6419-6430.
20. Grigorev M. et al. Experimental findings in forest soil mechanics // Eurasian Journal of Biosciences. – 2018. – Volume 12, Issue 2. – P. 277-287.

References

1. G. Sparchez, R. Derczeni, E. Iordache, V. Drosos. 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. Vol. 2 (51). 2009. P. 35-44.
2. S. Ticu, V. Alexandru. 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. Vol. 5 (54). No. 1. 2012. P. 115-122.
3. SHapiro V. YA., Grigor'ev I. V. Deformaciya i ciklichesкое uplotnenie pochvogrunta mezhdu gruntozacepami krupnogabaritnyh lesnyh shin // Tekhnika i tekhnologiya. 2006. № 2. S. 94-100.

4. Shapiro V. YA., Grigor'ev I. V., Zhukova A. I., Ivanov V. A. Issledovanie mekhanicheskikh processov ciklicheskogo uplotneniya pochvogrunta pri dinamicheskikh nagruzkah // Vestnik KrasGAU. 2008. № 1. S. 163-175.
5. Kotlyarenko V. I. Osnovnye napravleniya povysheniya prohodimosti kolesnykh mashin. M. MGIU, 2008. 285 s.
6. Grigor'ev I. V., Churakov A. A. Sovershenstvovanie konstrukcii aktivnogo polupricepa forvardera na baze sel'skohozyajstvennogo kolesnogo traktora // Transportnye i transportno-tekhnologicheskie sistemy: Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii. Otv. red. N. S. Zaharov. 2018. S. 84-88.
7. Agejkin YA. S. Vezdekhodnye kolesnye i kombinirovannye dvizhiteli. M.: Mashinostroenie. 1972. 184 s.
8. Velli, YU. YA., Dokuchaev V. V., Fedorov N. F. Zdaniya i sooruzheniya na krajnem Severe. L.: Gosstrojizdat. 1963. 492 s.
9. Cytovich N. A. Mekhanika merzlykh gruntov. M., «Vysshaya shkola». 1983. 288 s.
10. Vyalov S. S. Reologiya merzlykh gruntov. M.: Strojizdat. 2000. 464 s.
11. Iospa A. V. Kompleksnye issledovaniya svojstv merzlykh gruntov pri izyskaniyah krupnykh infrastrukturnykh proektov // Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii «Tekhnologii proektirovaniya i stroitel'stva fundamentov na vechnomerzlykh gruntah» M. 16-17 oktyabrya 2014. S. 4-8.
12. Bychkovskij N. N., Gur'yanov YU. A. Ledovye stroitel'nye ploshchadki, dorogi i perepravy / Pod obshchej redakciej N.N Bychkovskogo. Saratov. 2005. 260 s.
13. Roman L. T., Kotov P.I., Carapov M.N. Modul' deformacii merzlykh gruntov pri kompressionnykh ispytaniyah // Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov. 2016. № 5. S. 35-40.
14. Shapiro V. YA. Ispol'zovanie cepej Markova dlya prognoza ehffektivnosti PIFov / V. YA. Shapiro, N. A. Shapiro // EHkonomicheskoe razvitiye: teoriya i praktika: Materialy mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii. Predsedatel' redakcionnogo soveta Bojko I.P. 2007. S. 79-81.
15. Shapiro V. YA., SHapiro N. A. Modelirovanie portfel'nykh investicij v usloviyah negativnykh scenariyev razvitiya fondovogo rynka // Finansy i kredit. 2008. №15(303). S. 39-51.
16. Rudov S. E. et al. Matematicheskoe modelirovanie processa uplotneniya merzlogo pochvogrunta pod vozdejstviem lesnykh mashin i trelevochnykh sistem // Sistemy. Metody. Tekhnologii. 2018. № 3 (39). S. 73-78.
17. Ivanov V.A. et al. Environment-friendly logging in the context of water logged soil and knob-and-ridge terrain // Journal of Mechanical Engineering Research and Developments. 2018. T. 41. № 2. S. 22-27. (vklad po avtoram iz YAGSKHA 0,5)
18. Manukovsky A. Y. et al. Increasing the logging road efficiency by reducing the intensity of rutting: mathematical modeling // Journal of Mechanical Engineering Research and Developments. 2018. T. 41. № 2. R. 35-41.
19. Zhuk A. Yu. et al. Modelling of indenter pressed into heterogeneous soil // Journal of Engineering and Applied Sciences. 2018. T. 13. № S8. R. 6419-6430.
20. Grigorev M. et al. Experimental findings in forest soil mechanics // Eurasian Journal of Biosciences, 2018. Volume 12, Issue 2, pp. 277-287.

Сведения об авторах

Рудов Сергей Евгеньевич – старший преподаватель кафедры № 3 ФГБОУ ВО «Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: 89213093250@mail.ru.

Шапиро Владимир Яковлевич – профессор кафедры Высшей математики ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: shapiro54vlad@mail.ru.

Григорьев Игорь Владиславович – профессор кафедры «Технология и оборудование лесного комплекса» ФГБОУ ВО «Якутская государственная сельскохозяйственная академия», г. Якутск, Российская Федерация; e-mail: silver73@inbox.ru.

Куницкая Ольга Анатольевна - профессор кафедры «Технология и оборудование лесного комплекса» ФГБОУ ВО «Якутская государственная сельскохозяйственная академия», г. Якутск, Российская Федерация; e-mail: ola.ola07@mail.ru.

Григорьев Михаил Федосеевич – старший преподаватель кафедры «Технология и оборудование лесного комплекса» ФГБОУ ВО «Якутская государственная сельскохозяйственная академия», г. Якутск, Российская Федерация; e-mail: grig_mf@mail.ru.

Пучнин Александр Николаевич – старший преподаватель кафедры Землеустройства и ландшафтной архитектуры ФГБОУ ВО «Якутская государственная сельскохозяйственная академия», г. Якутск, Российская Федерация; e-mail: ntobumdrevprom@mail.ru.

Information about the authors

Rudov Sergey Evgen'evich – senior lecturer of the Department No. 3 FGWO IN the "Military Academy of communications named after Marshal of the Soviet Union S. M. Budyonny", Saint-Petersburg, Russian Federation, e-mail: 89213093250@mail.ru.

Shapiro Vladimir Yakovlevich-Professor of the Department of Higher mathematics, St. Petersburg state forest engineering University named after S. M. Kirov, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: shapiro54vlad@mail.ru.

Igor Grigoriev Vladislavovich-Professor of the Department "technology and equipment of the forest complex" fgbou VO "Yakutsk state agricultural Academy", Yakutsk, Russian Federation, e-mail: silver73@inbox.ru.

Kunitskaya Olga Anatolievna - Professor of the Department "technology and equipment of the forest complex" fgbou VO "Yakutsk state agricultural Academy", Yakutsk, Russian Federation, e-mail: ola.ola07@mail.ru.

Grigoriev Mikhail Fedoseevich-senior lecturer of the Department "technology and equipment of the forest complex" fgbou VO "Yakutsk state agricultural Academy", Yakutsk, Russian Federation, e-mail: grig_mf@mail.ru.

Putnin Alexander Nikolaevich – senior lecturer of the Department of Land management and landscape architecture of the "Yakut state agricultural Academy", Yakutsk, Russian Federation, e-mail: ntobumdrevprom@mail.ru.

DOI: 10.12737/article_5c92016fc37239.43354129

УДК 630*323.12

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПИЛЕНИЯ ДРЕВЕСИНЫ БЕНЗИНОМОТОРНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

аспирант **И.Н. Троянов**¹

кандидат технических наук, доцент **В.В. Абрамов**¹

кандидат технических наук, доцент **Л.Д. Бухтояров**¹

кандидат технических наук, доцент **А.С. Черных**¹

доктор технических наук, профессор **Д.Н. Афоничев**²

1 – ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация

2 – ФГБОУ ВО ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», г. Воронеж, Российская Федерация

Целью исследований представленных в статье является разработка математической модели процесса поперечного пиления древесины при срезании дерева цепным пильным аппаратом для оценки удельных энергозатрат, а также создание на ее основе программного обеспечения для научно-обоснованного выбора оптимального комплекта бензино-моторного инструмента в индивидуальных лесозэксплуатационных условиях разрабатываемых лесосек. Предлагаемая методика расчета удельных энергозатрат процесса поперечного пиления древесины является дополнением теории резания для случая веерной подачи цепного режущего органа при выполнении обрабатываемых операций лесосечных ра-