

Обоснование исходных требований математической модели взаимодействия колесных транспортных средств на пневматиках низкого давления с лесными почвогрунтами

О.Н. Бурмистрова^{1a}, Е.В. Тетеревлева^{1b}, С.Е. Рудов^{2c}, И.В. Григорьев^{3d}, О.А. Куницкая^{3e}

¹ Ухтинский государственный технический университет, ул. Первомайская, 13, Ухта, Республика Коми

² Военная академия связи им. С.М. Буденного, Тихорецкий пр., 3, Санкт-Петербург, Россия

³ Якутская государственная сельскохозяйственная академия,

Сергеляхское шоссе, 3, Якутск, Республика Саха (Якутия)

^a oburmistrova19@gmail.com, ^b teterevleva.elena.v@mail.ru, ^c 89213093250@mail.ru,

^d silver73@inbox.ru, ^e ola.ola07@mail.ru

^a <https://orcid.org/0000-0003-2616-7557>, ^b <https://orcid.org/0000-0003-3272-5308>,

^c <https://orcid.org/0000-0002-9900-0929>, ^d <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>,

^e <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>

Статья поступила 30.04.2020, принята 18.05.2020

Колесные вездеходы, в том числе на шинах сверхнизкого давления, активно используются на землях лесного фонда. Они очень популярны у туристов, рыбаков и охотников, могут широко применяться для выполнения различных лесохозяйственных мероприятий, в том числе противопожарного патрулирования и патрулирования для предотвращения браконьерства, доставки небольших грузов, сбора пищевых и лекарственных растений (лесопродукционного производства) и других задач. Данный вид техники производится многими отечественными и зарубежными машиностроительными компаниями, и эта продукция имеет устойчивый, постоянно растущий спрос. Рекреационное пользование лесом, экстремальный туризм на землях лесного фонда в большой части случаев связаны с использованием колесных вездеходов, в том числе на шинах сверхнизкого давления. Как показывают исследования отечественных и зарубежных ученых, колесные вездеходы могут наносить лесной среде значительный ущерб, в основном связанный с негативным воздействием на лесные почвы. Результатом данного негативного воздействия могут быть замедление лесовосстановительных процессов, водная и ветровая эрозия на переуплотненных трассах движения, уничтожение живого напочвенного покрова, угнетение корней, замедление роста и ослабление деревьев вблизи трасс движения. В последние годы подготовлены и защищены более десяти научных работ, посвященных вопросу снижения негативного воздействия колесных и гусеничных лесных машин на почвы лесосек. Вместе с тем, ряд вопросов нуждается в дальнейшей проработке. Прежде всего, конструкция самих колесных вездеходов и их движителей отличается от традиционных лесных колесных тракторов, являющихся базой для различных лесных машин. Колесные вездеходы используются не для заготовки древесины, поэтому работают в других режимах, а часто и условиях эксплуатации. Это обуславливает несколько отличную картину их воздействия на лесные почвы. Полученные в статье результаты позволяют обосновать направления разработки математической модели, способной учесть особенности взаимодействия колесных транспортных средств на пневматиках низкого давления с лесными почвогрунтами.

Ключевые слова: лесные почвогрунты; колесные вездеходы; уплотнение и деформация почвогрунтов.

Justification of the initial requirements of a mathematical model of the interaction of wheeled vehicles on low pressure pneumatics with forest soils

O.N. Burmistrova^{1a}, E.V. Teterevleva^{1b}, S.E. Rudov^{2c}, I.V. Grigorjev^{3d}, O.A. Kunitskaya^{3e}

¹ Ukhta State Technical University; 13, Pervomayskaya St., Ukhta, Republic of Коми

² Military Academy of Communication under name of S.M. Budenny; 3, Tikhoretsky Ave., St. Petersburg, Russia

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

^a oburmistrova19@gmail.com, ^b teterevleva.elena.v@mail.ru, ^c 89213093250@mail.ru,

^d silver73@inbox.ru, ^e ola.ola07@mail.ru

^a <https://orcid.org/0000-0003-2616-7557>, ^b <https://orcid.org/0000-0003-3272-5308>,

^c <https://orcid.org/0000-0002-9900-0929>, ^d <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>,

^e <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>

Received 30.04.2020, accepted 18.05.2020

Wheeled all-terrain vehicles, including ultra-low-pressure tires, are actively used on the lands of the forest background. They are very popular among tourists, fishermen and hunters, and can be widely used for various forestry activities, including fire patrol, and

patrol for the prevention of poaching, delivery of small goods, collection of food and medicinal plants (forest products), and many other tasks. This type of equipment is produced by many domestic and foreign engineering companies, and their products have a steady, constantly growing demand. Recreational use of the forest and an extreme tourism on the lands of the forest fund, in most cases are connected with the use of wheeled all-terrain vehicles, including on ultra-low pressure tires. As shown by the research of domestic and foreign scientists, wheeled all-terrain vehicles can cause significant damage to the forest environment, mainly due to the negative impact on forest soils. The result of this negative impact may be a slowdown in reforestation processes, water and wind erosion on over-compacted routes, destruction of living ground cover, root oppression, slowing growth, weakening of trees near the traffic routes. In recent years, more than ten scientific papers on the issue of reducing the negative impact of wheeled and caterpillar forest machines on the soils of the cutting area have been prepared and defended. However, a number of issues need further elaboration. First of all, the design of the wheeled all-terrain vehicles themselves and their engines differs from traditional forest wheeled tractors, which are the basis for various forest vehicles. Wheeled all-terrain vehicles are not used for harvesting wood, so they work in other modes, and often in operating conditions. This leads to a somewhat different picture of their impact on forest soils. The results obtained in the article allow justifying the development of a mathematical model that makes it possible to take into account the impact of wheeled vehicles on low-pressure pneumatics with forest soils.

Keywords: forest soils; wheeled all-terrain vehicles; soil compaction; soil deformation.

Введение. Колесные вездеходы, оснащенные двигателями сверхнизкого давления, являются перспективной базой для транспортно-технологических машин различного назначения для лесного хозяйства и лесозаготовок.

Экологическая безопасность вездеходной техники определяется несколькими показателями, такими как глубина колеи, повреждаемость почвогрунта, вызванная возможным буксованием машины, уплотнение почвогрунта. Для оценки отмеченных показателей необходимы адекватные математические модели взаимодействия двигателя вездехода с почвогрунтом, учитывающие как его параметры, так и свойства опорной поверхности.

Универсальные математические модели взаимодействия колесного двигателя с грунтом строятся на положениях теории движения автотранспорта в условиях бездорожья. Данный подход апробирован в науке о лесозаготовительном производстве и успешно используется современными исследователями.

Цель работы: обосновать направления разработки математической модели взаимодействия двигателя колесного вездехода с лесным почвогрунтом, позволяющей обосновывать средообразующие параметры двигателей колесных вездеходов, исходя из требования минимизации негативного воздействия на лесные почвы.

Материалы и методы исследования. Используются справочные данные о физико-механических свойствах лесных почвогрунтов. Выполнен анализ математических моделей предшественников.

Результаты исследования. Лесной почвогрунт представляет собой многокомпонентную систему, состоящую из мягкого плодородного слоя, почвы — смеси органического вещества с минеральными частицами, и подстиляющего слоя (либо слоев) неорганического грунта [1], причем граница слоев может быть размыта, слои могут быть перемешаны [1]. В ряде случаев лесозаготовительная техника работает на слабонесущих задернованных поверхностях, верхний (дерновый) слой которых прочнее подстиляющего слоя [2].

По таким же почвогрунтам в условиях лесного фонда могут перемещаться и колесные вездеходы на пневматиках низкого и сверхнизкого давления. В этом плане условия работы лесных машин и вездеходов во многом схожи.

Неорганические грунты классифицируют по гранулометрическому составу. В зависимости от процентного содержания глинистых частиц выделяют несвязные (пески) и связные грунты (табл. 1) [3].

Таблица 1. Классификация грунтов в зависимости от гранулометрического состава и свойств твердых частиц

Грунт	Содержание глинистых частиц, %	Число пластичности
Легкий суглинистый	3–12	0–7
Суглинистый	12–18	7–10
Тяжелый суглинистый	18–25	10–15
Глинистый	> 25	> 15

Источник: [3].

Физические свойства грунта, такие как влажность и плотность, пористость, а также содержание глинистых частиц определяют его механические свойства, используемые как характеристики сопротивления грунта внешнему воздействию [3; 4; 11–15].

В табл. 2 представлены сведения о толщине дернового покрова, удельном сопротивлении срезу и модуле деформации E дернового покрова заболоченных грунтовых поверхностей [4]. Сведения о пределах варьирования угла внутреннего трения φ , удельного сцепления C и модуля деформации E заболоченных грунтов представлены в табл. 3 [2; 4]. Значения угла внутреннего трения φ , удельного сцепления C , модуля деформации E , коэффициента Пуассона ν , плотности ρ и толщины деформируемого слоя H для различных категорий лесного почвогрунта представлены в табл. 4 [1; 5].

Представленные данные должны учитываться при разработке и реализации теоретической модели взаимодействия колесного двигателя сверхнизкого давления с опорной поверхностью.

Универсальные математические модели взаимодействия колесного двигателя с грунтом строятся на положениях теории движения автотранспорта в условиях бездорожья [5]. Для вывода уравнения осадки опорной поверхности под воздействием двигателя пользуются схемой, представленной на рис. 1.

Таблица 2. Свойства дернового покрова слабонесущих опорных поверхностей

Характеристика дернового покрова	Толщина дернового покрова, см	Удельное сопротивление грунта срезу, кПа	Модуль деформации, кПа
Сфагновые мхи: без кустарника с кустарником	33,5–38,5 35–36	25–28 35–42	260–290 360–430
Гипновые мхи: без кустарника с кустарником	27–28 27	18–21 28–34	186–215 290–340
Осоковый с развитыми осоковыми кочками	35–42	103–145	1 050–1 580
С межкочечными понижениями	10–11	14–24	143–244
Березово-лесной в межкочечных понижениях	5–5,5	14–60	86–143
Сфагновый торф (степень разложения 35–40 %, влажность 180 %)	–	54	544
Гипново-осоково-лесной	38–42	63–100	650–1430
Осоково-лесной торф	–	67	670

Источники: [4; 5].

Таблица 3. Свойства заболоченных грунтов

Вид болота	Характеристика дернового покрова	φ , °	C , кПа	E , МПа
Моховое	Преобладают сфагновые мхи без кустарника	12–14	5–8	0,26–0,29
	Преобладают сфагновые мхи с кустарником	13–16	10–17	0,36–0,43
	Преобладают гипновые мхи с кустарником	11–15	8–14	0,29–0,34
Травяное	Осоковый покров с развитыми осоковыми кочками	18–20	26–45	1,05–1,58
	Осоковый покров с межкочечными понижениями	3–8	4–14	0,14–0,24
Лесное	Березово-лесной в межкочечных понижениях	5–7	4–10	0,09–0,14
Осушенное	Гипново-осоково-лесной	16–20	30–50	0,65–1,4

Источники: [2; 5].

Таблица 4. Классификация лесных почвогрунтов по механическим свойствам

Параметры	Категории почвогрунта		
	Слабый (III категория)	Средней прочности (II категория)	Прочный (I категория)
E , МПа	0,4	1	3
n	0,35	0,25	0,15
C , кПа	5	12	24
φ , град	11	15	16
c , кг/м ³	750	850	950
H , м	0,8	0,4	0,3

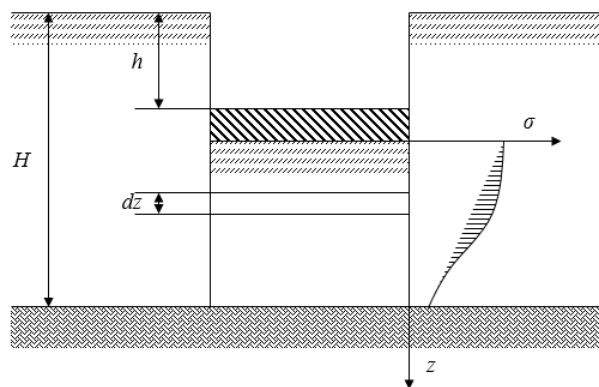
Источники: [1; 5].

В науке о лесозаготовительном производстве такой подход широко распространен и использовался, например, в работах [6], причем к настоящему времени разработаны методы расчета показателей взаимодействия движителей с неоднородными опорными поверхностями [7]. Отдельное направление исследований представляет собой изучение взаимодействия движителей с мерзлыми грунтами и снегом [8].

Функция распределения сжимающего напряжения по глубине деформируемого грунта принимается с учетом затухания напряжения и геометрических свойств пятна контакта [5]:

$$\sigma = \frac{Jp}{1 + (Az)^2}, \quad (1)$$

где J — коэффициент, учитывающий форму и геометрию пятна контакта; A — коэффициент, учитывающий толщину деформируемого слоя грунта.

**Рис. 1.** Схема к расчету осадки опорной поверхности под воздействием движителя. Источник: [5].

Коэффициенты J , A рассчитывают по формулам [5]:

$$J = \frac{0,03 + l/b}{0,6 + 0,43l/b}, \quad (2)$$

$$A = \frac{1}{0,64 \cdot b \cdot (1 + b/H)}, \quad (3)$$

где l — длина пятна контакта; b — ширина пятна контакта.

При исследовании взаимодействия гусеничных движителей с почвогрунтом длину пятна контакта определяют исходя из длины горизонтальной проекции гусеницы на грунт. В этом случае длина пятна контакта

условно не зависит от деформации почвогрунта и принимается как входной параметр. Для колесного движителя длину пятна контакта следует определять расчетным путем, причем — с учетом радиальной деформации движителя h_z и грунта h [5]:

$$l_1 = 2\sqrt{dh_z - h_z^2}, \quad (4)$$

$$l_2 = \sqrt{d \cdot (h_z + h) - (h_z - h)^2}, \quad (5)$$

$$l = l_1 + l_2 = 2\sqrt{dh_z - h_z^2} + \sqrt{d \cdot (h_z + h) - (h_z - h)^2}, \quad (6)$$

где d — диаметр колеса.

Радиальная деформация колесного движителя определяется его конструкцией и жесткостью, зависящей от рабочего внутреннего давления, а также механическими свойствами опорной поверхности (при прочих равных условиях на прочных почвогрунтах радиальная деформация колеса выше, чем на слабонесущих) [5].

От соотношения длины и ширины пятна контакта зависит значение повышающего коэффициента J в формуле (1). Кроме того, давление движителя на грунт p , используемое в той же формуле, определяется как частное нагрузки на единичный движитель G_w и площади пятна контакта [5]:

$$p = \frac{G_w}{bl}. \quad (7)$$

С использованием уравнения нормального напряжения (1) определяют сжатие элементарного слоя почвогрунта под воздействием движителя [5]:

$$dh^* = \frac{\sigma}{E - \sigma} dz, \quad (8)$$

как следствие, общая деформация сжатия деформируемого слоя почвогрунта определяется путем интегрирования [5]:

$$h^* = \int_{z_1}^{z_2} \frac{\sigma}{E - \sigma} dz, \quad (9)$$

где z_1, z_2 — вертикальные координаты зоны распространения сжимающего нормального напряжения.

Фактическую осадку почвогрунта определяют с учетом воздействия сдвиговых напряжений, вызывающих увеличение глубины образующейся колеи. Влияние сдвиговых деформаций на фактическую осадку учитывают при помощи коэффициента потери несущей способности [5]:

$$h = k_p h^*, \quad (10)$$

где k_p — коэффициент учета потери несущей способности [5]:

$$k_p = \frac{p_s}{p_s - p}, \quad (11)$$

где p_s — несущая способность почвогрунта.

Интегрирование уравнения (9) приводит к получению формулы [5]:

$$h = \frac{Jp \arctg\left(\frac{AEz}{\sqrt{(p_s - Jp) \cdot E}}\right) \Big|_{z=z_1}^{z=z_2}}{A\sqrt{(p_s - Jp) \cdot E}}. \quad (12)$$

Согласно схеме на рис. 1, пределы интегрирования z_2 и z_1 равны соответственно $H - h$ и 0, следовательно [5]:

$$h = \frac{Jp \arctg\left(\frac{AE(H-h)}{\sqrt{(p_s - Jp) \cdot E}}\right)}{A\sqrt{(p_s - Jp) \cdot E}}. \quad (13)$$

Несущую способность почвогрунта определяют по формуле [5]:

$$p_s = \frac{\pi}{2} p_{s0} \alpha \arctg \frac{\pi \cdot (H-h)}{2b}, \quad (14)$$

где p_{s0} — несущая способность слоя почвогрунта неограниченной толщины; α — коэффициент, учитывающий ограниченную толщину деформируемого слоя почвогрунта.

Коэффициент α рассчитывают по уравнению [5]:

$$\alpha = \frac{\pi}{2} \arctg \frac{\pi \cdot (H-h)}{2b}. \quad (15)$$

Несущая способность слоя почвогрунта неограниченной толщины зависит не только от его физико-механических свойств, но и от параметров пятна контакта, что учитывается специальными поправочными коэффициентами [5]:

$$p_{s0} = K_{\beta 1} I_1 X_1 b + K_{\beta 2} I_2 X_2 + X_3 h, \quad (16)$$

где X_1, X_2, X_3 — коэффициенты учета влияния физико-механических свойств грунта; I_1, I_2 — коэффициенты учета геометрических параметров пятна контакта; $K_{\beta 1}, K_{\beta 2}$ — коэффициенты учета угла приложения нагрузки.

Расчет коэффициентов I_1, I_2 проводят по формулам [5]:

$$I_1 = \frac{l}{l + 0,4b}, \quad (17)$$

$$I_2 = \frac{l + b}{l + 0,5b}. \quad (18)$$

В уравнениях (17), (18) вновь используется значение длины пятна контакта. Следовательно, жесткость колесного движителя оказывает влияние не только на нормальное давление на опорную поверхность и распространение сжимающих напряжений по глубине деформируемого грунта, но и на несущую способность почвогрунта под воздействием движителя.

Для расчета коэффициентов $K_{\beta 1}, K_{\beta 2}$ получены уравнения [5; 9; 10]:

$$K_{\beta 1} = \frac{\pi - 4\beta \operatorname{tg} \varphi}{\pi + 4\beta \operatorname{tg} \varphi}, \quad (19)$$

$$K_{\beta 2} = \frac{3\pi - 2\beta}{3\pi + 2\beta}, \quad (20)$$

где β — отклонение угла приложения результирующей нагрузки от нормали к опорной поверхности [5]:

$$\beta = \arccos \frac{p}{\sqrt{p^2 + \tau^2}}, \quad (21)$$

где τ — касательное напряжение.

Для учета времени воздействия движителя на грунт, связанного с числом проходов машины по трассе и ее

скоростью, используют поправочный коэффициент динамичности к давлению движителя на грунт [5]:

$$p = p_0 k_d, \quad (22)$$

где p_0 — давление движителя на опорную поверхность в статике; k_d — коэффициент динамичности, учитывающий время действия нагрузки.

Коэффициент динамичности рассчитывается с учетом принятой реологической модели грунта, в качестве которой чаще всего используется модель Кельвина – Фойгта [5]:

$$k_d \approx t / (t + t_p), \quad (23)$$

где t — суммарное время воздействия на грунт [5]:

$$t = n \frac{l}{v}, \quad (24)$$

где n — число проходов движителя по колесу; v — поступательная скорость машины; t_p — время релаксации напряжений в грунте (экспериментальная величина, зависящая от типа и состояния грунта).

В формуле (24) при определении времени воздействия движителя на почвогрунт вновь фигурирует длина пятна контакта. Следовательно, жесткость движителя оказывает влияние и на степень развития деформаций почвогрунта.

Предшественниками были получены уравнения для радиальной деформации колесных движителей лесных машин типовой конструкции с рабочим внутренним давлением свыше 0,15 МПа [2; 5; 7]. Для движителей сверхнизкого давления такие зависимости неизвестны, что осложняет разработку математической модели, позволяющей качественно прогнозировать показатели воздействия движителя сверхнизкого давления на опорную поверхность.

Выводы. Разработка и реализация математических моделей взаимодействия колесного движителя с опорными поверхностями требует учитывать соотношение сторон пятна контакта движителя с почвогрунтом, поскольку:

- давление движителя на грунт определяется как частное нагрузки на единичный движитель и площади пятна контакта;

- от соотношения длины и ширины пятна контакта зависит распределение сжимающего напряжения по глубине массива почвогрунта. Несущая способность, характеризующая сопротивление сдвигу слоев почвогрунта, зависит не только от его физико-механических свойств, но и от параметров пятна контакта, что учитывается специальными поправочными коэффициентами, значения которых зависят от соотношения сторон пятна контакта;

- для учета числа проходов колесного вездехода по трассе и его скорости рассматривается реология почвогрунта, одной из характеристик воздействия движителя является время воздействия. При определении времени воздействия движителя на почвогрунт также используется значение длины пятна контакта.

Для колесного движителя длину пятна контакта следует определять расчетным путем, причем с учетом радиальной деформации движителя и грунта. Радиальная деформация колесного движителя определяется его конструкцией и жесткостью, зависящей от рабочего внутреннего давления, а также механическими свойствами опорной поверхности (при прочих равных условиях на прочных почвогрунтах радиальная деформация колеса выше, чем на слабонесущих). Следовательно, жесткость колесного движителя оказывает влияние на целый комплекс параметров, определяющих показатели взаимодействия машины с почвогрунтом.

Ранее были получены уравнения для радиальной деформации колесных движителей лесных машин типовой конструкции, с рабочим внутренним давлением свыше 0,15 МПа. Для движителей сверхнизкого давления такие зависимости неизвестны, что осложняет разработку математической модели, позволяющей качественно прогнозировать показатели воздействия движителя сверхнизкого давления на опорную поверхность.

Литература

1. Бурмистрова О.Н., Чемшикова Ю.М., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Тамби А.А. Теоретическое обоснование параметров средоопадающего движителя гусеничного вездехода // Системы. Методы. Технологии. 2019. № 3 (43). С. 81–88.
2. Дмитриева М.Н. Моделирование взаимодействия колесного движителя малогабаритных лесных машин со слабонесущим грунтом : автореф. дис. канд. техн. наук. Архангельск: С(А)ФУ. 2018. 20 с.
3. Цытович Н.А. Механика грунтов. М.: Высшая школа, 1983. 288 с.
4. Агейкин Я.С. Пройдемость автомобилей. М.: Машиностроение, 1981. 232 с.
5. Дмитриева М.Н., Григорьев И.В., Рудов С.Е. Анализ исследований взаимодействия колесного движителя лесных машин со слабонесущим почвогрунтом // Resources and Technology. 2019. V. 1. № 16. P. 10–39.
6. 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 // Journal of Engineering and Applied Sciences. 2018. V. 13. № 8. P. 6419–6430.
7. Grigorev M.F., Grigoreva A.I., Grigorev I.V., Kunitskaya O.A., Stepanova D.I., Savvinova M.S., Sidorov M.N., Tomashevskaya E.P., Burtseva I.A., Zakharova O.I. Experimental findings in forest soil mechanics // EurAsian Journal of BioSciences. 2018. V. 12. № 2. P. 277–287.
8. Зайчик М.И., Орлов С.Ф. Проектирование и расчет специальных лесных машин. М.: Лесн. пром-сть, 1976. 208 с.
9. Хитров Е.Г., Бартепов И.М. Расчет глубины колеи колесного движителя лесных тракторов на склонах // Лесотехнический журнал. 2016. Т. 6. № 4 (24). С. 233–239.
10. Хитров Е.Г., Бартепов И.М. Влияние угла поперечного наклона поверхности качения на тягово-сцепные свойства колесного движителя // Лесотехнический журнал. 2016. Т. 6. № 4 (24). С. 225–232.
11. Шапиро В.Я., Григорьева О.И., Григорьев И.В., Григорьев М.Ф. Теоретическое исследование процесса разрушения массива грунта сферическими ножами при использовании комбинированных конструкций грунтометов для тушения лесных пожаров // Изв. высш. учеб. заведений. Лесной журнал. 2018. № 1 (361). С. 61–69.
12. 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. № 3 (43). С. 94–99.

ды. Технологии. 2019. № 1 (41). С. 68–77.

13. Рудов С.Е., Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Григорьева О.И. Оценка несущей способности мерзлого и оттаявшего грунта при неполной информации о состоянии его взаимодействия с трелевочной системой // Системы. Методы. Технологии. 2019. № 2 (42). С. 80–86.
 14. Хитров Е.Г., Песков В.Б., Казаков Д.П., Божбов В.Е., Степанищева М.В. Метод решения задачи о вдавлении штампа-двигателя в неоднородный массив грунта // Системы. Методы. Технологии. 2018. № 2 (38). С. 116–120.
 15. Бартевев И.М., Драпалюк М.В. Снижение вредного воздействия лесных тракторов и лесосечных машин на почву и насаждения // Лесотехнический журнал. 2012. № 1 (5). С. 61–66.
- References*
1. Burmistrova O.N., SChemshikova YU.M., Grigor'ev I.V., Kunickaya O.A., Tambi A.A. Theoretical substantiation of parameters of a medium-range vehicle crawler // Systems. Methods. Technologies. 2019. № 3 (43). P. 81–88.
 2. Dmitrieva M.N. Modeling of interaction of a wheel mover of small-sized forest machines with weakly-bearing soil: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk. Arhangel'sk: S(A)FU. 2018. 20 p.
 3. Cytovich N.A. Soil mechanics. M.: Vysshaya shkola, 1983. 288 p.
 4. Agejkin YA.S. Permeability of the cars. M.: Mashinostroenie, 1981. 232 p.
 5. Dmitrieva M.N., Grigor'ev I.V., Rudov S.E. Analysis of studies of interaction of a wheeled engine of forest machines with a weakly-growing soil // Resources and Technology. 2019. V. 1. № 16. P. 10–39.
 6. 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 // Journal of Engineering and Applied Sciences. 2018. V. 13. № 8. P. 6419–6430.
 7. Grigorev M.F., Grigoreva A.I., Grigorev I.V., Kunitskaya O.A., Stepanova D.I., Savvinova M.S., Sidorov M.N., Tomashchevskaya E.P., Burtseva I.A., Zakharova O.I. Experimental findings in forest soil mechanics // EurAsian Journal of BioSciences. 2018. V. 12. № 2. P. 277–287.
 8. Zajchik M.I., Orlov S.F. Design and development of special forest machines. M.: Lesn. prom-st', 1976. 208 p.
 9. Hitrov E.G., Bartenev I.M. Calculation of the depth of the wheel drive of forest tractors on the slopes // Forestry Engineering Journal. 2016. V. 6. № 4 (24). P. 233–239.
 10. Hitrov E.G., Bartenev I.M. Influence of the angle of the river slope of the rolling surface on the traction properties of the wheel mover // Forestry Engineering Journal. 2016. V. 6. № 4 (24). P. 225–232.
 11. SHapiro V.YA., Grigor'eva O.I., Grigor'ev I.V., Grigor'ev M.F. Theoretical study of the process of destruction of the soil mass with spherical knives when using combined structures of soil meters to extinguish forest fires // Bulletin of higher educational institutions. Lesnoy zhurnal (Forestry journal). 2018. № 1 (361). P. 61–69.
 12. Rudov S.E., SHapiro V.YA., Grigor'ev I.V., Kunickaya O.A., Grigor'eva O.I. Variational method for calculating parameters of interaction of the skidding system with an array of frozen and thawing soils // Systems. Methods. Technologies. 2019. № 1 (41). P. 68–77.
 13. Rudov S.E., SHapiro V.YA., Grigor'ev I.V., Kunickaya O.A., Grigor'eva O.I. Assessment of the bearing capacity of frozen and thawed soil with incomplete information about the state of its interaction with the skidding system // Systems. Methods. Technologies. 2019. № 2 (42). P. 80–86.
 14. Hitrov E.G., Peskov V.B., Kazakov D.P., Bozhbov V.E., Stepanishcheva M.V. Method for solving the problem of pressing a stamp-mover into a non-uniform array of soil // Systems. Methods. Technologies. 2018. № 2 (38). P. 116–120.
 15. Bartenev I.M., Drapalyuk M.V. Reduction of harmful effects of forest tractors and cutting machines on soil and plantings // Forestry Engineering Journal. 2012. № 1 (5). P. 61–66.