

УДК 629.3

DOI: 10.15393/j2.art.2019.4582

Статья

## Расчёт тягово-сцепных свойств движителя лесной машины при работе на заснеженной опорной поверхности

Егор Г. Хитров<sup>1,\*</sup>, Александр В. Андронов<sup>1</sup>, Григорий С. Тарадин<sup>1</sup>  
и Евгений В. Котенев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С. М. Кирова, Россия, 194021, г. Санкт-Петербург, Институтский пер., д. 5; E-Mails: yegorkhitrov@gmail.com (Е. Х.); grisha190@mail.ru (Г. Т.); andronovalexandr@gmail.com (А. А.); kotenew@bk.ru (Е. К.)

\* Автор, с которым следует вести переписку; E-Mail: yegorkhitrov@gmail.com; Tel.: +7(921)4145593

Получена: 12 апреля 2019 / Принята: 31 мая 2019 / Опубликовано: 20 июня 2019

---

**Аннотация:** Цель работы – составить и исследовать математическую модель, прогнозирующую силу сопротивления снега движению и силу сцепления движителя лесной машины с заснеженной опорной поверхностью, учитывающую упрочнение снега под воздействием машины. Исследование базируется на положениях теории движения автотранспорта в условиях бездорожья. При определении количественных показателей использованы численные методы интегрирования и решения уравнений; для получения инженерных зависимостей осуществлён вычислительный эксперимент с аппроксимацией расчётных данных. Уравнения для глубины колеи и сжатия снега составлены и численно решены с учётом нелинейного уравнения связи относительной деформации сжатия и нормального сжимающего напряжения, полученного на основе геометрической интерпретации модуля общей деформации среды. Установлено, что для колёсных машин коэффициент буксования, при котором обеспечивается наибольшее сцепление движителя с опорной поверхностью, составляет 0,06...0,07; для машин с колёсно-гусеничным движителем – 0,02...0,04; для гусеничных машин – 0,01...0,015. На основе расчётов показано, что сила сцепления для колёсно-гусеничных машин ориентировочно в 2–3 раза больше, чем у машин с колёсным движителем. Сцепление гусеничных машин в 5–7 раз выше, чем колёсных машин. Показано, что расчётное значение коэффициента сцепления зависит от начальной плотности снега и в меньшей степени – от толщины его слоя, причём бóльшим значениям плотности соответствуют бóльшие значения коэффициента. Расчётное значение коэффициента сопротивления движению зависит как от начальной плотности, так и от толщины снежного покрова. Наименьшее сопротивление оказывает очень рыхлый снег, который

под воздействием движителя быстро теряет несущую способность, а также плотно укатанный снег, деформации которого незначительны. Для дальнейших исследований получены уравнения глубины колеи и уплотнения упрочняющегося снега в виде сигмоид, которые позволят получить начальные приближения при расчёте совместных деформаций движителя и заснеженной опорной поверхности.

**Ключевые слова:** сопротивление движению, сила сцепления, колёсный движитель, гусеничный движитель, колёсно-гусеничный движитель, снежная целина.

---

DOI: 10.15393/j2.art.2019.4582

Article

## Evaluation of tractive performance of forestry vehicles on snow-covered surface

Egor G. Khitrov<sup>1,\*</sup>, Aleksandr V. Andronov<sup>1</sup>, Grigorii S. Taradin<sup>1</sup> and Evgenii V. Kotenev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> St. Petersburg State Forest Technical University named after S. M. Kirov, Russia, 194021, St. Petersburg, Institutskii per., 5; E-mails: yegorkhitrov@gmail.com (E. Kh.); grisha190@mail.ru (G. T.); andronovalexandr@gmail.com (A. A.); kotenew@bk.ru (E. K.)

\* Author to whom correspondence should be addressed; E-Mail: yegorkhitrov@gmail.com;

Tel.: +7 921 4145593

Received: 12 April 2019 / Accepted: 31 May 2019 / Published: 20 June 2019

---

**Abstract:** The aim of the work is to create a mathematical model evaluating rolling resistance and tractive force of a forestry vehicle moving on a snow-covered surface, taking into account strengthening of the snow under the vehicle's pressure. The study is based on the theory of off-the-road locomotion. To determine quantitative indicators the numerical methods of integration and equations solving are used. A computation experiment with further approximation of the calculated data is conducted to obtain engineering dependencies. Basic equations for rut depth and the snow compression are compiled and numerically solved taking into account nonlinear stress-strain relationship that was obtained through geometric interpretation of the surface deformation modulus. The results show that for wheeled vehicles the slip ratio, which ensures the highest value of the road adherence is between 0.06 ... 0.07; for bogie-track vehicles the ratio is between 0.02 ... 0.04; for caterpillar drive vehicles the ratio is between 0.01 ... 0.015. The calculation results show that the tractive force for bogie-track vehicles is approximately 2-3 times higher than that of wheeled vehicles. The tractive force of these vehicles is 5-7 times higher than that of wheeled vehicles. The results show that the calculated value of the adhesion coefficient depends on the initial density of snow and depends to a lesser degree on the layer thickness; higher values of the density correspond to the higher values of the net adherence coefficient. The calculated values of the rolling resistance coefficient depend on both the snow density and its layer thickness. The least resistance is provided by very loose snow, which loses its bearing capacity under the vehicle pressure, and by densely compacted snow, the deformations of which are insignificant. For further

research, the study provides equations of rut depth and compaction of strengthening snow in form of sigmoids. The equations allow obtaining initial estimations when calculating mutual deformations of the vehicles and snow-covered surface.

**Keywords:** rolling resistance, tractive force, wheeled vehicles, tracked vehicles, bogie-tracks, virgin snow.

---

## 1. Введение

Лесозаготовительная техника в нашей стране работает в широчайшем спектре природно-производственных условий, в т. ч. в условиях зимы, на лесосеках, покрытых толстым слоем снега. Обоснование рациональных параметров машин, при которых обеспечивается проходимость техники и её высокая производительность, является актуальной научно-практической задачей, для решения которой необходима развитая теоретическая и экспериментальная база. Известны работы, в которых на основе положений теории движения автомобильного транспорта в условиях бездорожья [1] получены оценки тягово-сцепных свойств движителей лесозаготовительных машин при работе на лесных почвогрунтах в летний период [2], [3], [4]. Верификация теоретических разработок показала, что оценки согласуются с экспериментами и практическим опытом. Важным достоинством математических моделей, основанных на положениях теории движения автотранспорта по бездорожью, является то, что они позволяют учесть комплекс параметров движителей и грунта, свойства которого задаются величинами, имеющими строго определённый физический смысл [1]. Структура математических моделей позволяет уточнять отдельные зависимости, входящие в них, без изменения общего подхода к расчёту [5]. Взаимодействие движителей со снегом в лесоинженерном деле изучено сравнительно меньше. В технике в целом внимание исследователей сосредоточено на изучении движения, строительных, военных и спасательных машин [6], [7], [8], [9]. Справочные данные о тягово-сцепных свойствах движителей приводятся в широком диапазоне, зачастую лишь с качественным описанием снежного покрова [10]. Сложность теоретического описания взаимодействия движителей с заснеженными поверхностями состоит в том, что под воздействием машин снег уплотняется, происходит кратное повышение его механических свойств [11], что вызывает трудности математического характера.

Цель работы — составить и исследовать математическую модель, прогнозирующую силу сопротивления снега движению и силу сцепления движителя лесной машины с заснеженной опорной поверхностью, учитывающую упрочнение снега под воздействием машины.

## 2. Материалы и методы

Исследование базируется на положениях теории движения автотранспорта в условиях бездорожья; при определении количественных показателей использованы численные методы интегрирования и решения уравнений; для получения инженерных зависимостей осуществлён вычислительный эксперимент с аппроксимацией расчётных данных.

### 3. Результаты

#### 3.1. Входные параметры модели

В качестве входных параметров заснеженной опорной поверхности примем толщину снежного покрова  $H$  и плотность целинного снега  $\rho\theta$ . Механические свойства снега определим как производные величины плотности  $\rho$ .

Займствование и обработка сведений [12], [13] показывают, что модуль деформации  $E$  [МПа], угол внутреннего трения  $\varphi$  [о], удельное сцепление  $C$  [МПа], несущая способность при вертикальном  $p_z$  [МПа] и горизонтальном  $p_x$  [МПа] нагружениях связаны с плотностью  $\rho$  [г/см<sup>3</sup>] уравнениями:

$$E = a_E \rho^{b_E}, \quad (1)$$

$$C = a_C \rho^{b_C}, \quad (2)$$

$$\varphi = a_\varphi \rho^{b_\varphi}, \quad (3)$$

$$p_z = a_{p_z} \rho^{b_{p_z}}, \quad (4)$$

$$p_x = a_{p_x} \rho^{b_{p_x}}, \quad (5)$$

где  $a_E$ ,  $b_C$ ,  $a_C$ ,  $b_\varphi$ ,  $a_\varphi$ ,  $b_\varphi$ ,  $a_{p_z}$ ,  $b_{p_z}$  — числовые коэффициенты, значения которых представлены в таблице 1.

**Таблица 1.** Числовые коэффициенты в выражениях механических свойств снега через плотность (на основе [12], [13])

$a_E$	$b_E$	$a_C$	$b_C$	$a_\varphi$	$b_\varphi$	$a_{p_z}$	$b_{p_z}$	$a_{p_x}$	$b_{p_x}$
14,56	3,491	0,1749	2,805	29,64	0,1785	0,5963	1,901	0,1216	1,915

Основываясь на сведениях [14], примем зависимость модуля сдвига  $G$  [МПа] от  $\rho$  [г/см<sup>3</sup>]:

$$G = 290\rho, \quad (6)$$

В качестве входных параметров движителя примем его ширину  $B$ , шаг грунтозацепов  $t_z$  и номинальное давление на опорную поверхность  $p$ . На настоящем этапе исследования для приближенной оценки длины пятна контакта движителя с опорной поверхностью  $L$  воспользуемся рекомендациями [15], [16] и примем для колёсного движителя:

$$L = R, \quad (7)$$

где  $R$  — радиус колеса, для колёсно-гусеничного движителя:

$$L = 1,25(R + A), \quad (8)$$

где  $A$  — межосевое расстояние, для гусеничной техники:

$$L = L_t, \quad (9)$$

где  $L_t$  — длина проекции гусеницы на опорную поверхность.

Таким образом, в зависимости от типа движителя дополнительными входными параметрами будут  $R, A, L_t$ .

Приведённую нагрузку на движитель  $G_w$  определим как производную величину:

$$G_w = pBL \quad (10)$$

### 3.2. Входные параметры модели

Важнейшими характеристиками, определяющими опорную проходимость движителя, являются сила сопротивления опорной поверхности деформированию  $F_r$  и сила сцепления движителя с опорной поверхностью  $F_t$ .

Силу сцепления, связанную с сопротивлением опорной поверхности сдвигу, определим по формуле [1]:

$$F_t = B \int_0^L \tau dx \quad (11)$$

где  $\tau$  — напряжение сдвига,  $x$  — горизонтальная координата, отсчитываемая от начала пятна движителя с опорной поверхностью.

Напряжение  $\tau$  найдём по формуле [1]:

$$\tau = \frac{jG\tau_{\max}}{jG + t_2\tau_{\max}} \quad (12)$$

где  $j$  — деформация сдвига опорной поверхности,  $\tau_{\max}$  — максимальное сопротивление опорной поверхности сдвигу.

Сдвиговую деформацию рассчитаем по формуле [1]:

$$j = Sx \quad (13)$$

где  $S$  — коэффициент буксования.

Максимальное сопротивление  $\tau_{\max}$  найдём по формуле [1], [3]:

$$\tau_{\max} = p_x - C \frac{j}{t_2} \quad (14)$$

Тогда получим зависимость для расчёта  $F_t$ :

$$F_t = \frac{BG^2 L p_x}{(G - C)^2} - S \cdot \frac{BCGL^2}{2t_2(G - C)} - \frac{1}{S} \cdot \frac{BG^2 t_2 p_x^2}{(G - C)^3} \ln \left( 1 + S \frac{L(G - C)}{t_2 p_x} \right) \quad (15)$$

Заметим, что функция (15) имеет максимум по  $S$ . Величины  $G, C, \varphi, p_x$  определяются по формулам (2), (3), (5), (10) при  $\rho$ :

$$\rho = \frac{\rho_0}{1 - \frac{c}{H}}, \quad (16)$$

где  $c$  — деформация сжатия снега под воздействием движителя.

Для коэффициента буксования  $S$  можно определить два значения:  $S_{onm}$ , соответствующее максимуму  $F_t$  по уравнению (5), а также  $S$ , достаточное для передвижения машины, которое находится из решения уравнения:

$$F_t = F_r. \quad (17)$$

Сила сопротивления рассчитывается как интеграл зависимости  $p$  от глубины колеи:

$$F_r = B \int_0^h p dh, \quad (18)$$

где  $h$  — глубина колеи.

Коэффициенты сопротивления движению  $\varphi_r$  и сцепления  $\varphi_t$  рассчитаем по формулам:

$$\varphi_r = \frac{F_r}{G_w}, \quad (19)$$

$$\varphi_t = \frac{F_t}{G_w}. \quad (20)$$

Таким образом, для определения  $F_r$ ,  $S$ ,  $S_{onm}$ ,  $F_t$  необходимо найти значения  $c$ ,  $h$  при заданных  $H$ ,  $\rho_0$ ,  $B$  и  $R$ ,  $A$ ,  $L_t$  (в зависимости от типа движителя) при варьировании  $p$  в требуемом диапазоне.

### 3.3. Подход к решению

Поскольку механические свойства снега тесно связаны его плотностью, которая заметно увеличивается под воздействием движителя, рассматривать взаимодействие движителя с опорной поверхностью необходимо с учётом перемены её свойств, а именно упрочнения.

Модуль деформации по определению представляет собой коэффициент пропорциональности в зависимости напряжения  $\sigma$  от деформации  $\varepsilon$  [1], в геометрической интерпретации это тангенс угла наклона графика  $\sigma(\varepsilon)$  [18]. При линейной зависимости  $\sigma(\varepsilon)$  модуль  $E = const$ . Основываясь на геометрической интерпретации, при нелинейной связи  $\sigma$  и  $\varepsilon$  используем дифференциальную зависимость:

$$\frac{d\varepsilon}{d\sigma} = \frac{1}{E}. \quad (21)$$

Учтём, что плотность опорной поверхности  $\rho$  связана с начальной плотностью снега до воздействия движителя  $\rho_0$  и деформацией  $\varepsilon$  уравнением:



$$\rho = \frac{\rho_0}{1 - \varepsilon} \quad (22)$$

Запишем зависимость (13) с учётом уравнения (20):

$$E = a_{E\rho} \left( \frac{\rho_0}{1 - \varepsilon} \right)^{b_E} = E_0 \left( \frac{1}{1 - \varepsilon} \right)^{b_E}, \quad (23)$$

где  $E_0$  — модуль деформации снега до воздействия движителя.

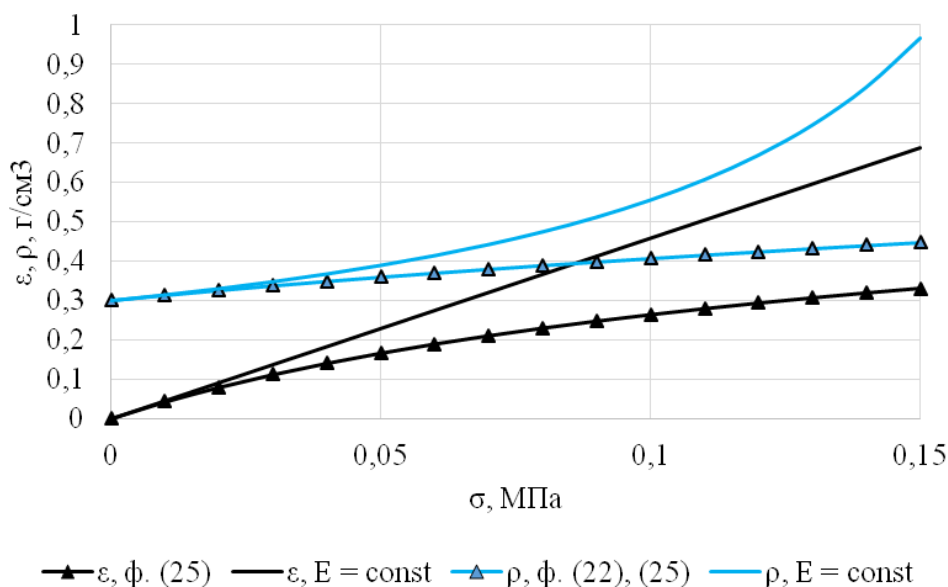
После подстановки выражения (20) в зависимость (21) получим уравнение:

$$\frac{d\varepsilon}{d\sigma} = \frac{(1 - \varepsilon)^{b_E}}{E_0} \quad (24)$$

Решение уравнения (24) при начальном условии  $\varepsilon(0) = 0$  имеет вид:

$$\varepsilon = 1 - \left( \frac{E_0}{\sigma(b_E - 1) + E_0} \right)^{\frac{1}{b_E - 1}} \quad (25)$$

Пример расчёта  $\varepsilon$  и  $\rho$  по уравнениям (22), (25) для снега с плотностью  $\rho_0 = 0,3 \text{ г/см}^3$  представлен на рисунке 1, там же для сравнения представлены результаты расчёта  $\varepsilon$  и  $\rho$  при постоянном значении модуля деформации  $E = 0,218 \text{ МПа}$ .



**Рисунок 1.** Пример результатов расчёта относительной деформации и плотности снега под воздействием нормального сжимающего напряжения

Как показывают результаты расчётов, формула (23) позволяет учесть упрочнение опорной поверхности, вызванное изменением её плотности, снижающее относительную деформацию  $\varepsilon$ .

Далее используем известную зависимость [1] для расчёта деформации сжатия  $c$  опорной поверхности:

$$c = \int_0^{H-c} \frac{\varepsilon}{1-\varepsilon} dz, \quad (26)$$

где  $z$  — вертикальная координата, отсчитываемая вниз от поверхности контакта движителя с опорной поверхностью.

Напряжение  $\sigma$  определим с учётом затухания по глубине [1]:

$$\sigma = \frac{Jp}{1 + \left(\frac{z}{aB}\right)^2}, \quad (27)$$

где  $J$  — коэффициент учёта геометрических параметров пятна контакта движителя с опорной поверхностью,  $a$  — коэффициент учёта толщины деформируемого слоя опорной поверхности,  $B$  — ширина пятна контакта.

Коэффициенты  $a$ ,  $J$  рассчитаем по формулам [1]:

$$a = 0,64 \frac{B+H}{H}, \quad (28)$$

$$J = \frac{0,03B+L}{0,6B+0,43L}. \quad (29)$$

Уравнение (26) решается относительно  $c$ .

Глубина колеи  $h$  определяется не только сжатием  $c$ , но и сдвигом слоёв опорной поверхности, вызванным потерей несущей способности  $p_z$ . Явление потери несущей способности учитывается повышающим поправочным множителем [1], [5]:

$$h = \frac{p_z \alpha_H}{p_z \alpha_H - p} c, \quad (30)$$

где  $\alpha_H$  — повышающий коэффициент учёта толщины деформируемого слоя.

Коэффициент  $\alpha_H$  рассчитаем по формуле [12]:

$$\alpha_H = 1 + \frac{H_p h}{2H(H-h-0,25H_p)}, \quad (31)$$

где  $H_p$  — вспомогательное обозначение [12]:

$$H_p = \frac{\sqrt{2}}{2} B \operatorname{tg} \varphi \cos \frac{3}{4} \varphi \exp \left( \left( \frac{\pi}{4} + \frac{3\varphi}{4} \right) \operatorname{tg} \varphi \right) \quad (32)$$

В уравнениях (30), (32)  $p_z$ ,  $\varphi$  определяются по формулам (3), (4), (16) при  $c$ , найденном из решения уравнения (26). Уравнение (26) решается относительно  $h$ .

### 3.4. Реализация модели

Поиск замкнутого решения (26) с учётом (25), (27) и дробного значения  $b_E$  сложен. Уравнение (30), хотя и имеет аналитическое решение относительно  $h$  при известном  $c$ , не позволяет получить зависимость  $p(h)$  либо  $h(p)$ , удобную для определения  $F_r$  по (18). По этим причинам при реализации математической модели обратимся к численным методам. Порядок расчёта следующий. Задаются значения входных параметров:  $\rho_0$ ,  $H$ , тип движителя,  $B$ ,  $t_2$ , максимальное значение  $p = p_{\max}$  и, в зависимости от типа движителя,  $R$ ,  $A$ ,  $L_t$ . Вычисления проводятся последовательно при изменении  $p$  в пределах от 0 до  $p_{\max}$  (в нашем исследовании шаг  $p$  был принят  $p_{\max}/50$ ). При каждом значении  $p$  порядок расчёта одинаков. Вначале рассчитываем  $E_0$  при  $\rho = \rho_0$  по формуле (1), выражения  $\varepsilon$ ,  $\sigma$  и значения  $a$ ,  $J$  по (25), (27)—(29) подставляем в уравнение (26). Уравнение (26) решаем численно относительно  $c$  [в нашем исследовании для получения численного решения (26) в программе Maple 2017 значение правой части уравнения (26) в зависимости от  $c$  с шагом  $H/10$  определяли с помощью команды `int(..., numeric)`, а затем аппроксимировали расчётные данные полиномом 4-го порядка по  $c$ , далее решение находили при помощи команды `fsolve`]. По полученному значению  $c$  определяем  $\rho$ ,  $C$ ,  $\varphi$ ,  $p_z$ ,  $p_x$ ,  $G$  по формулам (16), (2)—(6). Далее выражения  $\alpha_H$ ,  $H_p$  по (31), (32) подставляем в уравнение (30) и решаем его численно относительно  $h$ . Интеграл для  $F_r$  по формуле (18) берётся численно по полученным значениям  $p$  и  $h$ . Далее находится максимум функции  $F_{t\max}$  по (15) и соответствующее ему значение  $S = S_{opt}$  [в нашем исследовании использовалась команда `Maximize(..., S = 0...0,5)` пакета `Optimization` в программе Maple 2017]. Коэффициенты  $\varphi_r$ ,  $\varphi_t = \varphi_{t\max}$  рассчитываем по формулам (19), (20) с учётом (10). Расчёты при меньших значениях шага  $c$  при решении (26) и  $p$  показали, что уменьшение шага не приводит к сколько-нибудь существенным отличиям расчётных значений  $c$ ,  $h$ ,  $F_r$ ,  $\varphi_r$ ,  $S_{opt}$ ,  $F_{t\max}$ ,  $\varphi_{t\max}$ .

Пример результатов расчёта представлен на рисунках 2—5 [при  $B = 0,7$  м,  $t_2 = 0,14$  м, для колёсного движителя (кд)  $L = 0,8$  м, для колёсно-гусеничного движителя (к-гд)  $L = 2,12$  м, для гусеничного движителя (гд)  $L = 5$  м,  $\rho_0 = 0,2$  г/см<sup>3</sup>,  $H = 0,75$  м].

Обратим внимание, что расчётные значения  $c$  для гусеничного и колёсно-гусеничного движителей выше, чем для колёсного при одинаковых значениях  $p$ . Это объясняется различными значениями коэффициента  $J$  по формуле (29) и качественно согласуется с положениями механики грунтов о влиянии соотношения сторон пятна контакта на осадку

штампа. Следует также учитывать, что при одинаковом весе машины давление гусеничного и колёсно-гусеничного движителей на опорную поверхность ниже, чем колёсного.

В случаях, когда расчётное значение  $s$  либо  $h$  превышает по величине клиренс машины, в качестве действительного значения  $s$ ,  $h$  следует принять максимально возможное физически, и далее рассматривать сопротивление движению с учётом дополнительной составляющей — бульдозерного сопротивления снега по рекомендациям [1].

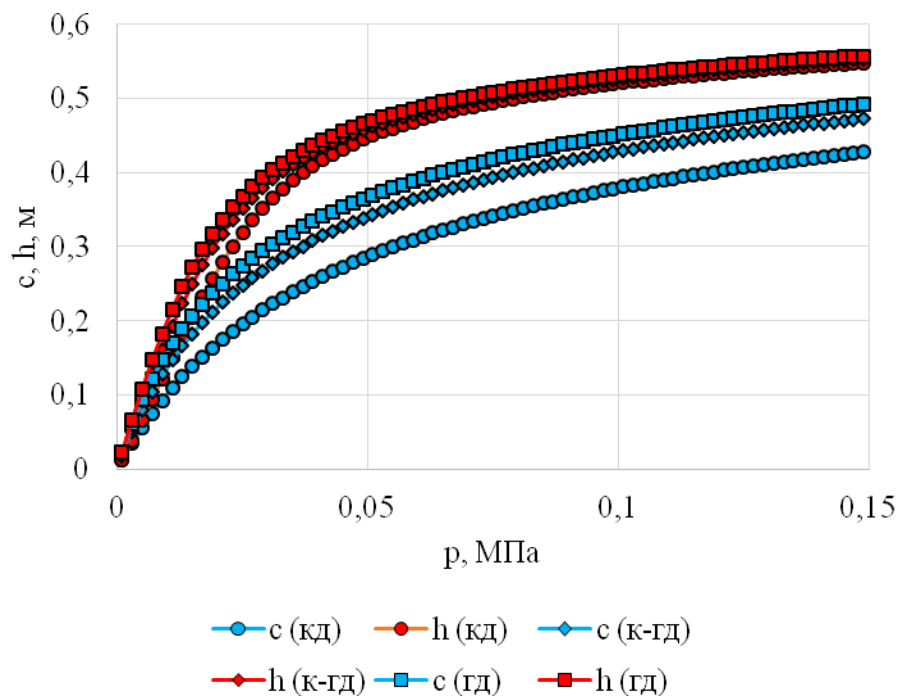
Как показывают графики, сила сопротивления снега для всех трёх типов движителя примерно сопоставима при равном  $p$ .

Значение  $S_{opt}$  по расчётам практически не зависит от  $p$  и прочих параметров снега и движителя, исключая его тип. Для колёсных машин  $S_{opt} = 0,06...0,07$ ; для машин с колёсно-гусеничным движителем  $S_{opt} = 0,02...0,04$ ; для гусеничных машин  $S_{opt} = 0,01...0,015$ . При значениях  $S$  за пределами указанных диапазонов сила сцепления  $F_t$ , обусловленная сопротивлением снега сдвигу, меньше  $F_{tmax}$  по значению. Таким образом, существенное буксование  $S > 0,1$  лесных машин на снегу будет вызвано, скорее, не потерей опорной проходимости при  $F_{tmax} < F_r$ , а недостатком мощности двигателя  $N$  при  $N\eta < F_r v$  (где  $\eta$  — КПД трансмиссии,  $v$  — скорость машины).

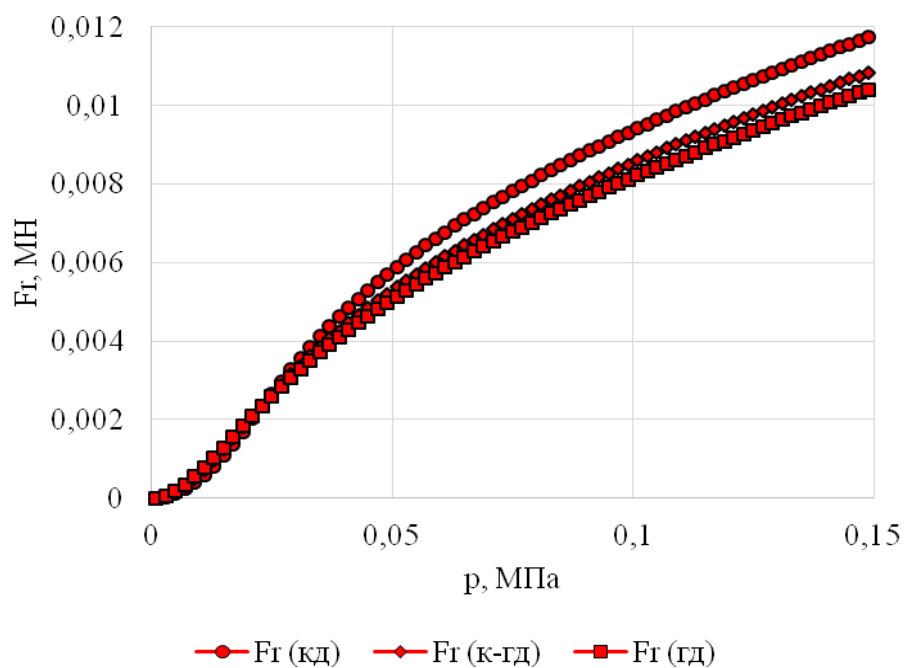
Сила  $F_t$  для колёсно-гусеничных машин ориентировочно в 2—3 раза больше, чем у машин с колёсным движителем. Сцепление гусеничных машин в 5—7 раз выше, чем колёсных машин. Расхождения в обоих случаях можно объяснить бóльшими, по сравнению с колёсными машинами, площадями пятна контакта колёсно-гусеничных и гусеничных машин с заснеженной опорной поверхностью.

В таблицах 2—4 представлены более подробные результаты, относящиеся к коэффициентам  $\varphi_r$ ,  $\varphi_t$  в диапазонах  $p$ , характерных для определённых типов движителей.

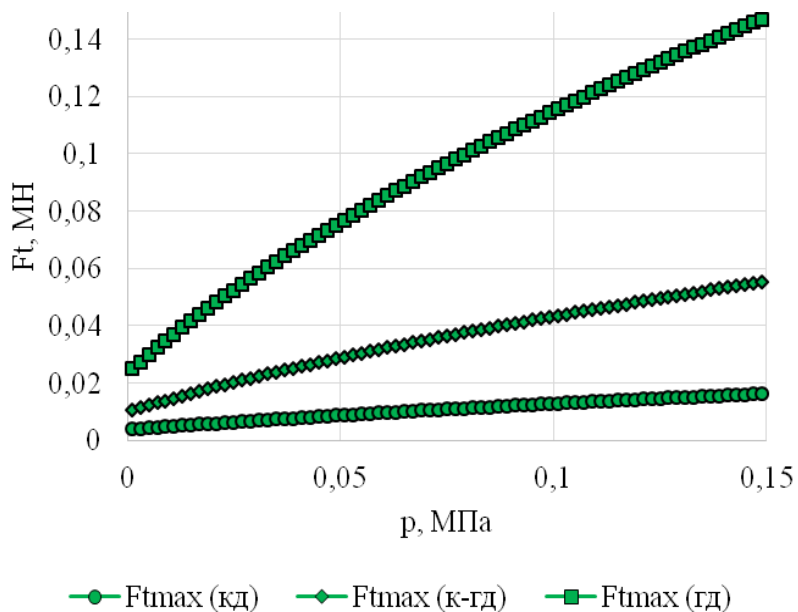
Расчётное значение коэффициента  $\varphi_r$  зависит как от начальной плотности  $\rho_0$ , так и от толщины снежного покрова  $H$ . Наименьшее сопротивление оказывает очень рыхлый снег, который, ввиду низких механических свойств, под воздействием движителя быстро теряет несущую способность, а также плотно укатанный снег, деформации которого под воздействием движителя незначительны. Расчётное значение коэффициента  $\varphi_t$  зависит от  $\rho_0$  и в меньшей степени — от  $H$ . Бóльшим значениям  $\varphi_t$  соответствуют бóльшие значения  $\rho_0$ , исключение составляет очень рыхлый снег, при работе на котором высокие значения  $\varphi_t$  можно объяснить образованием уплотнённого нижнего слоя, с которым фактически взаимодействует движитель. Подтвердим рассуждения результатами расчёта, представленными графиками на рисунке 6.



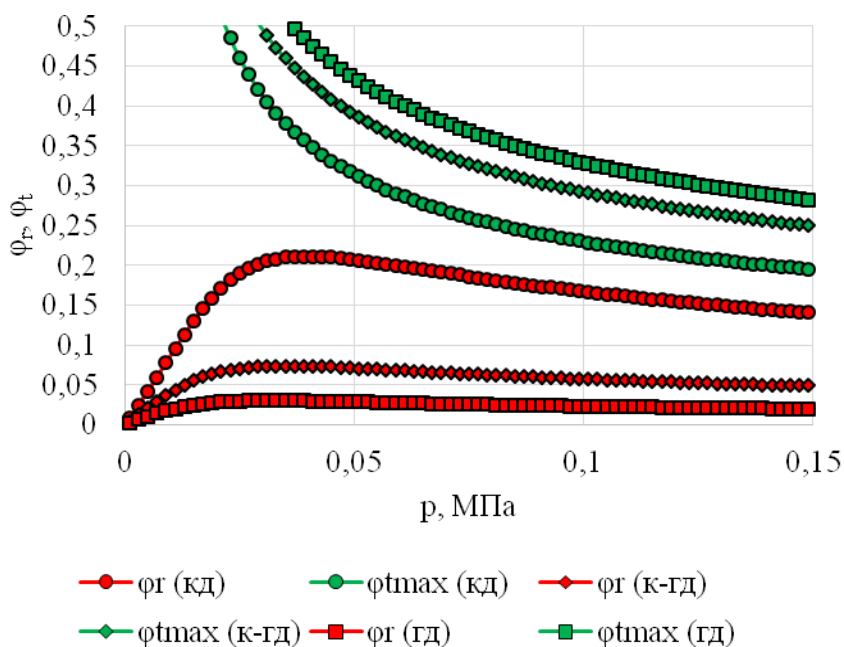
**Рисунок 2.** Пример результатов расчёта глубины колеи и сжатия снега под воздействием движителя



**Рисунок 3.** Пример результатов расчёта силы сопротивления снега перемещению движителя



**Рисунок 4.** Пример результатов расчёта силы сцепления движителя с заснеженной опорной поверхностью



**Рисунок 5.** Пример результатов расчёта коэффициентов сопротивления и сцепления движителя с заснеженной опорной поверхностью

**Таблица 2.** Результаты расчёта коэффициентов сопротивления и сцепления колёсного движителя с заснеженной опорной поверхностью ( $p = 0,06—0,08$  МПа)

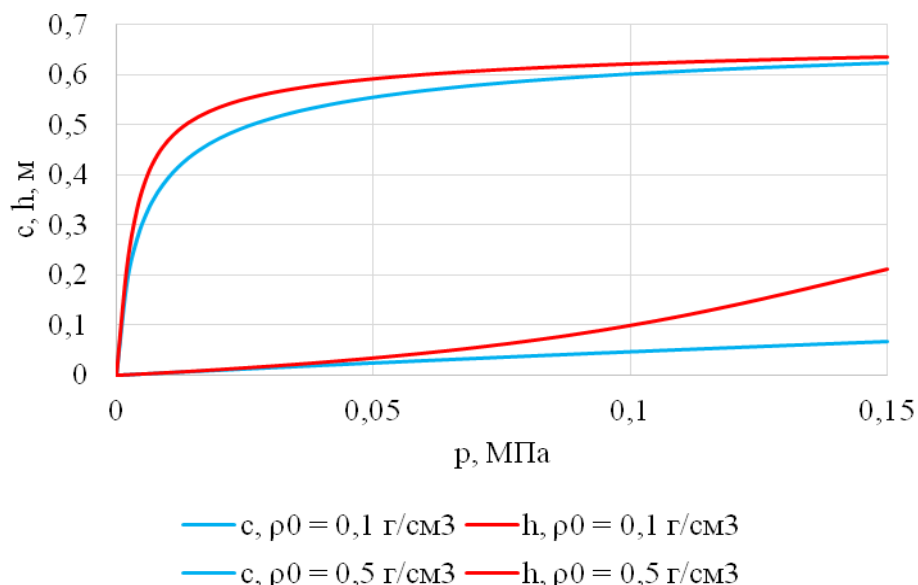
Снежный покров	$\rho_0$ , г/см <sup>3</sup>	$\varphi_r$			$\varphi_{\max}$
		$H = 0,5$ м	$H = 0,75$ м	$H = 1$ м	
Очень рыхлый	0,1	0,06—0,06	0,09—0,1	0,12—0,13	0,36—0,4
Рыхлый	0,2	0,11—0,12	0,18—0,2	0,26—0,29	0,24—0,3
Слегка укатанный	0,3	0,12—0,13	0,2—0,23	0,28—0,34	0,25—0,33
Укатанный	0,4	0,06—0,08	0,08—0,13	0,1—0,17	0,33—0,44
Плотно укатанный	0,5	0,02—0,04	0,03—0,05	0,04—0,06	0,44—0,59

**Таблица 3.** Результаты расчёта коэффициентов сопротивления и сцепления колёсно-гусеничного движителя с заснеженной опорной поверхностью ( $p = 0,04—0,06$  МПа)

Снежный покров	$\rho_0$ , г/см <sup>3</sup>	$\varphi_r$			$\varphi_{\max}$
		$H = 0,5$ м	$H = 0,75$ м	$H = 1$ м	
Очень рыхлый	0,1	0,02—0,03	0,03—0,04	0,05—0,05	0,52—0,6
Рыхлый	0,2	0,04—0,04	0,07—0,07	0,1—0,11	0,35—0,44
Слегка укатанный	0,3	0,03—0,04	0,05—0,07	0,07—0,11	0,35—0,5
Укатанный	0,4	0,02—0,03	0,02—0,04	0,03—0,05	0,45—0,66
Плотно укатанный	0,5	0,01—0,02	0,01—0,02	0,01—0,02	0,59—0,88

**Таблица 4.** Результаты расчёта коэффициентов сопротивления и сцепления гусеничного движителя с заснеженной опорной поверхностью ( $p = 0,03—0,05$  МПа)

Снежный покров	$\rho_0$ , г/см <sup>3</sup>	$\varphi_r$			$\varphi_{\max}$
		$H = 0,5$ м	$H = 0,75$ м	$H = 1$ м	
Очень рыхлый	0,1	0,01—0,02	0,01—0,02	0,02—0,03	0,63—0,76
Рыхлый	0,2	0,02—0,03	0,03—0,04	0,04—0,05	0,42—0,56
Слегка укатанный	0,3	0,01—0,02	0,02—0,03	0,02—0,04	0,42—0,65
Укатанный	0,4	0,01—0,02	0,01—0,02	0,01—0,02	0,54—0,87
Плотно укатанный	0,5	0,01	0,01	0,01	0,71—0,97



**Рисунок 6.** Результаты расчёта глубины колеи и уплотнения очень рыхлого и плотно укатанного снега под воздействием колёсного движителя

Отметим, что коэффициент  $\varphi_r$  на настоящем этапе исследования получен лишь с учётом сопротивления снега деформированию. Действительное его значение выше, поскольку сопротивление движению увеличивается за счёт потерь энергии, вызванных деформацией движителя, отрывом движителя от снега, бульдозерным сопротивлением снега, прочими потерями [1]. Например, для колёсных машин сопротивление, обусловленное деформацией снега, составляет до 90 % от общего [11], тогда при отсутствии бульдозерного сопротивления и трения днища корпуса и элементов шасси о снег сопротивление деформированию эластичного движителя составит 10 % от общего и более.

К сожалению, справочные данные [10] приводятся в широком диапазоне и без указания толщины снежного покрова. Так,  $\varphi_r$  для колёсных машин рекомендуется принимать в диапазоне от 0,05—0,1 для укатанного до 0,3 для рыхлого снега. Для гусеничных машин  $\varphi_r$  при работе на слегка укатанном и укатанном снегу составляет 0,05—0,1. Близкие значения получены нами при толщине снежного покрова до 1 м. Коэффициент  $\varphi_t$  для колёсных машин приводится в диапазоне от 0,15 до 0,35, для гусеничных машин — от 0,1 до 0,75 для уплотнённого и утрамбованного снега. Полагаем, что результаты, полученные нами расчётным путём, в целом сопоставимы со справочными оценками.

В дальнейших исследованиях полагаем целесообразным разработать математические модели, учитывающие большее число факторов, относящихся к сопротивлению движению машины, в которых давление  $p$  определяется не как входной параметр, а рассчитывается на основании геометрических параметров движителя и его жёсткости. Для этого необходимо рассматривать совместные деформации движителя и опорной поверхности по аналогии, например, с данными [18]. Характер уравнений (26), (30) осложняет получение решения,



поэтому дополнительные зависимости для  $c$ ,  $h$ , по которым возможно определить их ориентировочные значения, служащие начальными приближениями при оценке деформаций движителя, позволят упростить решение задачи.

Для получения приближенных уравнений для расчёта  $h$ ,  $c$  осуществим вычислительный эксперимент. Получим численное решение уравнений (26), (30) относительно  $c$ ,  $h$  при варьировании параметров  $B$ ,  $L$ ,  $H$ ,  $\rho_0$ ,  $p$ . Параметры изменяются как случайные величины, равномерно распределённые в пределах, указанных в таблице 5.

**Таблица 5.** Факторы и интервалы их варьирования в вычислительном эксперименте по исследованию колесобразованию и уплотнения снега

Параметр	Минимальное значение	Максимальное значение
$B$ , м	0,4	0,8
$L$ , м	$B$	7
$H$ , м	0,5	1
$\rho_0$ , г/см <sup>3</sup>	0,1	0,5
$p$ , МПа	0	0,15

Решение уравнений получено в программе Maple 2017 для 10 000 сочетаний значений факторов. Обработка результатов расчётов при помощи метода наименьших квадратов показала, что значение  $c$  удовлетворительно описывается формулой ( $R^2 \gg 0,9$ ):

$$c = \frac{\zeta_1 p}{\sqrt{1 + \zeta_2 p^2}}, \quad (33)$$

где  $\zeta_1$ ,  $\zeta_2$  — коэффициенты, учитывающие характеристики движителя и опорной поверхности:

— для колёсного движителя при  $L = 1 \dots 2B$ :

$$\zeta_1 = \frac{0,19B^{0,82} H^{0,83}}{\rho_0^{2,74}}, \zeta_2 = \frac{B^{2,0}}{H^{0,25} \rho_0^{4,2}}; \quad (34)$$

— для колёсно-гусеничного движителя при  $L = 2 \dots 3$  м:

$$\zeta_1 = \frac{0,22B^{0,35} H^{0,69}}{L^{0,49} \rho_0^{2,93}}, \zeta_2 = \frac{B^{0,84}}{L^{1,5} H^{0,64} \rho_0^{4,9}}; \quad (35)$$

— для гусеничного движителя при  $L = 4 \dots 7$  м:

$$\zeta_1 = \frac{0,26B^{0,41}}{L^{0,41} \rho_0^{3,0}}, \zeta_2 = \frac{B^{0,91}}{L^{1,1} H^{2,3} \rho_0^{5,2}}. \quad (36)$$

Значения  $h$  можно с удовлетворительной точностью найти по формуле ( $R^2 \gg 0,9$ ):

$$h = \frac{\xi_1 P}{\sqrt{1 + \xi_2 P^2}}, \quad (37)$$

где  $\xi_1, \xi_2$  — коэффициенты, зависящие от характеристик опорной поверхности и движителя:  
 — для колёсного движителя при  $L = 1 \dots 2B$ :

$$\xi_1 = \frac{0,57 B^{0,33} H^{1,2}}{\rho_0^{2,3}}, \xi_2 = \frac{B^{1,2} H^{0,21}}{\rho_0^{4,5}}; \quad (38)$$

— для колёсно-гусеничного движителя при  $L = 2 \dots 3$  м:

$$\xi_1 = \frac{0,58 H^{1,1}}{L^{0,3} \rho_0^{2,5}}, \xi_2 = \frac{B^{0,23}}{\rho_0^{4,8} L^{0,88}}; \quad (39)$$

— для гусеничного движителя при  $L = 4 \dots 7$  м:

$$\xi_1 = \frac{0,54}{L^{0,31} \rho_0^{2,6}}, \xi_2 = \frac{B^{0,22}}{\rho_0^{5,1} H^{2,5} L^{0,83}}. \quad (40)$$

Размерности величин в формулах (34)—(36), (38)—(40) соответствуют указанным в таблице 5.

Интегрируя зависимость (18) по частям и учитывая формулу (37), получим приближённую оценку  $F_r$ :

$$F_r = B \xi_1 \left( \frac{P^2}{\sqrt{1 + \xi_2 P^2}} - \frac{\sqrt{1 + \xi_2 P^2} - 1}{\xi_2} \right). \quad (41)$$

#### 4. Обсуждение и заключение

Основу математической модели составляют уравнения Я. С. Агейкина [1], в которых решение задачи о вдавлении штампа в деформируемую среду получено с учётом уплотнения и упрочнения среды. Зависимости уточнены нелинейным уравнением связи относительной деформации сжатия и нормального сжимающего напряжения, полученной на основе геометрической интерпретации модуля общей деформации среды. При реализации модели использованы коэффициенты для расчёта механических свойств упрочняющегося снега по сведениям С. Г. Осколкова [13] и В. В. Ларина [12].

Основные выводы, сделанные нами по результатам реализации модели, следующие:

Значение коэффициента буксования, при котором обеспечивается максимальное сцепление движителя с опорной поверхностью, по расчётам практически не зависит от давления и прочих параметров снега и движителя, исключая его тип. Для колёсных машин оптимальный коэффициент буксования составляет 0,06...0,07; для машин с колёсно-

гусеничным двигателем — 0,02...0,04; для гусеничных машин — 0,01...0,015. Таким образом, существенное буксование (свыше 0,1) лесных машин на снегу будет вызвано, скорее, не потерей опорной проходимости, а недостатком мощности двигателя.

Сила сцепления для колёсно-гусеничных машин ориентировочно в 2—3 раза больше, чем у машин с колёсным двигателем. Сцепление гусеничных машин в 5—7 раз выше, чем колёсных машин. Расхождения в обоих случаях можно объяснить большими, по сравнению с колёсными машинами, площадями пятна контакта колёсно-гусеничных и гусеничных машин с заснеженной опорной поверхностью. Расчётное значение коэффициента сцепления зависит от начальной плотности снега и в меньшей степени — от толщины его слоя. Большим значениям плотности соответствуют большие значения коэффициента, исключение составляет очень рыхлый снег, при работе на котором высокие значения сцепления можно объяснить образованием уплотнённого нижнего слоя, с которым фактически взаимодействует двигатель.

Расчётное значение коэффициента сопротивления движению зависит как от начальной плотности, так и от толщины снежного покрова. Наименьшее сопротивление оказывает очень рыхлый снег, который ввиду низких механических свойств, под воздействием двигателя быстро теряет несущую способность, а также плотно укатанный снег, деформации которого под воздействием двигателя незначительны. На настоящем этапе исследования коэффициент получен лишь с учётом сопротивления снега деформированию. Действительное его значение выше, поскольку сопротивление движению увеличивается за счёт потерь энергии, вызванных деформацией двигателя, отрывом двигателя от снега, бульдозерным сопротивлением снега, прочими потерями [1]. Например, для колёсных машин сопротивление, обусловленное деформацией снега, составляет до 90 % от общего [11], тогда при отсутствии бульдозерного сопротивления и трения днища корпуса и элементов шасси о снег сопротивление деформированию эластичного двигателя составит 10 % от общего и более.

В дальнейших исследованиях полагаем целесообразным разработать математические модели, учитывающие большее число факторов, относящихся к сопротивлению движению машины, в которых давление на опорную поверхность рассчитывается на основании геометрических параметров двигателя и его жёсткости. Упростить решение задачи позволят приближённые зависимости для глубины колеи и сжатия снега (33) и (37), полученные по результатам вычислительного эксперимента. Отметим, что сигмоиды (33), (37) качественно и в удовлетворительной мере количественно повторяют результаты численного решения уравнений (26), (30), полученных на основе положений теории движения автотранспорта в условиях бездорожья.

Перспективным направлением верификации разработок является сопоставление расчётных данных с результатами зарубежных исследователей, основанными на обобщении богатого эмпирического опыта [19—22]. Для этого потребуются дополнительные сведения о сопротивлении снега зондированию, которые могут быть получены с использованием

положений [23—28]. Взаимодействие движителей с пониженным давлением на опорную поверхность целесообразно сопоставить с результатами [29—31].

### Список литературы

1. *Агейкин, Я. С.* Проходимость автомобилей / Я. С. Агейкин. — Москва : Машиностроение, 1981. — 232 с.
2. *Божбов, В. Е.* Повышение эффективности процесса трелёвки путём обоснования рейсовой нагрузки форвардеров : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.21.01 / Божбов Владимир Евгеньевич. — Архангельск : САФУ, 2015. — 20 с.
3. *Лухминский, В. А.* Совершенствование моделей и методов прогнозирования проходимости гусеничных лесных машин : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.21.01 / Лухминский Владислав Алексеевич. — Архангельск : С(А)ФУ, 2018. — 20 с.
4. *Устинов, В. В.* Оценка тягово-сцепных свойств колёсных движителей лесных машин методами теории движения автотранспорта по бездорожью : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.21.01 / Устинов Владимир Владимирович. — Архангельск : САФУ, 2016. — 20 с.
5. Уточнённая модель для оценки тягово-сцепных свойств колёсного движителя лесной машины / Е. Г. Хитров, А. М. Хахина, М. Н. Дмитриева, В. Б. Песков, О. И. Григорьева // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. — 2016. — № 217. — С. 108—119.
6. *Аникин, А. А.* Разработка научных методов повышения проходимости по снегу особо лёгких гусеничных машин : дис. д-ра ... техн. наук : 05.05.03 / Аникин Алексей Александрович. — Нижний Новгород, 2010. — 309 с.
7. *Барахтанов, Л. В.* Повышение проходимости гусеничных машин по снегу : дис. д-ра ... техн. наук : 05.05.03 / Барахтанов Лев Васильевич. — Горький, 1988. — 352 с.
8. *Беляков, В. В.* Взаимодействие со снежным покровом эластичных движителей специальных транспортных средств : дис. ... д-ра техн. наук : 05.05.03 / Беляков Владимир Викторович. — Нижний Новгород, 1999. — 485 с.
9. *Донато, И. О.* Проходимость колёсных машин по снегу / И. О. Донато. — Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. — 231 с.
10. Физико-механические свойства снежного покрова // Всё о ремонте и строительстве [Электронный ресурс]. — 2016. — URL: <http://stroj-archive.ru/dorozhnye-mashiny/977-fiziko-mehchanicheskie-svoystva-snezhnogo-pokrova.html>. — (02.04.2019).
11. *Донато, И. О.* Расчёт сопротивления движению колёсных машин по снегу / И. О. Донато // Известия вузов. Сер. «Машиностроение». — 2007. — № 2. — С. 42—46.
12. *Ларин, В. В.* Методы прогнозирования и повышения опорной проходимости многоосных колёсных машин на местности : дис. д-ра ... техн. наук : 05.05.03 / Ларин Василий Васильевич. — Москва, 2007. — 530 с.
13. *Осколков, С. Г.* Зимние лесовозные дороги / С. Г. Осколков. — Красноярск : СТИ, 1977. — 104 с.
14. *Rohani, B.* Correlation of mobility cone index with fundamental engineering properties of soil / B. Rohani, G. Y. Baladi. — U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station, 1981. — 41 p.
15. Ecoefficient timber forwarding on lowland soft soils / T. Porsinsky, T. Pentek, A. Bosner, I. Stankic // In Global Perspectives on Sustainable Forest Management. — Okia, C. A., Ed.; InTech : Rijeka, Croatia, 2012. — P. 69—79.

16. *Saarilahti, M.* Modelling of the wheel and tyre. Tyre and soil contact — Survey on tyre contact area and ground pressure models for studying the mobility of forest tractors / M. Saarilahti. — Helsinki, 2002. — Soil interaction model, Appendix Report. — № 5. — P. 1—43.
17. *Александров, А. В.* Сопротивление материалов : учебник для вузов. — 4-е изд., испр. / А. В. Александров, В. Д. Потапов, Б. П. Державин. — Москва : Высш. шк., 2004. — 560 с.
18. Модель для оценки радиальной деформации колеса лесной машины с учётом деформации почвогрунта / Е. Г. Хитров, И. В. Григорьев, В. А. Макуев, А. М. Хахина, С. Ю. Калинин // Вестник Московского государственного университета леса — Лесной вестник. — 2015. — Т. 19, № 6. — С. 87—90.
19. *Muro, T.* Terramechanics: Land Locomotion Mechanics / T. Moro. — CRC Press, 2004. — 322 p.
20. *Wong, J. Y.* Terramechanics and off-road vehicle engineering: terrain behaviour off-road vehicle performance and design / J. Y. Wong // Elsevier second ed., 2010. — 488 p.
21. *Wong, J. Y.* Theory of ground vehicles / J. Y. Wong // John Wiley and Sons, New Jersey, fourth edition, 2008. — 528 p.
22. *Williams, R. C.* Comparison of Laboratory Wheel-Tracking Test Results with WES Track Performance / R. C. Williams, B. Prowell // Transportation Research Record. — 1990. — P. 121—128.
23. Correction of resistance to penetration by pedofunctions and a reference soil water content / M. T. Moraes, H. Debiassi, J. C. Franchini, V. R. Silva // R. Bras. Ci. Solo. — 2012. — № 36 (6). — P. 1395—1406.
24. *Senneset, K.* Strength and deformation parameters from cone penetration tests / K. Senneset, N. Janbu, G. Svano // Proceedings of the European Symposium on Penetration Testing. ESOPT — II. — Amsterdam, 1982. — P. 863—870.
25. *Van Impe, W. F.* The evaluation deformation and bearing capacity parameters of foundations from static CPT-results / W. F. Van Impe // Proc. Fourth Int. Geotechnical seminar, Filed instrumentation and in-site measurements. — Singapore, 1986. — P. 51—70.
26. Penetrometer techniques in relation to soil compaction and root growth / A. G. Bengough, D. J. Campbell, M. F. O'Sullivan and K. A. Smith, C. E. Mullins (eds.) // Soil and Environmental Analysis (2nd ed.), Marcel Dekker. — New York, 2001. — P. 377—403.
27. Correction of cone index for soil water content differences in a coastal plain soil / W. J. Busscher, P. J. Bauer, C. R. Camp, R. E. Sojka // Soil, Tillage Research. — 1997. — № 43 (3—4). — P. 205—217.
28. *Dexter, A. R.* A method for prediction of soil penetration resistance / A. R. Dexter, E. A. Czyz, O. P. Gate // Soil, Tillage Research. — 2007. — № 93. — P. 412—419.
29. Development on research of soft-terrain machine systems / J. Li, H. Huang, Y. Wang, L. Tian, L. Ren // Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery. — 2015. — № 46. — P. 306—320.
30. Sinkage of wire mesh wheel under light load. Jilin Daxue Xuebao (Gongxueban) / J. Li, H. Huang, Z.-L. Dang, M. Zou, Y. Wang // Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition). — 2015. — № 45. — P. 167—173.
31. *Sandu, C.* Experimental study on the contact patch pressure and sinkage of a lightweight vehicle on sand / C. Sandu, E. Worley, M. Morgan // Journal of Terramechanics. — 2010. — № 47. — P. 343—359.

## References

1. *Agejkin, Ya. S.* Prohodimost' avtomobilej / Ya. S. Agejkin. — Moskva : Mashinostroenie, 1981. — 232 p. (in Russian).
2. *Bozhbov, V. E.* Povyshenie ehffektivnosti protsessa trelevki putem obosnovaniya rejsovoj nagruzki forvarderov : avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk : 05.21.01 / Bozhbov Vladimir Evgen'evich // Arhangel'sk : SAFU, 2015. — 20 p. (in Russian).
3. *Lukhminskii, V. A.* Sovershenstvovanie modelej i metodov prognozirovaniya prohodimosti gusenichnyh lesnyh mashin : avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk : 05.21.01 / Lukhminskii Vladislav Alekseevich // Arhangel'sk : S(A)FU, 2018. — 20 p. (in Russian).
4. *Ustinov, V. V.* Otsenka tyagovo-stsepnnyh svojstv kolesnyh dvizhitelej lesnyh mashin metodami teorii dvizheniya avtotransporta po bezdorozh'yu : avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk : 05.21.01 / Ustinov Vladimir Vladimirovich // Arhangel'sk : SAFU, 2016. — 20 p. (in Russian).
5. Utochnennaya model' dlya otsenki tyagovo-stsepnnyh svojstv kolesnogo dvizhitelya lesnoj mashiny / E. G. Khitrov, A. M. Hahina, M. N. Dmitrieva, V. B. Peskov, O. I. Grigor'eva // Izvestiya Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii. — 2016. — № 217. — P. 108—119 (in Russian).
6. *Anikin, A. A.* Razrabotka nauchnyh metodov povysheniya prohodimosti po snegu osobo legkih gusenichnyh mashin : dis. ... d-ra tekhn. nauk : 05.05.03 / Anikin Aleksej Aleksandrovich. — Nignii Novgorod, 2010. — 309 p. (in Russian).
7. *Barakhtanov, L. V.* Povyshenie prohodimosti gusenichnyh mashin po snegu : dis. d-ra ... tekhn. nauk : 05.05.03 / Barakhtanov Lev Vasil'evich. — Gor'kij, 1988. — 352 p. (in Russian).
8. *Belyakov, V. V.* Vzaimodejstvie so snezhnym pokrovom ehlastichnyh dvizhitelej spetsial'nyh transportnyh sredstv : dis. ... d-ra tekhn. nauk : 05.05.03 / Belyakov Vladimir Viktorovich. — Nignii Novgorod, 1999. — 485 p. (in Russian).
9. *Donato, I. O.* Prohodimost' kolesnyh mashin po snegu / I. O. Donato. — Moskva : Izd-vo MGTU im. N. E.H. Bauman, 2006. — 231 p. (in Russian).
10. Fiziko-mekhanicheskie svojstva snezhnogo pokrova // Vse o remonte i stroitel'stve [EHlektronnyj resurs]. — 2016. — URL:<http://stroj-archive.ru/dorozhnye-mashiny/977-fiziko-mekhanicheskie-svoystva-snezhnogo-pokrova.html>. — (02.04.2019) (in Russian).
11. *Donato, I. O.* Raschet soprotivleniya dvizheniyu kolesnyh mashin po snegu / I. O. Donato // Izvestiya VUZov. Ser. «Mashinostroenie». — 2007. — № 2. — P. 42—46 (in Russian).
12. *Larin, V. V.* Metody prognozirovaniya i povysheniya opornoj prohodimosti mnogoosnyh kolesnyh mashin na mestnosti : dis. ... d-ra tekhn. nauk : 05.05.03 / Larin Vasilij Vasil'evich. — Moskva, 2007. — 530 p. (in Russian).
13. *Oskolkov, S. G.* Zimmie lesovoznye dorogi / S. G. Oskolkov. — Krasnoyarsk : STI, 1977. — 104 p. (in Russian).
14. *Rohani, B.* Correlation of mobility cone index with fundamental engineering properties of soil / B. Rohani, G. Y. Baladi. — U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station, 1981. — 41 p.
15. Ecoefficient timber forwarding on lowland soft soils / T. Porsinsky, T. Pentek, A. Bosner, I. Stankic // In Global Perspectives on Sustainable Forest Management. — Okia, C. A., Ed.; InTech : Rijeka, Croatia, 2012. — P. 69—79.
16. *Saarilahti, M.* Modelling of the wheel and tyre. Tyre and soil contact — Survey on tyre contact area and ground pressure models for studying the mobility of forest tractors / M. Saarilahti. — Helsinki, 2002. — Soil interaction model, Appendix Report. — № 5. — P. 1—43.

17. *Aleksandrov, A. V.* Soprotivlenie materialov: Uchebnik dlya vuzov. — 4-e izd., ispr. / A. V. Aleksandrov, V. D. Potapov, B. P. Derzhavin. — Moskva : Vyssh. shk., 2004. — 560 p. (in Russian).
18. Model' dlya otsenki radial'noj deformatsii koleasa lesnoj mashiny s uchetom deformatsii pochvogrunta / E. G. Khitrov, I. V. Grigor'ev, V. A. Makuev, A. M. Khakhina, S. Yu. Kalinin // Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa — Lesnoj vestnik. — 2015. — Vol. 19, № 6. — P. 87—90 (in Russian).
19. *Muro, T.* Terramechanics: Land Locomotion Mechanics / T. Moro. — CRC Press, 2004. — 322 p.
20. *Wong, J. Y.* Terramechanics and off-road vehicle engineering: terrain behaviour off-road vehicle performance and design / J. Y. Wong // Elsevier second ed., 2010. — 488 p.
21. *Wong, J. Y.* Theory of ground vehicles / J. Y. Wong // John Wiley and Sons, New Jersey, fourth edition, 2008. — 528 p.
22. *Williams, R. C.* Comparison of Laboratory Wheel-Tracking Test Results with WES Track Performance / R. C. Williams, B. Prowell // Transportation Research Record. — 1990. — P. 121—128.
23. Correction of resistance to penetration by pedofunctions and a reference soil water content / M. T. Moraes, H. Debiassi, J. C. Franchini, V. R. Silva // R. Bras. Ci. Solo. — 2012. — № 36 (6). — P. 1395—1406.
24. *Senneset, K.* Strength and deformation parameters from cone penetration tests / K. Senneset, N. Janbu, G. Svano // Proceedings of the European Symposium on Penetration Testing. ESOPT — II. — Amsterdam, 1982. — P. 863—870.
25. *Van Impe, W. F.* The evaluation deformation and bearing capacity parameters of foundations from static CPT-results / W. F. Van Impe // Proc. Fourth Int. Geotechnical seminar, Filed instrumentation and in-site measurements. — Singapore, 1986. — P. 51—70.
26. Penetrometer techniques in relation to soil compaction and root growth / A. G. Bengough, D. J. Campbell, M. F. O'Sullivan and K. A. Smith, C. E. Mullins (eds.) // Soil and Environmental Analysis (2nd ed.), Marcel Dekker. — New York, 2001. — P. 377—403.
27. Correction of cone index for soil water content differences in a coastal plain soil / W. J. Busscher, P. J. Bauer, C. R. Camp, R. E. Sojka // Soil, Tillage Research. — 1997. — № 43 (3—4). — P. 205—217.
28. *Dexter, A. R.* A method for prediction of soil penetration resistance / A. R. Dexter, E. A. Czyz, O. P. Gate // Soil, Tillage Research. — 2007. — № 93. — P. 412—419.
29. Development on research of soft-terrain machine systems / J. Li, H. Huang, Y. Wang, L. Tian, L. Ren // Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery. — 2015. — № 46. — P. 306—320.
30. Sinkage of wire mesh wheel under light load. Jilin Daxue Xuebao (Gongxueban) / J. Li, H. Huang, Z.-L. Dang, M. Zou, Y. Wang // Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition). — 2015. — № 45. — P. 167—173.
31. *Sandu, C.* Experimental study on the contact patch pressure and sinkage of a lightweight vehicle on sand / C. Sandu, E. Worley, M. Morgan // Journal of Terramechanics. — 2010. — № 47. — P. 343—359.