

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 540:631.4

DOI:10.18324/2077-5415-2020-1-66-71

Методика и результаты экспериментальных исследований 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, пр. Тихорецкий, 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 09.01.2020, принята 07.02.2020

Известно, что условия леса требуют использования машин повышенной проходимости. Кроме этого, масштабы лесного фонда России и плохо развитая сеть лесных дорог приводят к необходимости передвижения на достаточно дальние расстояния в условиях полного бездорожья. В Российской Федерации на заготовках древесины используются тяжелые лесопромышленные тракторы на колесном или гусеничном ходу. В условиях плохой несущей способности почвогрунтов современные колесные машины могут оснащаться специальными гусеницами, существенно повышающими проходимость, но в лесозаготовительном производстве и особенно в лесном хозяйстве есть много задач, для выполнения которых требуется оперативно перемещаться по лесным угодьям на дальние расстояния без необходимости перемещения тяжелых грузов, таких, как пачка лесоматериалов. К подобным задачам относятся, например, сбор пищевой продукции леса, бортничество и пчеловодство, подсочка, осмотр лесосек в натуре, противопожарное и фитопатологическое патрулирование, проверка лесных культур в отдаленных местах, отвод лесосек, использование леса в научно-исследовательских целях и т. д. Отдельную категорию профессиональных пользователей легких вездеходов в лесу составляют работники охотничьих хозяйств, в их задачу входят подкормка и учет животных, пресечение деятельности браконьеров и т. д. Использовать тяжелую технику для решения перечисленных задач нецелесообразно как минимум по следующим причинам. Во-первых, масса машины во многом коррелируется с ее стоимостью, т. е. тяжелые машины более дорогие. Во-вторых, тяжелые машины более энергоемки, и расходы на их эксплуатацию существенно больше, нежели на легкие машины. В-третьих, тяжелые машины при перемещении по лесу наносят ощутимый вред почвам и живому напочвенному покрову, что отрицательно сказывается на лесовосстановлении и в принципе недопустимо при работе, например, в особо охраняемых природных территориях. В статье приведены методика и результаты экспериментальных исследований воздействия движителей колесных вездеходных машин на лесные почвогрунты.

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

Methods and results of experimental studies of 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 09.01.2020, accepted 07.02.2020

It is known that forest conditions require the use of all-terrain vehicles. In addition, the scale of the Russian forest fund and poorly developed network of forest roads make it necessary to travel quite long distances under conditions of complete off-road. In the Russian Federation, heavy-duty wheeled or caterpillar tractors are used in timber harvesting. In conditions of poor bearing capacity of soil, modern wheeled vehicles can be equipped with special tracks that significantly increase cross-country ability, but there are many tasks

in logging and especially in forestry that require quickly moving over long distances without any need to move heavy loads such as a bundle of timber. Such tasks include, for example, collecting food products from the forest, apiculture and beekeeping, tapping, inspecting the cutting areas in kind, fire and phytopathological patrols, checking forest crops in remote places, taking out the cutting areas, using the forest for research purposes, etc. A separate category of professional users of light all-terrain vehicles in the forest is made up of hunters whose tasks include feeding and keeping animals, suppressing the activities of poachers, etc. For the solution of the above tasks, it is inappropriate to use heavy equipment at least for the following reasons. Firstly, the mass of the machine is largely correlated with its cost, that is, heavy machines are more expensive. Secondly, heavy machines are more energy-intensive, and the cost of their operation is significantly higher than for light vehicles. Thirdly, heavy vehicles, when moving through the forest, cause significant damage to soils and living ground cover, which negatively affects reforestation and, in principle, is unacceptable when working, for example, in specially protected natural areas. The article presents the methodology and results of experimental studies of the impact of moving of wheeled all-terrain vehicles on forest soil.

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

Введение. Целью экспериментов являлась проверка результатов теоретических исследований по изучению показателей взаимодействия движителя сверхнизкого давления с лесной и заболоченной почвой [1].

Был проведен производственный эксперимент в условиях Тверской области, в ходе которого изучалось колеобразование под воздействием движителя вездехода «Шаман», производимого ООО «Авторос» (Москва), отдельно на участках со слабонесущей лесной почвой III категории прочности и на участках с заболоченным грунтом. Для определения модуля общей деформации опорной поверхности (характеристика опорной поверхности при реализации теоретической модели) выполнены исследования кернов почвогрунта в лаборатории Ухтинского государственного технического университета.

При составлении плана и обработке результатов эксперимента использованы рекомендации работ [2–6].

Разработанная теоретическая модель взаимодействия движителя сверхнизкого давления с почвой [1] позволяет проводить расчет глубины колеи и оценку проходимости колесного вездехода. Математическая модель использует следующие параметры движителя: ширина и диаметр колеса, число колес, проходящих по следу, рабочее давление в шине, скорость вездехода и нагрузка на единичный движитель.

Цель работы: оценить адекватность математической модели, позволяющей обосновывать средообразующие параметры движителей колесных вездеходов, исходя из требования минимизации негативного воздействия на лесные почвы.

Материалы и методы исследования. Производственный и лабораторный эксперименты воздействия колесных вездеходных машин на лесные почвогрунты. Статистический анализ полученных результатов экспериментов.

Результаты исследования. Испытания выполнены на прямолинейных трассах длиной 100 м, разбитых на пикеты через каждые 10 м. Опорные поверхности экспериментальных трасс представлены слабонесущей лесной почвой III категории прочности и заболоченным лесным грунтом. В каждой контрольной точке экспериментальных трасс отбирали три образца почвы для определения модуля общей деформации. В тех же контрольных точках измеряли глубину колеи, образовавшейся под воздействием колесного движителя. Методика замера глубины колеи при помощи мерной рейки изложена в работах [7].

В табл. 1 и 2 представлены условия проведения опытов по изучению колеобразования при работе вездехода, оснащенного колесным движителем сверхниз-

кого давления, на трассах со слабонесущей лесной почвой и заболоченным грунтом.

Таблица 1. Условия проведения опытов по исследованию глубины колеи на лесной почве

Грунт	G_w , МН	p_w , МПа	v , м/с
Слабонесущий лесной почвогрунт III категории прочности	$5,42 \cdot 10^{-3}$ (груженный вездеход)	0,02	7
	$4,58 \cdot 10^{-3}$ (порожний вездеход)	0,06	1,4
	$5,42 \cdot 10^{-3}$ (груженный вездеход)	0,06	1,4
	$5,42 \cdot 10^{-3}$ (груженный вездеход)	0,04	1,4
	$4,58 \cdot 10^{-3}$ (порожний вездеход)	0,02	1,4
	$5,42 \cdot 10^{-3}$ (груженный вездеход)	0,06	7
	$5,42 \cdot 10^{-3}$ (груженный вездеход)	0,04	1,4
	$4,58 \cdot 10^{-3}$ (порожний вездеход)	0,02	1,4

Таблица 2. Условия проведения опытов по исследованию глубины колеи на заболоченном грунте

Грунт	G_w , МН	p_w , МПа	v , м/с
Задренованная поверхность лесного болота	$5,42 \cdot 10^{-3}$ (груженный вездеход)	0,02	1,4
	$5,42 \cdot 10^{-3}$ (порожний вездеход)	0,06	1,4
	$4,58 \cdot 10^{-3}$ (груженный вездеход)	0,02	1,4
	$5,42 \cdot 10^{-3}$ (груженный вездеход)	0,02	7
	$5,42 \cdot 10^{-3}$ (порожний вездеход)	0,04	1,4

Грунт	G_w , МН	p_w , МПа	ν , м/с
	вездеход)		
Задернованная поверхность лесного болота	$5,42 \cdot 10^{-3}$ (груженный вездеход)	0,06	7
	$4,58 \cdot 10^{-3}$ (груженный вездеход)	0,06	1,4
	$4,58 \cdot 10^{-3}$ (порожний вездеход)	0,04	1,4

Таблица 3. Результаты исследования глубины колеи на экспериментальном волокне № 1 (лесной почвогрунт III категории, $G_w = 5,42 \cdot 10^{-3}$ МН, $p_w = 0,02$ МПа, $\nu = 7$ м/с)

E , МПа		$h_{\text{эксп}}$, м		$h_{\text{теор.}}$, м
среднее	стандартное отклонение S	среднее	стандартное отклонение S	
0,3797	0,060	0,0558	0,0146	0,0513
0,3517	0,136	0,0472	0,0280	0,0580
0,3780	0,036	0,0468	0,0112	0,0517
0,2907	0,058	0,0632	0,0329	0,0785
0,4060	0,078	0,0550	0,0192	0,0461
0,4483	0,076	0,0580	0,0178	0,0394
0,3450	0,041	0,0500	0,0216	0,0598
0,4307	0,068	0,0282	0,0107	0,0420
0,3503	0,091	0,0428	0,0183	0,0584
0,4247	0,087	0,0506	0,0158	0,0430

Таблица 4. Результаты исследования глубины колеи на экспериментальном волокне № 2 (лесной почвогрунт III категории, $G_w = 4,58 \cdot 10^{-3}$ МН, $p_w = 0,06$ МПа, $\nu = 1,4$ м/с)

E , МПа		$h_{\text{эксп}}$, м		$h_{\text{теор.}}$, м
среднее	стандартное отклонение S	среднее	стандартное отклонение S	
0,4753	0,051	0,0364	0,0100	0,0327
0,3717	0,088	0,0462	0,0218	0,0483
0,4203	0,100	0,0448	0,0178	0,0397
0,3717	0,073	0,0506	0,0164	0,0483
0,3510	0,099	0,0606	0,0338	0,0529
0,3567	0,134	0,0312	0,0201	0,0516
0,4420	0,109	0,0402	0,0132	0,0367
0,3713	0,087	0,0342	0,0168	0,0484
0,3713	0,112	0,0462	0,0269	0,0484
0,4420	0,078	0,0520	0,0162	0,0367

Обработку опытных данных выполняли по стандартной статистической методике в лицензионной версии программы Microsoft Excel 2013 на основе рекомендаций [4].

Опыты в лаборатории по определению механических свойств почвогрунта выполнены в Ухтинском государственном техническом университете.

Модуль общей деформации образцов лесной почвы и дернового слоя заболоченного грунта определяли мето-

дом компрессионного сжатия по методике [8; 9]. Диаметр кернов составлял 50 мм при высоте 150–200 мм.

Для экспериментов использован рычажный пресс с возможностью регулировки давления сжатия кернов с шагом 0,0025 МПа. Нагружение кернов почвы производили последовательно, ступенями, соответствовавшими сжимающему давлению 0,0125; 0,025; 0,05; 0,1 и 0,15 МПа. На каждой ступени давления регистрировали показания прибора для измерения вертикальной деформации керна грунта.

В табл. 3, 4 представлены средние значения глубины колеи в контрольных точках волоков с опорной поверхностью в виде слабонесущей лесной почвы III категории прочности. Экспериментальные данные сопоставлены с результатами теоретических расчетов, полученными с использованием уравнений, представленных в [1].

Распределение модуля общей деформации почвогрунта по контрольным точкам волоков, зависимость теоретического и экспериментального значения средней глубины колеи от модуля деформации и результаты сопоставления теории [1] с экспериментом представлены на рис. 1, 2.

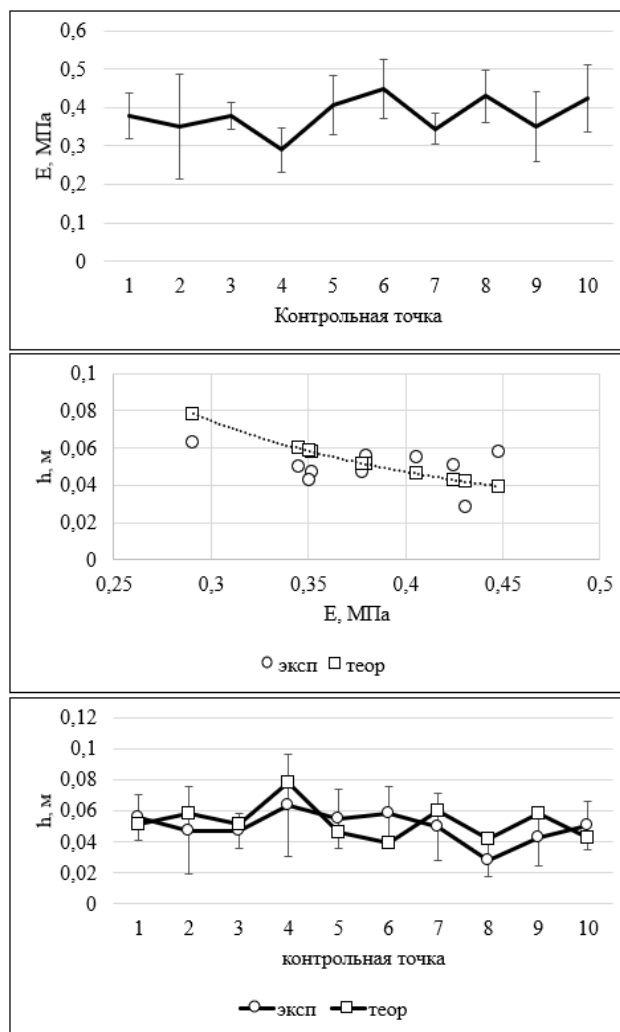


Рис. 1. Результаты исследования глубины колеи на экспериментальном волокне № 1 (лесной почвогрунт III категории, $G_w = 5,42 \cdot 10^{-3}$ МН, $p_w = 0,02$ МПа, $\nu = 7$ м/с)

В среднем абсолютное значение отклонения теоретической глубины колеи от экспериментальной на волокнах со слабонесущей лесной почвой III категории прочности составляет 20,6 %. Анализ табличных данных и графиков показывает, что практически во всех контрольных точках теоретические данные удовлетворительно согласуются с результатами эксперимента, поскольку отклонения находятся в пределах доверительных границ варьирования глубины колеи в опытах. Отклонения теории от эксперимента за пределами границы варьирования встречаются лишь при сравнительно малых значениях глубины колеи, что, по нашему мнению, объясняется погрешностью измерений. На основании изложенного приходим к выводу, что теоретическая модель [1] предсказывает результаты взаимодействия колесного движителя с лесным почвогрунтом с удовлетворительной точностью.

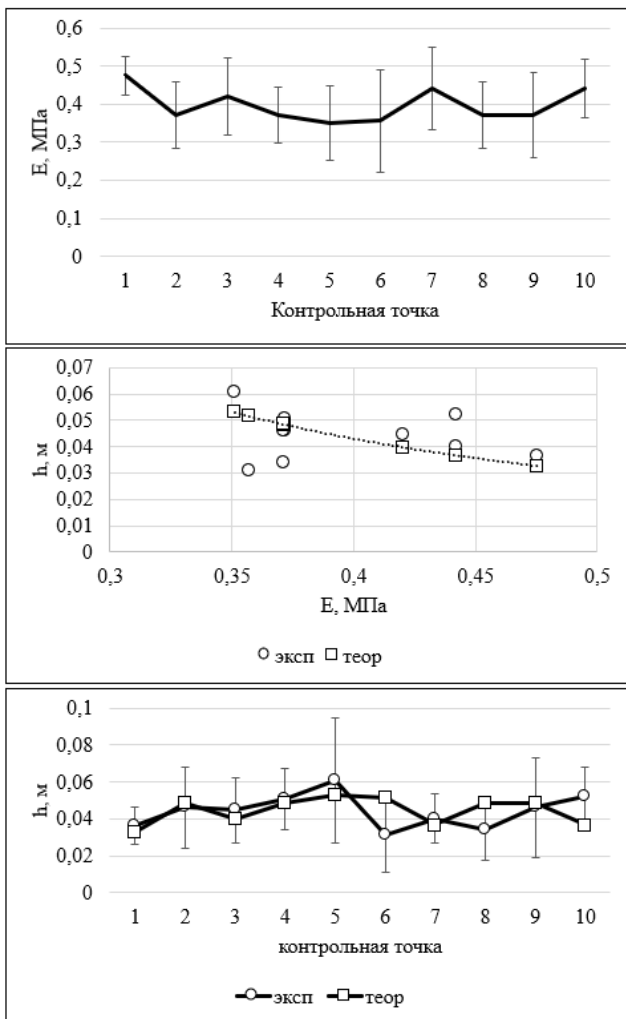


Рис. 2. Результаты исследования глубины колеи на экспериментальном волокне № 2 (лесной почвогрунт III категории, $G_w = 4,58 \cdot 10^{-3}$ МН, $p_w = 0,06$ МПа, $v = 1,4$ м/с)

В табл. 5, 6 представлены средние значения глубины колеи в контрольных точках волокон с опорной поверхностью в виде задернованного слоя лесного болота. Экспериментальные данные сопоставлены с результатами теоретических расчетов, полученными с использованием уравнений, приведенных в [1].

Таблица 5. Результаты исследования глубины колеи на экспериментальном волокне № 1 (заболоченный грунт, $G_w = 5,42 \cdot 10^{-3}$ МН, $p_w = 0,02$ МПа, $v = 1,4$ м/с)

E , МПа		$h_{\text{эксп.}}$, м		$h_{\text{теор.}}$, м
среднее	стандартное отклонение S	среднее	стандартное отклонение S	
0,3447	0,084	0,0736	0,0373	0,0884
0,3590	0,107	0,0628	0,0291	0,0925
0,4337	0,082	0,0612	0,0162	0,0750
0,4333	0,048	0,0612	0,0177	0,0751
0,3987	0,006	0,1128	0,0248	0,0823
0,4987	0,080	0,0800	0,0201	0,0642
0,3837	0,045	0,0658	0,0173	0,0859
0,4937	0,071	0,0806	0,0384	0,0649
0,3177	0,103	0,0678	0,0463	0,1060
0,4383	0,050	0,0994	0,0269	0,0741

Таблица 6. Результаты исследования глубины колеи на экспериментальном волокне № 2 (заболоченный грунт, $G_w = 5,42 \cdot 10^{-3}$ МН, $p_w = 0,06$ МПа, $v = 1,4$ м/с)

E , МПа		$h_{\text{эксп.}}$, м		$h_{\text{теор.}}$, м
среднее	стандартное отклонение S	среднее	стандартное отклонение S	
0,3667	0,040	0,1162	0,0487	0,1171
0,3967	0,117	0,1254	0,0533	0,1073
0,3120	0,019	0,1696	0,0975	0,1401
0,4220	0,014	0,1202	0,0406	0,1001
0,3730	0,061	0,1078	0,0371	0,1149
0,3893	0,098	0,0810	0,0302	0,1095
0,3737	0,138	0,1528	0,0797	0,1146
0,3907	0,047	0,0846	0,0271	0,1091
0,3877	0,115	0,0852	0,0635	0,1100
0,4497	0,079	0,0784	0,0190	0,0933

Распределение модуля общей деформации почвогрунта по контрольным точкам волокон, зависимость теоретического и экспериментального значения средней глубины колеи от модуля деформации и результаты сопоставления теоретических расчетов с экспериментом представлены на рис. 3, 4.

В среднем абсолютное значение отклонения теоретической глубины колеи от экспериментальной на волокнах с заболоченным грунтом составляет 22,1 %. Анализ табличных данных и графиков показывает, что практически во всех контрольных точках теоретические данные [1] согласуются с результатами эксперимента, поскольку отклонения находятся в пределах доверительных границ варьирования глубины колеи по опытам. Отклонения теоретических данных [1] от результатов эксперимента за пределами границы варьирования встречаются лишь при сравнительно малых значениях глубины образующейся колеи, что объясняется погрешностью измерений. На основании изложенного делаем вывод, что разработанная теоретическая модель [1] достаточно точно предсказывает результаты взаимодействия колесного движителя с заболоченным грунтом.

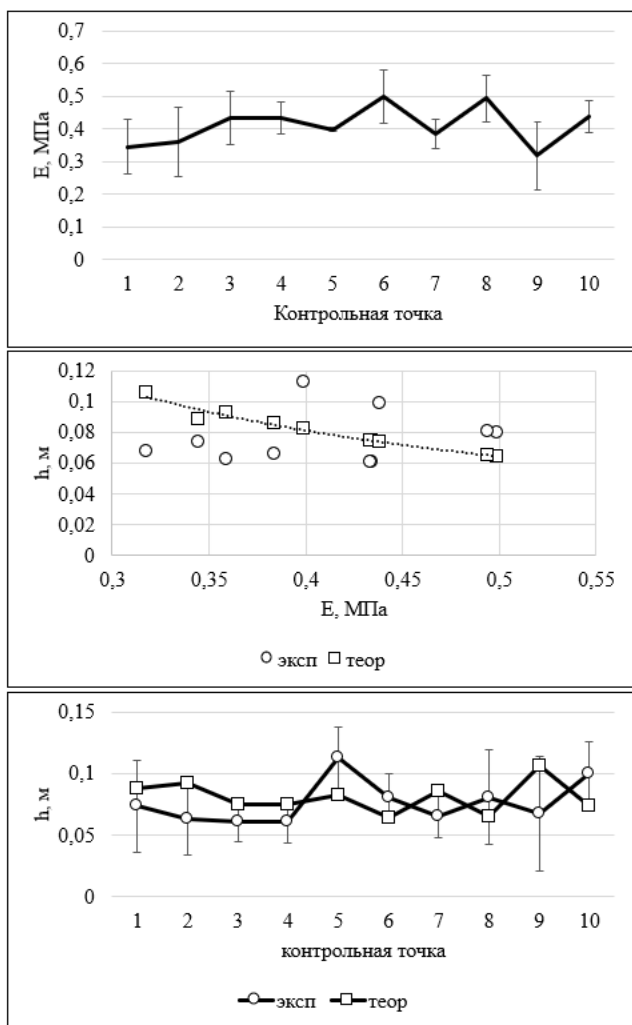


Рис. 3. Результаты исследования глубины колеи на экспериментальном волокне № 1 (заболоченный грунт, $G_w = 5,42 \cdot 10^{-3}$ МН, $p_w = 0,02$ МПа, $v = 1,4$ м/с)

Выводы. В среднем абсолютное значение отклонения теоретической глубины колеи, определенной по методике [1], от экспериментальной на волокнах со слабонесущей лесной почвой III категории прочности составляет 20,6 %. Анализ табличных данных и графиков показывает, что практически во всех контрольных точках теоретические данные [1] удовлетворительно согласуются с результатами эксперимента, поскольку отклонения находятся в пределах доверительных границ варьирования глубины колеи в опытах. Отклонения теории [1] от эксперимента за пределами границы варьирования встречаются лишь при сравнительно малых значениях глубины колеи, что, по нашему мнению, объясняется погрешностью измерений. На основании изложенного приходим к выводу, что теоретическая модель [1] предсказывает результаты взаимодействия колесного движителя с лесным почвогрунтом с хорошей точностью.

Литература

1. Бурмистрова О.Н., Тетеревлева Е.В., Куницкая О.А. Моделирование взаимодействия колесного движителя сверхнизкого давления со слабонесущей опорной поверхностью // Системы. Методы. Технологии. 2019. № 4 (44). С. 95–101.
2. Christopher T. Building Mathematical Models in Excel: A

В среднем абсолютное значение отклонения теоретической глубины колеи, полученной по методике расчета [1], от экспериментальной на волокнах с заболоченным почвогрунтом составляет 22,1 %. Анализ табличных данных и графиков показывает, что практически во всех контрольных точках теоретические данные [1] согласуются с результатами эксперимента, поскольку отклонения находятся в пределах доверительных границ варьирования глубины колеи по опытам. Отклонения теоретических данных [1] от результатов эксперимента за пределами границы варьирования встречаются лишь при сравнительно малых значениях глубины образующей колеи, что объясняется погрешностью измерений. На основании изложенного делаем вывод, что разработанная в [1] теоретическая модель достаточно точно предсказывает результаты взаимодействия колесного движителя вездехода с заболоченным почвогрунтом.

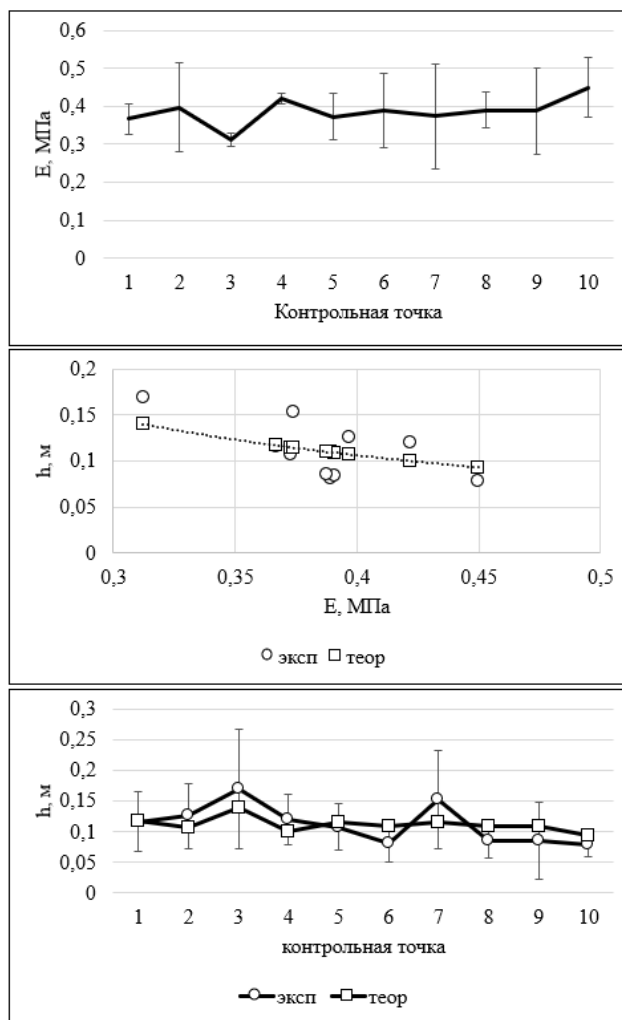


Рис. 4. Результаты исследования глубины колеи на экспериментальном волокне № 2 (заболоченный грунт, $G_w = 5,42 \cdot 10^{-3}$ МН, $p_w = 0,06$ МПа, $v = 1,4$ м/с)

3. Guide for Agriculturists. Universal Publishers, 2015. 352 p.
3. Григорьев И.В., Цыгарова М.В., Жукова А.И., Лепилин Д.В., Есин Г.Ю. Планирование эксперимента при исследовании взаимодействия трелевочной системы с волокном // Вестн. Марий. гос. техн. ун-та. Сер. Лес. Экология. Природопользование. 2011. № 2. С. 47–54.

4. Козлов А.Ю. Статистический анализ данных в MS Excel. М.: ИНФРА-М, 2014. 320 с.
5. Реброва И.А. Теория планирования эксперимента. Омск: СибАДИ, 2016. 106 с.
6. Юдин Ю.В., Майсурадзе М.В., Водолазский Ф.В. Организация и математическое планирование эксперимента. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2018. 124 с.
7. Хитров Е.Г. Повышение эффективности трелевки обоснованием показателей работы лесных машин при оперативном контроле свойств почвогрунта: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Архангельск, 2015. 20 с.
8. ГОСТ 12248-2010 Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости. М.: Стандартинформ, 2011.
9. ГОСТ 30672-99. Грунты. Полевые испытания: межгос. стандарт. М., 2000.
2. Christopher T. Building Mathematical Models in Excel: A Guide for Agriculturists. Universal Publishers, 2015. 352 p.
3. Grigor'ev I.V., Cygarova M.V., Zhukova A.I., Lepilin D.V., Esin G.YU. Experiment planning in the study of the interaction of the traction system with the drag // Bulletin of the Mari state technical University. Series: The Forest. Ecology. Nature management. 2011. № 2. P. 47–54.
4. Kozlov A.YU. Statistical analysis of data in MS Excel. M.: INFRA-M, 2014. 320 p.
5. Rebrova I.A. Theory of planning an experimental one. Omsk: SibADI, 2016. 106 p.
6. YUdin YU.V., Majsuradze M.V., Vodolazskij F.V. Organization and mathematical planning of the experiment. Ekaterinburg: Izd-vo Ural. un-ta, 2018. 124 p.
7. Hitrov E.G. Improving the efficiency of skidding by justifying the performance of forest tires in the operational control of soil properties: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. Arhangel'sk, 2015. 20 p.

References

1. Burmistrova O.N., Teterleva E.V., Kunickaya O.A. Modeling of interaction of a wheel drive of ultra-low pressure with a weak support surface // Systems. Methods. Technologies. 2019. № 4 (44). P. 95-101.
8. ГОСТ 12248-2010 Soils. Methods for laboratory determination of strength and deformability characteristics. M.: Standartinform, 2011.
9. ГОСТ 30672-99. Interstate standard. Soils. Field trial: mezh-gos. standart. M., 2000.