

Экспериментальное исследование колеобразования и уплотнения снега под воздействием колесного форвардера

А.В. Андронов^{1а}, Г.С. Тарадин^{1б}, В.А. Иванов^{2с}, М.В. Степанищева^{2д}, А.Ю. Жук^{2е}

¹ Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, пер. Институтский, 5, Санкт-Петербург, Россия

² Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, Братск, Россия

^а andronovalexandr@gmail.com, ^б grisha190@mail.ru, ^с ivanovva55@mail.ru,

^д marina01031977@inbox.ru, ^е zhuk30@mail.ru

^а <https://orcid.org/0000-0002-1035-9231>, ^б <https://orcid.org/0000-0003-0338-0099>, ^с <https://orcid.org/0000-0003-0707-972X>,

^д <https://orcid.org/0000-0003-4867-3901>, ^е <https://orcid.org/0000-0002-1808-245X>

Статья поступила 20.05.2020, принята 23.05.2020

Цель работы — верификация теоретических разработок и моделей, предназначенных для расчета глубины колеи и уплотнения снежного покрова под воздействием движителей лесных машин. Исследование основано на использовании методов планирования и проведения производственного эксперимента, методов статистической обработки результатов производственных испытаний. Эксперименты по исследованию колеобразования и уплотнения снега под воздействием движителя были выполнены в производственных условиях АО «Бабаяевский леспромхоз» (Вологодская обл.) зимой 2018–2019 гг. Для опытов был использован колесный форвардер John Deere 1210G. Опыты проведены на экспериментальных трассах длиной 100 м, разбитых на пикеты кратно 25 м. Выполнены исследования на трассах с рыхлой снежной целиной, где глубина снежного покрова составляла ориентировочно 50 см, на трассах со слежавшимся снегом средней плотности, со снежным покровом ориентировочно 30–35 см. Эксперименты проведены при оснащении форвардера моногусеницами EcoTrack, а также без них. Загрузка кузова форвардера составляла 0,50 и 100 % от его объема. Оснащенность и загрузка кузова подбирались таким образом, чтобы покрыть возможно более широкий спектр давления движителя на опорную поверхность (диапазон в опытах составлял 0,026–0,071 МПа). После прохода форвардера возле каждой из контрольных точек определяли плотность снега после воздействия движителя и глубину колеи. Анализ данных показывает, что максимальное отклонение теоретических значений плотности рыхлого снега после воздействия движителя от экспериментальных не превышает 6,5 %, слежавшегося снега — 7 %. Максимальное отклонение теоретического значения глубины колеи от экспериментального на рыхлом снегу составило 12,5 %, на слежавшемся — 14 %. Отклонения находятся в пределах доверительных границ вариации экспериментальных величин, поэтому сходимость теоретических и экспериментальных значений признана удовлетворительной.

Ключевые слова: лесные машины; трелевка; заснеженная опорная поверхность; воздействие движителя; давление на грунт.

An experimental study of rutting and snow compaction under the impact of a wheeled forwarder

A. V. Andronov^{1а}, G.S. Taradin^{1б}, V.A. Ivanov^{2с}, M.V. Stepanishcheva^{2д}, A.Y. Zhuk^{2е}

¹ St. Petersburg State Forest Technical University under name of S.M. Kirov; 5, Institutsky per., St. Petersburg, Russia

² Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia

^а andronovalexandr@gmail.com, ^б grisha190@mail.ru, ^с ivanovva55@mail.ru,

^д marina01031977@inbox.ru, ^е zhuk30@mail.ru

^а <https://orcid.org/0000-0002-1035-9231>, ^б <https://orcid.org/0000-0003-0338-0099>, ^с <https://orcid.org/0000-0003-0707-972X>,

^д <https://orcid.org/0000-0003-4867-3901>, ^е <https://orcid.org/0000-0002-1808-245X>

Received 20.05.2020, accepted 23.05.2020

The purpose of the work is the verification of theoretical developments and models designed to calculate the track depth and snow cover compaction under the influence of forest machine movers. The study is based on the use of methods of planning and conducting a production experiment, methods of statistical processing of the results of production tests. Experimental part of the study was carried out in forest harvesting area of JSC «Babayevsky Lespromkhoz» (Vologda region) in the winter of 2018–2019. For the experiments, a wheeled forwarder John Deere 1210G was used. The experiments were carried out on experimental tracks 100 m long, divided into pickets multiple of 25 m. Studies were carried out on tracks with loose snow, where the depth of snow cover was approximately 50 cm, on tracks with packed snow of medium density with snow cover approximately 30–35 cm. The experiments were carried out when equipping the forwarder with EcoTrack mono-tracks, as well as without them. The loading of the forwarder body was 0.50 and 100% of its volume. The equipment and loading of the body were selected in such a way as to cover the widest possible range of propulsion pressure on the supporting surface (the range in the experiments was 0.026–0.071 MPa). After the forwarder passed near each of the control points, the snow density was determined after the action of the mover and the track depth. An analysis of the data shows that the maximum deviation of the theoretical values of the density of loose snow after exposure to movers from the experimental does not exceed 6.5%, packed snow - 7%. The maximum deviation of the theoretical value of the rut depth from the experimental value on loose snow

was 12.5%, on the packed snow - 14%. Deviations are within the confidence limits of the variation of experimental values; therefore, the convergence of theoretical and experimental values is considered satisfactory.

Keywords: forestry machines; skidding; snow-covered surface; vehicle impact; ground pressure.

Введение. В нашей стране колоссальные объемы древесины заготавливаются в зимних условиях. Лесозаготовительная техника работает в условиях заснеженных лесосек, причем толщина снежного покрова может составлять 50 см и более. Снег под воздействием движителей машин уплотняется, что вызывает заметное изменение его механических свойств [1].

Особенностям взаимодействия движителя с упрочняющейся заснеженной опорной поверхностью посвящены труды многих ученых, но современные исследования ориентированы в основном на изучение проходимости военной и спасательной техники, сравнительно меньше изучены вопросы взаимодействия лесных машин со снегом.

Недостаток научно-обоснованных сведений осложняет процесс принятия решений по комплектованию парка лесных машин, сдерживает развитие разработки перспективных конструкций движителей лесных машин, обеспечивающих проходимость техники в условиях заснеженных лесосек. Таким образом, дальнейшие исследования в области колееобразования и уплотнения снега под воздействием движителей лесных машин актуальны для теории и практики лесозаготовительного производства.

В работе [1] на основе сведений [2; 6] нами получены теоретические зависимости глубины колеи h_f и уплотнения снега h :

$$h = \frac{(1 - \chi p) p C}{1 + (1 - \chi p) p C} H \quad (1)$$

$$h_f = \frac{(p + 2p_{z0})(1 - \chi p) p C + 1)^{b_{pz}}}{(p + 2p_{z0})(1 - \chi p) p C + 1)^{b_{pz}} - 2p} \cdot h, \quad (2)$$

где p — давление по пятну контакта движителя с опорной поверхностью; p_{z0} — несущая способность снежной целины; C — жесткость снега; χ — поправочный коэффициент увеличения жесткости при уплотнении; H — толщина снежного покрова.

Уравнения для C , χ , p_{z0} следующие [1]:

$$C = \frac{3}{4} \frac{J}{E_0}; \quad (3)$$

$$\chi = \frac{1}{4} \frac{J}{E_0} \frac{(aB + H)}{H} (b_E - 2); \quad (4)$$

$$p_{z0} = a_{pz} \rho_0^{b_{pz}}, \quad (5)$$

где J — коэффициент учета формы пятна контакта; a — коэффициент учета толщины снежного покрова; E_0 — модуль деформации целинного снега; a_{pz} , b_{pz} — числовые коэффициенты; ρ_0 — плотность целинного снега.

Значения E_0 , a , J рассчитаем по уравнениям [4]:

$$E_0 = a_E \rho_0^{b_E}; \quad (6)$$

$$a = 0,64 \frac{B + H}{H}; \quad (7)$$

$$J = \frac{0,03B + L}{0,6B + 0,43L}, \quad (8)$$

где B — ширина пятна контакта; L — длина пятна контакта движителя с опорной поверхностью; a_E , b_E — числовые коэффициенты.

Значения коэффициентов в уравнениях (5), (6) при температуре $-3 \dots -20$ °С: $a_E = 34,2$; $b_E = 2,51$; $a_{pz} = 1,74$; $b_{pz} = 1,98$ [5]. Величины p_{z0} , E_0 имеют размерность МПа, ρ_0 подставляется в г/см³.

Цель работы — верификация теоретических разработок и моделей, предназначенных для расчета глубины колеи и уплотнения снежного покрова под воздействием движителей лесных машин.

Материалы и методы исследования. Исследование основано на использовании методов планирования и проведения производственного эксперимента, методов статистической обработки результатов производственных испытаний.

Эксперименты по исследованию колееобразования и уплотнения снега под воздействием движителя были выполнены в производственных условиях АО «Бабаевский леспромхоз» (Вологодская обл.) зимой 2018–2019 гг.

Для опытов использован колесный форвардер John Deere 1210G с характеристиками, указанными в табл. 1.

Таблица 1. Характеристики форвардера, использованного при проведении экспериментов

| Показатель | Значение |
|-----------------------------|-------------|
| Мощность двигателя, кВт | 156 |
| Колесная формула | 8 x 8 |
| Передние шины | 710/26,5–20 |
| Задние шины | 710/26,5–20 |
| Длина, мм | 9 820 |
| Ширина, мм | 2 746 |
| Колесная база, мм | 4 900 |
| Дорожный просвет, мм | 660 |
| Грузоподъемность, т | 13 |
| Максимальная скорость, км/ч | 23 |
| Масса машины, кг | 18 080 |

Фотография форвардера, использованного в производственном эксперименте, представлена на рис. 1.



Рис. 1. Форвардер John Deere 1210G в условиях АО «Бабаевский леспромхоз»

Опыты проведены на экспериментальных трассах длиной 100 м, разбитых на пикеты кратно 25 м. Вы-

полнены исследования на трассах с рыхлой снежной целиной, где глубина снежного покрова составляла ориентировочно 50 см, на трассах со слежавшимся снегом средней плотности, со снежным покровом ориентировочно 30–35 см. Толщину снежного покрова определяли при помощи зонда, плотность снега определяли методом режущего кольца по методике [7; 8]. Возле каждой контрольной точки определяли три значения H и ρ_0 .

Эксперименты проведены при оснащении форвардера моногусеницами EcoTrack, а также без них. Загрузка кузова форвардера составляла 0,50 и 100 % от его объема. Оснащенность и нагрузка кузова подбирались таким образом, чтобы покрыть возможно более широкий спектр давления движителя на опорную поверхность. Расчетные значения давления p по методике [9–12] в опытах представлены в табл. 2.

Таблица 2. План эксперимента по изучению колеобразования и уплотнения снега под воздействием колесно-форвардера John Deere 1270G

| Условия опыта | p , МПа | Снежный покров |
|----------------------------------|-----------|----------------|
| Без моногусениц, порожний | 0,041 | Рыхлый, целина |
| С моногусеницами, порожний | 0,026 | » » |
| Без моногусениц, 100 % нагрузка | 0,071 | » » |
| С моногусеницами, 100 % нагрузка | 0,044 | » » |
| Без моногусениц, 50 % нагрузка | 0,056 | » » |
| С моногусеницами, 50 % нагрузка | 0,035 | » » |
| Без моногусениц, порожний | 0,026 | Слежавшийся |
| С моногусеницами, порожний | 0,026 | » |
| Без моногусениц, 100 % нагрузка | 0,071 | » |
| С моногусеницами, 100 % нагрузка | 0,044 | » |
| Без моногусениц, 50 % нагрузка | 0,056 | » |
| С моногусеницами, 50 % нагрузка | 0,035 | » |

После прохода форвардера возле каждой из контрольных точек определяли плотность снега после воздействия движителя ρ и глубину колеи h_f .

Плотность ρ определяли методом режущего кольца для кернов снега, взятых непосредственно из массива, подвергнутого уплотнению под воздействием движителя, выполняли по три измерения в каждой контрольной точке трассы. Глубину колеи h_f измеряли при помощи мерной рейки по методике [7; 8], также по три замера в контрольных точках.

Результаты экспериментов. На рис. 2 представлены графики, иллюстрирующие распределение плотности рыхлого снега на экспериментальных трассах № 1–6.

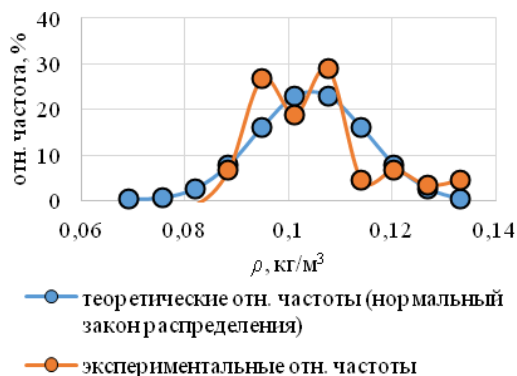


Рис. 2. Распределение плотности рыхлого снега на экспериментальных трассах

На рис. 3 представлены графики, иллюстрирующие распределение высоты рыхлого снежного покрова на экспериментальных трассах № 1–6.

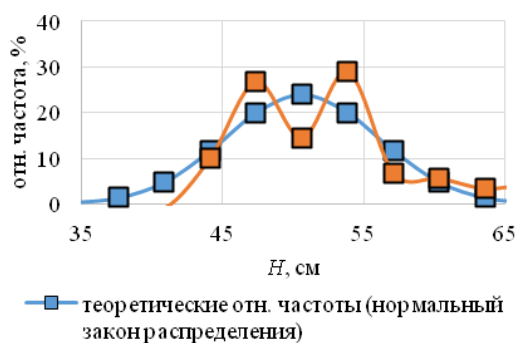


Рис. 3. Распределение высоты рыхлого снега на экспериментальных трассах

Аналогичные данные для слежавшегося снега на трассах № 7–12 представлены на рис. 4, 5.

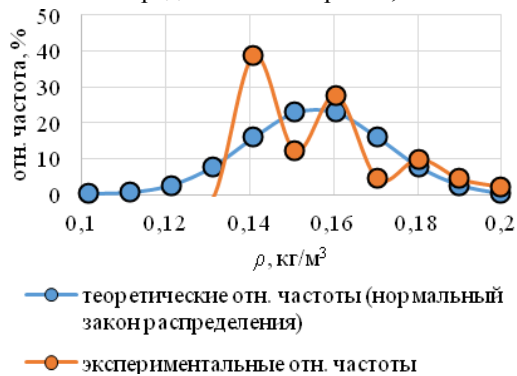


Рис. 4. Распределение плотности слежавшегося снега на экспериментальных трассах

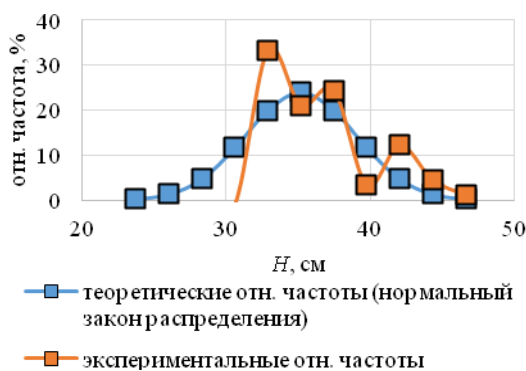


Рис. 5. Распределение высоты слежавшегося снежного покрова на экспериментальных трассах

Согласно результатам расчетов, плотность и высота рыхлого и слежавшегося снежного покрова являются нормально распределенными величинами.

Сводные данные по условиям опытов и характеристикам снежного покрова представлены в табл. 3.

Таблица 3. Сводные данные об условиях опытов и характеристиках снежного покрова

| Высота снежного покрова | | Начальная плотность снега | |
|-------------------------|----------|------------------------------|-------------------------|
| H , см | S , см | ρ_0 , г/см ³ | S , г/см ³ |
| 49,68 | 2,89 | 0,0993 | 0,00564 |
| 53,72 | 4,38 | 0,1075 | 0,00878 |
| 49,66 | 4,41 | 0,0993 | 0,00864 |
| 49,94 | 2,41 | 0,0999 | 0,00452 |
| 49,52 | 1,03 | 0,0989 | 0,00244 |
| 51,14 | 2,62 | 0,1019 | 0,00503 |
| 35,00 | 3,38 | 0,1504 | 0,01504 |
| 35,38 | 2,85 | 0,1516 | 0,01176 |
| 35,28 | 1,63 | 0,1511 | 0,00726 |
| 35,08 | 1,87 | 0,1500 | 0,00828 |
| 35,52 | 3,50 | 0,1523 | 0,01472 |
| 34,80 | 2,49 | 0,1489 | 0,01093 |

На рис. 6–9 представлены средние значения плотности снега до и после воздействия движителя и глубины колеи в контрольных точках экспериментальных трасс движения форвардера. Там же представлены результаты расчетов, выполненных по теоретическим уравнениям (1), (2), показывающие значения плотности рыхлого и слежавшегося снега после воздействия движителя колесного форвардера John Deere 1210G.

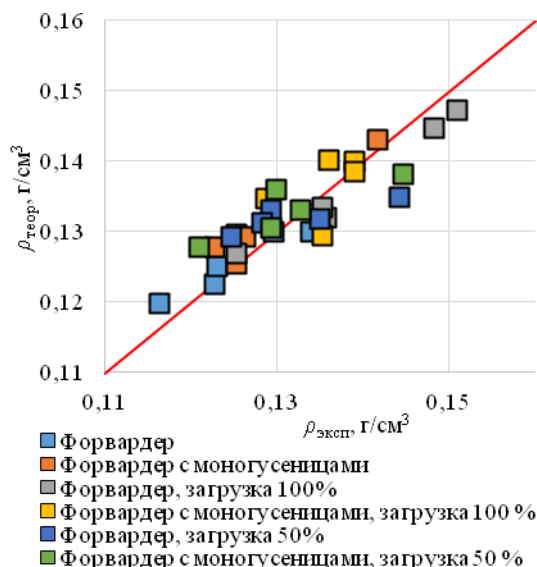


Рис. 6. Сопоставление теоретических и экспериментальных значений плотности снега после воздействия движителя форвардера John Deere 1210G (рыхлый снег)

Выводы и заключение. Анализ данных показывает, что максимальное отклонение теоретических значений плотности рыхлого снега после воздействия движителя от экспериментальных не превышает 6,5 %, слежавшегося — 7 %. Максимальное отклонение теоретического значения глубины колеи от экспериментального на рыхлом снегу составило 12,5 %, на слежавшемся —

14 %. Отклонения находятся в пределах доверительных границ вариации экспериментальных величин, поэтому сходимость теоретических и экспериментальных значений признаем удовлетворительной. Таким образом, теоретические уравнения (1), (2) для расчета глубины колеи и плотности снега под воздействием колесного движителя прошли верификацию при среднем давлении движителя на опорную поверхность в пределах от 0,026 до 0,071 МПа.

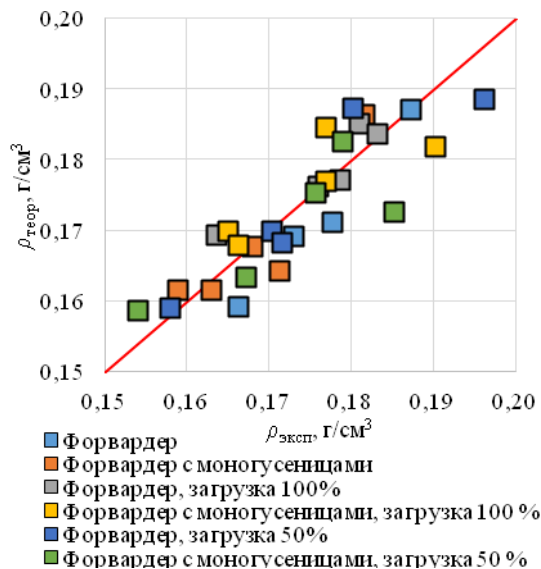


Рис. 7. Сопоставление теоретических и экспериментальных значений плотности снега после воздействия движителя форвардера John Deere 1210G (слежавшийся снег)

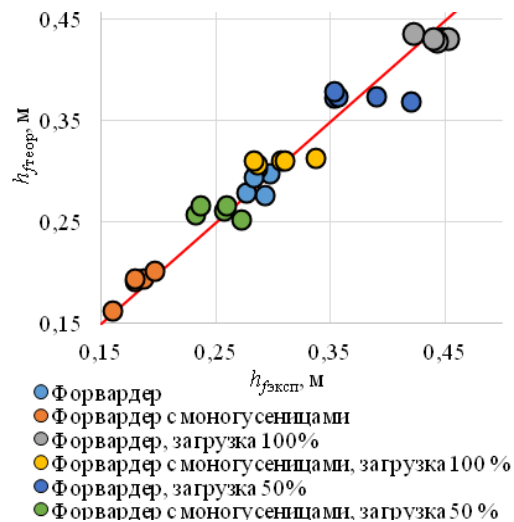


Рис. 8. Сопоставление теоретических и экспериментальных значений глубины колеи после воздействия движителя форвардера John Deere 1210G (рыхлый снег)

В дальнейших исследованиях следует уточнить результаты, получаемые при давлении движителя на опорную поверхность свыше 0,8 МПа. В перспективе целесообразно провести дальнейшую проверку и реализацию теоретических формул для расчета тягово-сцепных свойств движителей лесных машин при работе на снегу, основанных на результатах [1; 13; 14]. Это даст возможность исследовать вопрос об оптимизации параметров движителей и о повышении тягово-сцепных свойств машин за счет конструктивных реше-

ний в части обоснования параметров ходовой части. Отдельное направление представляет изучение профильной проходимости лесозаготовительной техники. На сегодняшний день эта область исследований проработана слабо, причиной чему является незавершенность научного описания опорной проходимости. Представляет интерес верификация результатов исследований сопоставлением с зарубежными источниками на основе подходов [14–17].

Перспективной областью исследования является изучение деформаций эластичного движителя колесных машин при работе на снегу, теоретическую основу которого возможно уточнить на базе [18–20]. Таким образом, станет возможным учесть влияние внутреннего давления в шине на показатели уплотнения, колеобразования и тягово-сцепные свойства колесных лесных машин и лесных машин, оснащенных колесно-гусеничными движителями. На основе таких исследований могут быть получены рекомендации по разработке перспективных движителей сверхнизкого давления, за счет оснащения которыми повысится опорная проходимость лесных машин.

Литература:

1. Khitrov E.G., Andronov A.V. Mathematical model of interaction between forest machine's rover and strengthening soil // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1177. 2019. P. 012030. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1177/1/012030>.
2. 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. 116–121.
3. Kochnev A., Khitrov E. Theoretical models for rut depth evaluation after a forestry machine's wheel passover // International Multidisciplinary Scientific Geo Conference Surveying Geology and Mining Ecology Management. SGEM 18. 2018. P. 1005–1012.
4. Агейкин Я.С. Проходимость автомобилей. М.: Машиностроение, 1981. 232 с.
5. Ларин В.В. Методы прогнозирования и повышения опорной проходимости многоосных колесных машин на местности: дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.03. Москва, 2007. 530 с.
6. Khitrov E.G., Andronov A.V., Martynov B.G., Spiridonov S.V. Interrelations of various soil types mechanical properties // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1177. 2019. P. 012032. URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1177/1/012032>
7. Божбов В.Е. Повышение эффективности процесса трелевки путем обоснования рейсовой нагрузки форвардеров: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.21.01. Архангельск: С(А)ФУ, 2015. 20 с.
8. Лухминский В.А. Совершенствование моделей и методов прогнозирования проходимости гусеничных лесных машин: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.21.01. Архангельск: С(А)ФУ, 2018. 20 с.
9. Porsinsky T., Pentek T., Bosner A., Stankic I. Ecoefficient timber forwarding on lowland soft soils // In Global Perspectives on Sustainable Forest Management. Okia, C.A., Ed.; InTech: Rijeka, Croatia, 2012. P. 69.
10. Saarilahti M. Modelling of the wheel and tyre. Tyre and soil contact – Survey on tyre contact area and ground pressure

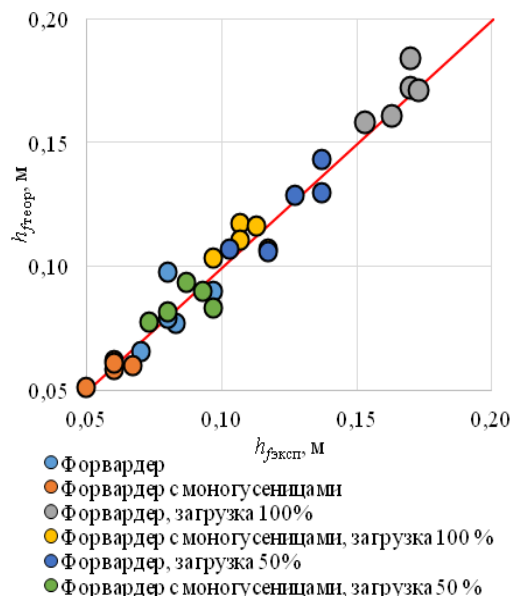


Рис. 9. Сопоставление теоретических и экспериментальных значений глубины колеи после воздействия движителя форвардера John Deere 1210G (слежавшийся снег)

- models for studying the mobility of forest tractors // Helsinki, 2002. Soil interaction model, Appendix Report. № 5. P. 1–43.
11. Wong J.Y. Terramechanics and off-road vehicle engineering: terrain behaviour off-road vehicle performance and design // Elsevier second ed, 2010. 488 p.
12. Wong J.Y. Theory of ground vehicles // John Wiley and Sons, New Jersey, fourth edition, 2008. 528 p.
13. Хитров Е.Г., Хахина А.М., Дмитриева М.Н., Песков В.Б., Григорьева О.И. Уточненная модель для оценки тягово-сцепных свойств колесного движителя лесной машины // Изв. С.-Петербург. лесотехн. акад. 2016. № 217. С. 108–119.
14. Ivanov V., Stepanishcheva M., Khitrov E., Iliushenko D. Theoretical model for evaluation of tractive performance of forestry machine's wheel // International Multidisciplinary Scientific Geo Conference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 18. 2018. P. 997–1004.
15. Khitrov E., Ivanov V., Stepanishcheva M., Kochnev A. Linking the deformation moduli and cone indices of forest and peatland soils // International Multidisciplinary Scientific Geo Conference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 18. 2018. P. 297–304.
16. Хитров Е.Г., Хахина А.М., Лухминский В.А., Казаков Д.П. Исследование связи конусного индекса и модуля деформации различных типов грунтов // Resources and Technology. 2017. Т. 14. № 4. С. 1–16.
17. Хитров Е.Г., Хахина А.М., Григорьев И.В., Григорьева О.И., Никифорова А.И. Расчет тягово-сцепных свойств колесных лесных машин с использованием WES-метода // Лесотехнический журн. 2016. Т. 6. № 3 (23). С. 196–202.
18. Хитров Е.Г., Григорьев И.В., Макуев В.А., Хахина А.М., Калинин С.Ю. Модель для оценки радиальной деформации колеса лесной машины с учетом деформации почвогрунта // Лесной вестн. Вестн. Московского гос. ун-та леса. 2015. Т. 19. № 6. С. 87–90.
19. Хитров Е.Г., Бартев И.М. Влияние угла поперечного наклона поверхности качения на тягово-сцепные свойства колесного движителя // Лесотехнический журн. 2016. Т. 6. № 4 (24). С. 225–232.
20. Хитров Е.Г., Бартев И.М. Расчет глубины колеи колесного движителя лесных тракторов на склонах // Лесотехнический журн. 2016. Т. 6. № 4 (24). С. 233–239.

References

1. Khitrov E.G., Andronov A.V. Mathematical model of interaction between forest machine's rover and strengthening soil // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1177. 2019. P. 012030. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1177/1/012030>.
2. Hitrov E.G., Peskov V.B., Kazakov D.P., Bozhbov V.E., Stepanishcheva M.V. Method of solving the problem of stamp indentation into inhomogeneous soil massif // Systems. Methods. Technologies. 2018. № 2 (38). P. 116–121.
3. Kochnev A., Khitrov E. Theoretical models for rut depth evaluation after a forestry machine's wheel passover // International Multidisciplinary Scientific Geo Conference Surveying Geology and Mining Ecology Management. SGEM 18. 2018. P. 1005–1012.
4. Agejkin YA.S. Permeability of cars. M.: Mashinostroenie, 1981. 232 p.
5. Larin V.V. Methods for predicting and increasing the reference passability of multi-axis wheeled vehicles on the ground: dis. ... d-ra tekhn. nauk: 05.05.03. Moskva, 2007. 530 p.
6. Khitrov E.G., Andronov A.V., Martynov B.G., Spiridonov S.V. Interrelations of various soil types mechanical properties // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1177. 2019. P. 012032. URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1177/1/012032>
7. Bozhbov V.E. Improving the efficiency of the skidding process by justifying the travel load of forwarders: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.21.01. Arhangel'sk: S(A)FU, 2015. 20 p.
8. Luhminskij V.A. Improving models and methods for predicting the permeability of tracked forest machines: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.21.01. Arhangel'sk: S(A)FU, 2018. 20 p.
9. Porsinsky T., Pentek T., Bosner A., Stankic I. Ecoefficient timber forwarding on lowland soft soils // In Global Perspectives on Sustainable Forest Management. Okia, C.A., Ed.; InTech: Rijeka, Croatia, 2012. P. 69.
10. Saarihahti 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 // Helsinki, 2002. Soil interaction model, Appendix Report. № 5. P. 1–43.
11. Wong J.Y. Terramechanics and off-road vehicle engineering: terrain behaviour off-road vehicle performance and design // Elsevier second ed, 2010. 488 p.
12. Wong J.Y. Theory of ground vehicles // John Wiley and Sons, New Jersey, fourth edition, 2008. 528 p.
13. Hitrov E.G., Hahina A.M., Dmitrieva M.N., Peskov V.B., Grigor'eva O.I. A refined model for evaluating the traction properties of a forest vehicle's wheel drive // Izvestia SPbL-TA. 2016. № 217. P. 108–119.
14. Ivanov V., Stepanishcheva M., Khitrov E., Iliushenko D. Theoretical model for evaluation of tractive performance of forestry machine's wheel // International Multidisciplinary Scientific Geo Conference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 18. 2018. P. 997–1004.
15. Khitrov E., Ivanov V., Stepanishcheva M., Kochnev A. Linking the deformation moduli and cone indices of forest and peatland soils // International Multidisciplinary Scientific Geo Conference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 18. 2018. P. 297–304.
16. Hitrov E.G., Hahina A.M., Luhminskij V.A., Kazakov D.P. Investigation of the relationship between the cone index and the modulus of deformation of various types of soils // Resources and Technology. 2017. V. 14. № 4. P. 1–16.
17. Hitrov E.G., Hahina A.M., Grigor'ev I.V., Grigor'eva O.I., Nikiforova A.I. Calculation of traction properties of wheeled forest vehicles using the WEB method // Forestry Engineering Journal. 2016. V. 6. № 3 (23). P. 196–202.
18. Hitrov E.G., Grigor'ev I.V., Makuev V.A., Hahina A.M., Kalinin S.YU. Model for estimating the radial deformation of the wheel of a forest machine taking into account the deformation of the soil // Moscow state forest university bulletin – Lesnoy vestnik. 2015. V. 19. № 6. P. 87–90.
19. Hitrov E.G., Bartenev I.M. Influence of the angle of the transverse slope of the rolling surface on the traction properties of the wheel engine // Forestry Engineering Journal. 2016. V. 6. № 4 (24). P. 225–232.
20. Hitrov E.G., Bartenev I.M. Raschet glubiny kolei kolesnogo dvizhitelya lesnyh traktorov na sklonah // Forestry Engineering Journal. 2016. V. 6. № 4 (24). P. 233–239.