

Е.Г. Хитров, Г.С. Тарадин, А.В. Андронов, Е.В. Котенев, Ю.Л. Пушков

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГЛУБИНЫ КОЛЕИ
И УПЛОТНЕНИЯ СНЕГА
ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ДВИЖИТЕЛЯ ЛЕСНОЙ МАШИНЫ**

Введение. В нашей стране значительный объем древесины заготавливается в условиях зимы, лесные машины работают на заснеженных и обледенелых опорных поверхностях, причем толщина снежного покрова может достигать до 1 м [Григорьев и др., 2008]. Проблематике взаимодействия движителей машин со снегом посвящены труды многих отечественных ученых, исторически сложились школы транспортного снеговедения, ведущая роль среди которых принадлежит нижегородской. Исследованы вопросы подвижности и проходимости специальных транспортных средств, спасательной и военной техники, предложены подходы к расчету показателей колеобразования, оценке тягово-сцепных свойств машин [Барахтанов и др., 2012; Беляков, 1999; Донато, 2007; Макаров, 2009; Мальгин, 1970; Молев, 1995; Шапкин, 2001; Ширяева и др., 2012]. К сожалению, работ в области изучения взаимодействия лесных машин со снегом известно сравнительно мало, ему посвящены отдельные главы [Зайчик и др., 1976]. Вместе с тем, в лесоинженерном деле возникают специфические задачи исследования и повышения проходимости тяжелой техники в условиях заснеженной лесосеки, усложненные цикличностью воздействия движителей на опорную поверхность. Для их решения необходимы дальнейшие исследования, одним из этапов которых является разработка математических моделей деформирования снега движителем лесной машины. Важно, что, с учетом последующего развития, модели должны строиться с использованием расчетных величин, имеющих ясный физический смысл [Анисимов и др., 1998]. Такую возможность предоставляет теория движения автомобильного транспорта в условиях бездорожья, на основе которой успешно развиваются подходы к описанию взаимодействия лесной техники с грунтом [Божбов, 2015; Устинов, 2016; Хахина, 2018; Хитров, 2015].

Цель статьи – разработать и исследовать математическую модель колеобразования и уплотнения снежной целины под воздействием движителя лесной машины на базе положений теории движения автомобильного транспорта в условиях бездорожья.

Материалы и методы: математический анализ, вычислительный эксперимент, аппроксимация расчетных данных.

Постановка задачи. Примем за основу уравнение для расчета глубины колеи, образующейся под воздействием движителя [Агейкин, 1981; Хитров и др., 2016]:

$$h = \int_0^{H-h} \frac{p_S}{p_S - \sigma} \cdot \frac{E}{E - \sigma} dz, \quad (1)$$

где H – мощность деформируемого слоя грунта (толщина), h – глубина колеи, p_S – несущая способность грунта, E – модуль деформации грунта, σ – нормальное напряжение в массиве грунта, z – вертикальная координата, отсчитываемая вниз от поверхности грунта.

Сжатие грунта определяют по формуле [Агейкин, 1981; Хитров и др., 2016]:

$$c = \int_0^{H-c} \frac{E}{E - \sigma} dz. \quad (2)$$

Функцию σ по z принимают с учетом затухания [Агейкин, 1981]:

$$\sigma = \frac{Jp}{1 + \left(\frac{z}{ab}\right)^2}, \quad (3)$$

где J – поправочный коэффициент, учитывающий соотношение ширины и длины пятна контакта движителя с грунтом, p – среднее нормальное давление движителя по поверхности пятна контакта, a – коэффициент учета мощности слоя грунта, b – ширина пятна контакта.

Для коэффициентов J , a известны формулы [Агейкин, 1981]:

$$J = \frac{0,03b + l}{0,43b + 0,6l}, \quad (4)$$

$$a = 0,64 \frac{b + H}{H}, \quad (5)$$

где l – длина пятна контакта.

Величины E , p_S , как правило, принимают постоянными, определяемыми типом и состоянием грунта. Тогда интеграл по уравнениям (1), (2) при функции σ (3) берется аналитически, затем уравнения численно решаются относительно h , c .

Также, в ряде случаев, p_S рассчитывают с учетом мощности слоя грунта [Ларин, 2007]:

$$p_S = p_{S0}(h) \cdot \alpha_z, \quad (6)$$

где $p_{s0}(h)$ – несущая способность слоя грунта неограниченной толщины, зависящая от его типа, состояния и глубины образующейся колеи, α_Z – коэффициент учета мощности слоя грунта [Ларин, 2007]:

$$\alpha_Z = 1 + \frac{H^* h}{2H \cdot (H - h - 0,25H^*)}; \quad (7)$$

$$H^* = \frac{\sqrt{2}}{2} \exp \left[\left(\frac{\pi}{4} + \frac{3\varphi}{4} \right) \tan \frac{3\varphi}{4} \right] b \cos \frac{3\varphi}{4} \tan \varphi, \quad (8)$$

где φ – угол внутреннего трения грунта.

Поскольку h теперь входит в формулу для расчета p_S , взятие интеграла по формуле (1) осложняется. Тем не менее, показано, что без существенной потери точности можно взять интеграл при постоянной величине p_S , а затем в полученное уравнение подставить выражения (6) – (8) и решить полученное уравнение относительно h .

Реже модуль E и p_S принимают как функции z , подход к решению подробно описан в данной статье [Хитров, 2018].

В случае, если машина движется по заснеженной поверхности, глубина образующейся колеи сопоставима с мощностью толщиной слоя снега, он уплотняется и упрочняется, таким образом, считать E , p_S постоянными величинами некорректно.

Согласно работе [Ларин, 2007], зависимость E [МПа] снега от плотности имеет вид степенной функции:

$$E = a_E \rho^{b_E}, \quad (9)$$

где ρ – плотность снега, г/см³; a_E , b_E – числовые коэффициенты.

Величину p_S [МПа] для снега с учетом результатов [Ларин, 2007], определим по формуле:

$$p_S = a_{pz} \rho^{b_{pz}} \cdot \alpha_Z, \quad (10)$$

где a_{pz} , b_{pz} – числовые коэффициенты.

Величина φ [°], входящая в уравнение для α_Z , также определяется степенной функцией [Ларин, 2007]:

$$\varphi = a_\varphi \rho^{b_\varphi}, \quad (11)$$

где a_φ , b_φ – числовые коэффициенты.

Уравнение для определения плотности упрочняющейся среды при сжатии под воздействием нормального давления ранее было получено в данной статье в следующем виде [Khitrov et al., 2019]:

$$\rho = \frac{1}{\left(\frac{a_E \rho_0^{b_E} + (b_E - 1) \sigma}{a_E \rho_0} \right)^{-\frac{1}{b_E - 1}}}, \quad (12)$$

где ρ_0 – начальная плотность среды.

Аналитическое взятие интегралов в уравнениях (1), (2) с учетом выражений (7)–(12) не представляется возможным.

Разложение правой части уравнения (2) в ряд Маклорена порядка $k = 2$ по z и последующее интегрирование дает удовлетворительную сходимость с результатом численного интегрирования исходного выражения в правой части уравнения. Однако решение полученного уравнения относительно c громоздко и не вполне удобно для использования.

Для исследования теории колееобразования и уплотнения снега под воздействием движителя лесной машины обратимся к вычислительному эксперименту. В качестве параметров примем значения ρ_0, H, B, L, p , равномерно распределенные в пределах интервалов, указанных в таблице. Целевыми функциями являются h, c как численные решения уравнений (1), (2), а также их упрощений при замене подынтегральных функций в правых частях рядами Маклорена по z , всего 4 серии расчетов по 1000 сочетаний параметров в каждой.

Значения коэффициентов в функциях E, p_z, φ от ρ : $a_E = 34,2$; $b_E = 2,51$; $a_\varphi = 29$; $b_\varphi = 0,253$; $a_{p_z} = 1,78$; $b_{p_z} = 1,94$ [Ларин, 2007].

Все расчеты выполним в программе *Maple* 2018.

**Интервалы варьирования параметров уравнений (1), (2)
в вычислительном эксперименте**

**Intervals of variation of parameters of equations (1), (2)
in the computational experiment**

Параметр	Минимальное значение	Максимальное значение
$\rho_0, \text{г/см}^3$	0,1	0,3
$H, \text{м}$	0,3	1
$B, \text{м}$	0,4	0,8
$L, \text{м}$	B	$7B$
$p, \text{МПа}$	$0,5 p_z$	$0,99 p_z$

Результаты исследования и заключение. Аппроксимация расчетных данных показала, что глубину колеи, образующейся при воздействии движителя машины на уплотняющийся снег, с высокой точностью можно рассчитать по приближенной формуле:

$$h = 0,090 \cdot \frac{H^{1,1} P^{1,5}}{\rho_0^{3,2}} \cdot f_1(B, L), \quad (13)$$

где $f_1(B, L)$ – безразмерная функция, учитывающая геометрию пятна контакта:

$$f_1(B, L) = \frac{L^{0,31}}{B^{0,42}}. \quad (14)$$

Для случаев, когда отсутствуют данные о геометрии пятна контакта, вместо формулы (13) получена следующая зависимость:

$$h = 0,090 \cdot \frac{H^{1,1} P^{1,5}}{\rho_0^{3,2}}. \quad (15)$$

Обратим внимание, что глубина колеи развивается непропорционально среднему давлению по пятну контакта.

Абсолютное значение деформации сжатия снега под воздействием движителя описывает приближенная формула:

$$c = 0,032 \cdot \frac{Hp^{0,79}}{\rho_0^{2,0}} \cdot f_2(B, L), \quad (16)$$

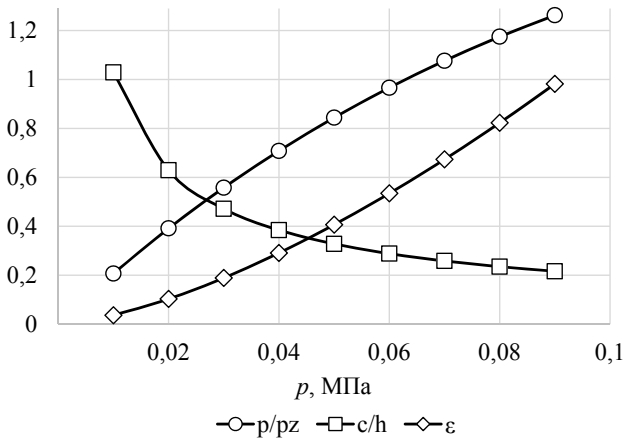
где $f_2(B, L)$ – безразмерная функция, учитывающая геометрию пятна контакта:

$$f_2(B, L) = \left(\frac{L}{B}\right)^{0,16}. \quad (17)$$

Для случаев, когда отсутствуют данные о геометрии пятна контакта, вместо формулы (16) получена следующая зависимость:

$$c = 0,032 \cdot \frac{Hp^{0,79}}{\rho_0^{2,0}}. \quad (18)$$

На рисунке представлен пример результатов расчета показателей воздействия движителя на заснеженную опорную поверхность при мощности слоя снега 0,5 м с начальной плотностью 0,15 г/см³ по формулам (15), (18).



Пример результатов расчета показателей воздействия движителя на заснеженную опорную поверхность

An example of calculation of results interaction between snow-covered surface and the rover

Анализ расчетных данных показывает, что несущая способность заснеженной опорной поверхности увеличивается вслед за возрастающим давлением по пятну контакта, что вызвано как уменьшением толщины деформируемого слоя снега, уравнения (6)–(8), так и увеличением механических свойств снега при уплотнении, уравнения (9)–(11), что отражает физическую картину колееобразования на заснеженной поверхности.

При нормальном давлении в 50% от несущей способности глубина колеи составит ориентировочно 20% толщины деформируемого слоя опорной поверхности, а при давлении, близком к несущей способности – 60% от толщины снежного покрова.

Соотношение абсолютной деформации сжатия снега и глубины колеи при давлении до 10% от несущей способности опорной поверхности составляет ориентировочно 1:1. При возрастании давления до 20% от несущей способности соотношение составит 1:2, а при повышении среднего давления до 100% от несущей способности соотношение деформации сжатия и глубины колеи составит 1:4.

Кроме того, обработка расчетных данных показала, что значения глубины колеи, полученные численным решением непосредственно уравнения (1), отличаются на 8–10% от значений, полученных решением урав-

нения (1) с заменой подынтегральной функции разложением по координате z в ряд Маклорена 2-го порядка. Отличия значений деформации сжатия, рассчитанные аналогичным образом, не превышают 5%. Таким образом, замена подынтегрального выражения является удобным способом получить приближенное инженерное решение и может рассматриваться в последующих исследованиях как вариант развития математических моделей, например, при изучении поведения неоднородного упрочняющегося грунта.

Библиографический список

- Агейкин Я.С.* Проходимость автомобилей. М.: Машиностроение, 1981. 232 с.
- Анисимов Г.М., Большаков Б.М.* Основы минимизации уплотнения почвы трелевочными системами. СПб.: ЛТА, 1998. 106 с.
- Барахтанов Л.В., Блохин А.Н., Денисенко Е.Г., Манянин С.Е.* Анализ физико-механических свойств снега для оценки проходимости машин // Журнал ААИ. 2012. № 4 (75). С. 16–19.
- Беляков В.В.* Взаимодействие со снежным покровом эластичных движителей специальных транспортных средств: дис. ... д-ра техн. наук. Нижний Новгород, 1999. 485 с.
- Божбов В.Е.* Повышение эффективности процесса трелевки путем обоснования рейсовой нагрузки форвардеров: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Архангельск: САФУ, 2015. 20 с.
- Григорьев И.В., Жукова А.И., Григорьева О.И., Иванов А.В.* Средоадаптные технологии разработки лесосек в условиях северо-западного региона Российской Федерации. СПб.: ЛТА, 2008. 176 с.
- Донато И.О.* Теоретическое и экспериментальное обоснование повышения проходимости колесных машин по снегу: дис. ... д-ра техн. наук. Нижний Новгород, 2007. 306 с.
- Зайчик М.И., Орлов С.Ф.* Проектирование и расчёт специальных лесных машин. М.: Лесн. пром-сть, 1976. 208 с.
- Ларин В.В.* Методы прогнозирования и повышения опорной проходимости многоосных колесных машин на местности: дис. ... д-ра техн. наук. М.: МГТУ, 2007.
- Макаров В.С.* Методика расчета и оценка проходимости колесных машин при криволинейном движении по снегу: дис. ... канд. техн. наук. Нижний Новгород, 2009. 161 с.
- Малыгин В.А.* Исследование процесса деформации снега под воздействием гусеничного движителя и обоснование выбора размеров опорной поверхности гусениц снегоходных машин: дис. ... канд. техн. наук. Горький, 1970. 250 с.

Молев Ю.И. Прогнозирование экологических последствий воздействия снегоходной техники на окружающую среду: дис. ... канд. техн. наук. Нижний Новгород, 1995. 204 с.

Устинов В.В. Оценка тягово-сцепных свойств колесных движителей лесных машин методами теории движения автотранспорта по бездорожью: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Архангельск: САФУ, 2016. 20 с.

Хахина А.М. Методы прогнозирования и повышения проходимости колесных лесных машин: дис. ... д-ра техн. наук. Архангельск: САФУ, 2018. 318 с.

Хитров Е.Г. Повышение эффективности трелевки обоснованием показателей работы лесных машин при оперативном контроле свойств почвогрунта: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Архангельск: САФУ, 2015. 20 с.

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.

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 // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2016. Вып. 217. С. 108–119.

Шапкин В.А. Основы теории движения машин с роторно-винтовым движителем по заснеженной местности: дис... д-ра техн. наук. Нижний Новгород, 2001. 390 с.

Ширяева Е.Ю., Вольская Н.С., Жариков В.В. Постановка задач при моделировании взаимодействия индивидуального транспортного средства со снежным покровом // Автомобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров : матер. 77-й Междунар. науч.-техн. конференции ААИ, 2012. С. 132–136.

References

Agejkin Ya.S. Prohodimost' avtomobilej [Passability of cars]. M.: Mashinostroenie, 1981. 232 s. (In Russ.)

Anisimov G.M., Bol'shakov B.M. Osnovy minimizacii uplotneniya pochvy trelevochnymi sistemami [Basics of minimizing soil compaction caused by skidding systems]. SPb.: LTA, 1998. 106 s. (In Russ.)

Barahtanov L.V., Blohin A.N., Denisenko E.G., Manyanin S.E. Analiz fiziko-mekhanicheskikh svoystv snega dlya ocenki prohodimosti mashin [Analysis of physical and mechanical properties of snow to assess machines' passability]. Zhurnal AAI, 2012, no. 4 (75), pp. 16–19. (In Russ.)

Belyakov V.V. Vzaimodejstvie so snezhnym pokrovom ehlastichnyh dvizhitelej special'nyh transportnyh sredstv [Interaction of elastic rover of special vehicles with snow cover]: dis. ... д-ра техн. наук. Nizhshniy Novgorod, 1999. 485 s. (In Russ.)

Bozhbov V.E. Povyshenie ehffektivnosti processa trelevki putem obosnovaniya rejsovoj nagruzki forvarderov [Improving the efficiency of skidding by justifying forwarders travel load]: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. Arhangel'sk: SAFU, 2015. 20 s. (In Russ.)

Grigor'ev I.V., Zhukova A.I., Grigor'eva O.I., Ivanov A.V. Sredoshchadyashchie tekhnologii razrabotki lesesek v usloviyah severo-zapadnogo regiona Rossijskoj Federacii [Eco-friendly logging technology in the North-Western region of the Russian Federation]. SPb.: LTA, 2008. 176 s. (In Russ.)

Donato I.O. Teoreticheskoe i ehksperimental'noe obosnovanie povysheniya prohodimosti kolesnyh mashin po snegu [Theoretical and experimental bases for increasing passability of wheeled vehicles in the snow]: dis. ... d-ra tekhn. nauk. Nizhnij Novgorod, 2007. 306 s. (In Russ.)

Zajchik M.I., Orlov S.F. Proektirovanie i raschyot special'nyh lesnyh mashin [Design and calculation of special forest machines]. M.: Lesn. prom-st', 1976. 208 s. (In Russ.)

Larin V.V. Metody prognozirovaniya i povysheniya opornoj prohodimosti mnogoosnyh kolesnyh mashin na mestnosti [Methods for predicting passability of multi-axle wheeled vehicles on the ground]: dis. ... d-ra tekhn. nauk. M.: MGТУ, 2007. (In Russ.)

Makarov V.S. Metodika rascheta i ocenka prohodimosti kolesnyh mashin pri krivolinejnom dvizhenii po snegu [The method of calculation and assessment of passability of wheeled vehicles during curvilinear motion in the snow]: Diss. ... kand. tekhn. nauk: 05.05.03. – Nizhnij Novgorod, 2009. – 161 s. (In Russ.)

Malygin V.A. Issledovanie processa deformacii snega pod vozdejstviem gusenichnogo dvizhitelya i obosnovanie vybora razmerov opornoj poverhnosti gusenich snegohodnyh mashin [Investigation of the process of snow deformation under influence of a caterpillar rover and justification of choice of dimensions of bearing surface of tracks of snowmobiles]: dis. ... kand. tekhn. nauk. Gor'kij, 1970. 250 s. (In Russ.)

Molev Yu.I. Prognozirovanie ehkologicheskikh posledstvij vozdejstviya snegohodnoj tekhniki na okruzhayushchuyu sredu [Prediction of impact of snowmobiles on the environment]: dis. ... kand. tekhn. nauk. Nizhnij Novgorod, 1995. 204 s. (In Russ.)

Ustinov V.V. Ocenka tyagovo-scepnnyh svojstv kolesnyh dvizhitelej lesnyh mashin metodami teorii dvizheniya avtotransporta po bezdorozh'yu [Assessment of tractive performance of wheeled forest machines using the theory of off-road locomotion]: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. Arhangel'sk: SAFU, 2016. 20 s. (In Russ.)

Khahina A.M. Metody prognozirovaniya i povysheniya prohodimosti kolesnyh lesnyh mashin [Methods of forecasting and improving passability of

wheeled forest machines]: dis. d-ra tekhn. nauk. Arhangel'sk: SAFU. 2018. 318 s. (In Russ.)

Khitrov E.G. Povyshenie ehffektivnosti trelevki obosnovaniem pokazatelej raboty lesnyh mashin pri operativnom kontrole svoystv pochvogrunta [Improving efficiency of skidding by justifying performance of forest machines in the in-situ control of forest soil properties]: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. Arhangel'sk: SAFU, 2015. 20 s. (In Russ.)

Khitrov E.G., Peskov V.B., Kazakov D.P., Bozhbov V.E., Stepanishcheva M.V. Metod resheniya zadachi o vdavlivanii shtampa-dvizhitelya v neodnorodnyj massiv grunta [Method for solving the problem of stamp sinkage into a heterogeneous soil massif]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii*, 2018, no. 2 (38), pp. 116–121. (In Russ.)

Khitrov E.G., Khahina A.M., Dmitrieva M.N., Peskov V.B., Grigor'eva O.I. Utochnennaya model' dlya ocenki tyagovo-scepyh svoystv kolesnogo dvizhitelya lesnoj mashiny [Refined model for assessing the tractive characteristics of the wheeled rover of forest machines]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii*, 2016, is. 217, pp. 108–119. (In Russ.)

Shapkin V.A. Osnovy teorii dvizheniya mashin s rotorno-vintovym dvizhitelem po zasnezhennom mestnosti [Fundamentals of theory of movement of machines with a rotary rover on snowy terrain]: dis... d-ra tekhn. nauk. Nizshniy Novgorod, 2001. 390 s. (In Russ.)

Shiryayeva E.Yu., Vol'skaya N.S., Zharikov V.V. Postanovka zadach pri modelirovanii vzaimodejstviya individual'nogo transportnogo sredstva so snezhnym pokrovom [Statement of tasks in modeling the interaction of an individual vehicle with snow cover]. *Avtomobile- i traktorostroenie v Rossii: priority razvitiya i podgotovka kadrov: mater. 77-j Mezhdunar. nauch.-tekhn. konferencii AAI*, pp. 132–136. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 26.03.2019 г.

Хитров Е.Г., Тарадин Г.С., Андронов А.В., Котенев Е.В., Пушков Ю.Л. Теоретическое исследование глубины колеи и уплотнения снега под воздействием движителя лесной машины // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2019. Вып. 227. С. 236–248. DOI: 10.21266/2079-4304.2019.227.236-248

Цель статьи – разработать и исследовать математическую модель колееобразования и уплотнения снежной целины, вызванного действием движителя лесной машины. Теоретическую базу исследования составляют положения теории движения автомобильного транспорта в условиях бездорожья. Методы исследования включают в себя математический анализ, вычислительный эксперимент и аппроксимацию расчетных данных.

Составлены интегральные уравнения для расчета глубины колеи и сжатия массива снежной поверхности под воздействием движителя. Уравнения составлены с учетом изменения механических свойств снега в процессе уплотнения. По результатам аппроксимации результатов численного решения предложенных уравнений получены упрощенные соотношения, позволяющие определить глубину колеи и сжатие снега как функции его начальной плотности, толщины снежного покрова, среднего давления по пятну контакта движителя с опорной поверхностью и геометрических параметров пятна контакта. Установлено, что несущая способность заснеженной опорной поверхности увеличивается вслед за возрастающим давлением по пятну контакта, что вызвано как уменьшением толщины деформируемого слоя снега, так и увеличением механических свойств снега при уплотнении, что отражает физическую картину колееобразования на заснеженной поверхности. При нормальном давлении в 50% от несущей способности глубина колеи составит ориентировочно 20% толщины деформируемого слоя опорной поверхности, а при давлении, близком к несущей способности – 60% от толщины снежного покрова. Соотношение абсолютной деформации сжатия снега и глубины колеи при давлении до 10% от несущей способности опорной поверхности составляет ориентировочно 1:1. При возрастании давления до 20% от несущей способности соотношение составит 1:2, а при повышении среднего давления до 100% от несущей способности соотношение деформации сжатия и глубины колеи составит 1:4.

Ключевые слова: снежная целина, упрочнение, несущая способность, модуль деформации, колееобразование, уплотнение.

Khitrov E.G., Taradin G.S., Andronov A.V., Kotenev E.V., Pushkov Yu.L. Theoretical study of rut depth compaction of snow cover under influence of forest machine rover. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnicoskoj Akademii*, 2019, is. 227, pp. 236–248 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2019.227.236-248

The purpose of our article is developing and investigating a mathematical model of rutting and compaction of snowy virgin soil, caused by the action of forest machine rover. Theoretical basis of the study consists of theory of off-the-road locomotion. Research methods include mathematical analysis, computational experiment and approximation of the calculated data. The study compiles integral equations for calculating the rut depth and compression of snow surface under the rover influence. The equations take into account changes in mechanical properties of the snow in the compaction process. Basing to the results of approximation of numerical solution of the equations, simplified relations were obtained, allowing to determine the rut depth and snow compression as functions of the initial snow density, snow cover thickness, average contact pressure and geometric parameters of

the contact patch. The study establishes that bearing capacity of snow-covered surface increases following the increasing pressure on the contact patch, which is caused by both a decrease in thickness of deformable snow layer and an increase in mechanical properties of snow during compaction, which reflects physical pattern of rutting on snow-covered surface. With a contact pressure of 50% of the bearing capacity, the rut depth will be approximately 20% of the thickness of the deformable layer, and at a pressure close to the bearing capacity – 60% of snow cover thickness. The ratio of absolute compression deformation of snow and the rut depth at the pressure of up to 10% of the bearing capacity is approximately 1:1. With an increase in the pressure up to 20% of the bearing capacity, the ratio will be 1:2, and with an increase in the pressure up to 100% of the bearing capacity, the ratio will be 1:4.

Keywords: virgin snow, strengthening, bearing capacity, deformation modulus, rutting, compaction.

ХИТРОВ Егор Германович – доцент кафедры технологических процессов и машин лесного комплекса Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: yegorkhitrov@gmail.com

KHITROV Egor G. – Associate Professor of the Department of Technological Processes and Machines of the Forest Complex of St.Petersburg State Forest Technical University.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: yegorkhitrov@gmail.com

ТАРАДИН Григорий Сергеевич – ассистент кафедры лесного машиностроения, сервиса и ремонта Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: grisha190@mail.ru

TARADIN Grigory S. – Assistant of the Department of Forest Engineering, Service and Repair of St.Petersburg State Forest Technical University.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: grisha190@mail.ru

АНДРОНОВ Александр Вячеславович – доцент кафедры лесного машиностроения, сервиса и ремонта Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: andronovalexandr@gmail.com

ANDRONOV Alexander V. – Associate Professor of the Department of Forest Engineering, Service and Repair of St.Petersburg State Forest Technical University.

194021, Institute per. 5, St. Petersburg, Russia. E-mail: andronovalexandr@gmail.com

КОТЕНЕВ Евгений Викторович – соискатель кафедры технологических процессов и машин лесного комплекса Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: kotenew@bk.ru

KOTENEV Evgeny V. – Applicant of the Department of Technological Processes and Machines of the Forest Complex of St.Petersburg State Forest Technical University.

194021, Institute per. 5, St. Petersburg, Russia. E-mail: kotenew@bk.ru

ПУШКОВ Юрий Леонидович – доцент кафедры лесного машиностроения, сервиса и ремонта Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат технических наук.

194021, Институтский пер., д. 5, лит. У, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: pushkov_yura@mail.ru

PUSHKOV Yuri L. – PhD (Technical), Associate Professor of Department of operation of transport and technological machines, St.Petersburg State Forest Technical University.

194021, Institute per. 5, St. Petersburg, Russia. E-mail: pushkov_yura@mail.ru