

МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦЕНКИ РАДИАЛЬНОЙ ДЕФОРМАЦИИ КОЛЕСА ЛЕСНОЙ МАШИНЫ С УЧЕТОМ ДЕФОРМАЦИИ ПОЧВОГРУНТА

Е.Г. ХИТРОВ, *асп. СПбГЛТУ*⁽¹⁾,

И.В. ГРИГОРЬЕВ, *проф., СПбГЛТУ, д-р техн. наук*⁽¹⁾,

В.А. МАКУЕВ, *проф., МГУЛ, д-р техн. наук*⁽²⁾,

А.М. ХАХИНА, *асс., СПбГПУ, канд. техн. наук*⁽³⁾,

С.Ю. КАЛИНИН, *ст., преподаватель МГУЛ*⁽²⁾

yegorkhitrov@gmail.com, silver73@inbox.ru, ipsop@mgul.ac.ru

⁽¹⁾ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова», 194021, Санкт-Петербург, Институтский пер., д. 5

⁽²⁾ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет леса» 141005, Московская обл., г. Мытищи-5, ул. 1-я институтская, д. 1, МГУЛ

⁽³⁾Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, Санкт-Петербург, Политехническая, 29

Вопрос учета эластичности движителей в рамках моделей, описывающих воздействие лесных машин на почвогрунты лесосек (что имеет место при работе колесной лесозаготовительной техники), нуждается в дальнейшей проработке. В технике зачастую используются односложные формулы, не позволяющие проанализировать влияние свойств поверхности движения на деформации движителя. Предлагаемая статья посвящена составлению модели, позволяющей учесть эластичность колеса лесозаготовительной машины при составлении уточненных математических моделей взаимодействия движителей колесной техники с почвогрунтами. В качестве базовых формул при расчетах приняты зависимости, полученные в рамках теории движения машин по бездорожью, а также результаты, полученные ранее для случая взаимодействия колесных движителей лесных машин с жесткой поверхностью движения. Расчеты проведены в широком диапазоне исходных данных (в качестве которых использован диаметр колеса, ширина шины, внутреннее давление в камере шины, приведенная нагрузка на колесо) при варьировании осадки почвогрунта под воздействием движителя. Результаты расчетов аппроксимированы при помощи метода наименьших квадратов, в результате чего получена многопараметрическая функция, связывающая диаметр колеса, ширину шины, внутреннее давление в камере шины, приведенную нагрузку на колесо, вертикальную деформацию (осадку) почвогрунта и радиальную деформацию шины. Полученная многопараметрическая модель качественно согласуется с физической картиной деформации колеса на деформируемом грунте: при увеличении жесткости основания (при снижении осадки) расчетные значения деформации колеса возрастают, напротив, с увеличением податливости основания (при увеличении осадки) при прочих равных условиях деформации колеса снижаются. В заключении приводятся представляющие практический интерес направления дальнейших исследований.

Ключевые слова: радиальная деформация шины, колесная техника, лесной почвогрунт, деформируемое основание

Вопросам повышения эффективности лесозаготовительного производства традиционно уделяется большое внимание [1; 2]. При этом эффективность лесозаготовительных работ во многом определяется показателями процесса трелевки, в частности взаимодействия движителей лесных машин с почвогрунтами лесосек [3; 4; 5]. Модели, описывающие это взаимодействие, традиционно строятся с использованием решений класса задач о вдавлении штампа в полупространство [6; 7]. В случае колесной трелевочной техники, штамп, заменяющий в моделях движитель машины, является эластичным. Вопрос учета эластичности штампа-движителя нуждается в дальнейшей проработке.

В технике зачастую используются односложные формулы для оценки радиальной деформации шины [8]. Например, известна формула Хейдекеля для расчета радиальной деформации при движении по грунту [8]

$$h_z = \frac{G_w}{\pi D p_w}, \quad (1)$$

где p_w – внутреннее давление в шине;

G_w – приведенная нагрузка на колесо;

D – диаметр колеса.

Формула (1) не учитывает свойства поверхности движения. Вместе с тем, ясно, что при одинаковых значениях G_w , D и p_w деформации колеса h_z на прочных и слабых грунтах будут отличаться.

Обратимся к теории движения вездеходных транспортных средств. Осредненное значение давления по пятну контакта принято определять по приближенной формуле [9]

$$P = \frac{p_w + p_0}{2} \cdot \frac{\pi h_z}{B} \cdot \left(\frac{B}{H_T} + \frac{3H_T}{B} \right) \cdot \left(1 - \frac{h_z}{B} \right), \quad (2)$$

где p_0 – среднее давление по пятну контакта колеса с недеформируемой поверхностью;

B – ширина колеса;

H_T – высота покрышки.

Величину давления p_0 рассчитаем по площади пятна контакта колеса с недеформируемой поверхностью F_0 и значению нагрузки на колесо G_w

$$p_0 = \frac{G_w}{F_0}. \quad (3)$$

Площадь пятна контакта можно оценить по формуле [4]

$$F = K_{\Pi} b l, \quad (4)$$

где K_{Π} – коэффициент учета формы пятна контакта ($K_{\Pi} = 1$ для пятна контакта, близкого к прямоугольному);

b – осредненное значение ширины пятна контакта;

l – осредненное значение длины пятна контакта.

В работе [9] предложена следующая формула для определения ширины b

$$b = B + \frac{10h \cdot h_z}{1 - h + H_T - h_z}, \quad (5)$$

где h – вертикальная деформация грунта (осадка), соответствующая глубине образующейся колеи.

С учетом радиальной деформации колеса h_z для длины l можем записать [4]

$$l = 2\sqrt{Dh_z - h_z^2} + \sqrt{D \cdot (h_z + h) - (h_z - h)^2}. \quad (6)$$

Для расчета F_0 используем формулы (4) – (6), полагая $h = 0$ и $h_z = h_{z0}$

$$F_0 = K_{\Pi} b_0 l_0 = K_{\Pi} B \sqrt{Dh_{z0} - h_{z0}^2}, \quad (7)$$

где h_{z0} – деформация колеса при контакте с недеформируемой поверхностью.

Тогда после подстановки в формулу (2) зависимостей (3), (7) и выражая давление P через нагрузку G_w и площадь пятна контакта, получим уравнение

$$\frac{G_w}{K_{\Pi} b l} = \frac{1}{2} \cdot \left(p_w + \frac{G_w}{K_{\Pi} B \sqrt{Dh_{z0} - h_{z0}^2}} \right) \times \times \frac{\pi h_z}{B} \cdot \left(\frac{B}{H_T} + \frac{3H_T}{B} \right) \cdot \left(1 - \frac{h_z}{B} \right) \quad (8)$$

Значение h_{z0} для колес лесных машин, с учетом специфики их конструкции, определяется по величинам нагрузки на колесо G_w и внутреннего давления в камере шины p_w по эмпирической зависимости [10]

$$h_{z0} = 0,0008 + 0,001 \cdot \left(0,000365 + \frac{170}{p_w} \right) \cdot G_w. \quad (9)$$

Проанализируем выражение (8). Можно заключить, что после подстановки в уравнение (8) формул для расчета b , l , h_{z0} – выражения (5), (6), (9) соответственно – уравнение (8) будет связывать между собой величины h , h_z , D , H_T , B , p_w , G_w , K_{Π} .

При этом уравнение (8) не имеет аналитического решения относительно h_z , в связи с этим реализуем его численное решение, результаты которого обработаем при помощи метода наименьших квадратов.

Исходные данные для расчетов примем по таблице.

Значение H_T принято равным 0,75В в соответствии с рекомендациями [9], $K_{\Pi} = 1$.

Вычисления проведены в прикладном пакете *Maple* (образовательная версия).

По результатам обработки полученных значений h_z при помощи метода наименьших квадратов получена следующая зависимость ($R^2 = 0,9775$)

$$h_z = X \cdot h^Y; \\ X = 0,0715 \cdot G_w^{0,691} B^{0,305} p_w^{-0,677} D^{-0,394}; \\ Y = -0,0891 \cdot G_w^{-0,201} B^{-0,057} p_w^{0,193} D^{0,558}. \quad (9)$$

На рис. 1 представлен пример графической интерпретации уравнения (9) для трех значений глубины колеи h при варьировании нагрузки на колесо, график на рис. 2 показывает зависимость радиальной деформации колеса от глубины колеи (при прочих равных условиях).

Графики на рис. 1, 2 показывают, что полученная формула (9) качественно согласуется с физической картиной деформации колеса на деформируемом грунте: при увеличении жесткости основания (при снижении осадки h) деформации колеса возрастают,

Т а б л и ц а

Исходные данные к численному решению уравнения (8)

Initial data for the numerical solution of the equation (8)

Переменная	Минимальное значение	Максимальное значение	Интервал варьирования
B , м	0,5	0,9	0,2
p_w , Па	100000	700000	100000
D , м	1,2	1,8	0,1
G_w , Н	15000	75000	15000
h , м	0,01	0,75	0,01

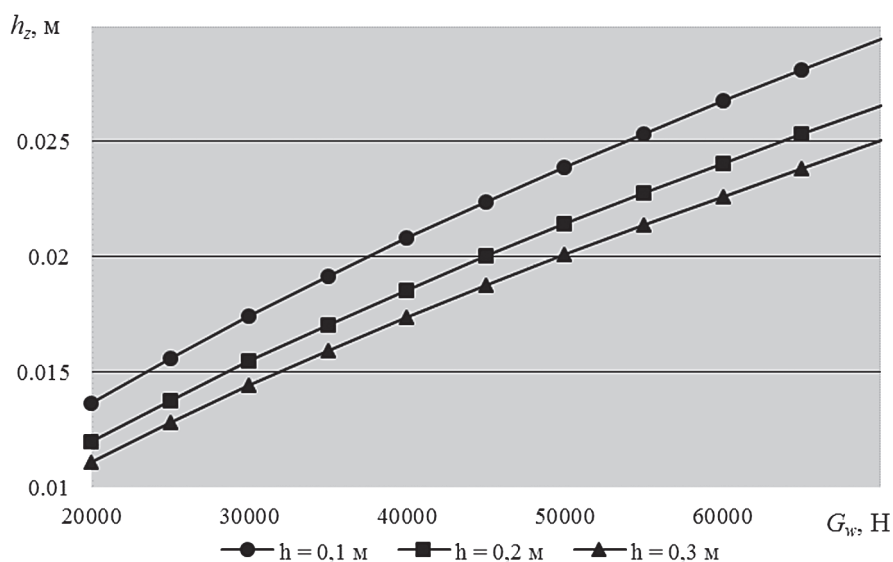


Рис. 1. Зависимость радиальной деформации колеса от приведенной нагрузки ($D = 1,6$ м, $B = 0,7$ м, $p_w = 350000$ Па)

Fig. 1. The dependence of the radial deformation of the wheel on the reduced load ($D = 1,6$ м, $B = 0.7$ м, $p_w = 350000$ Pa)

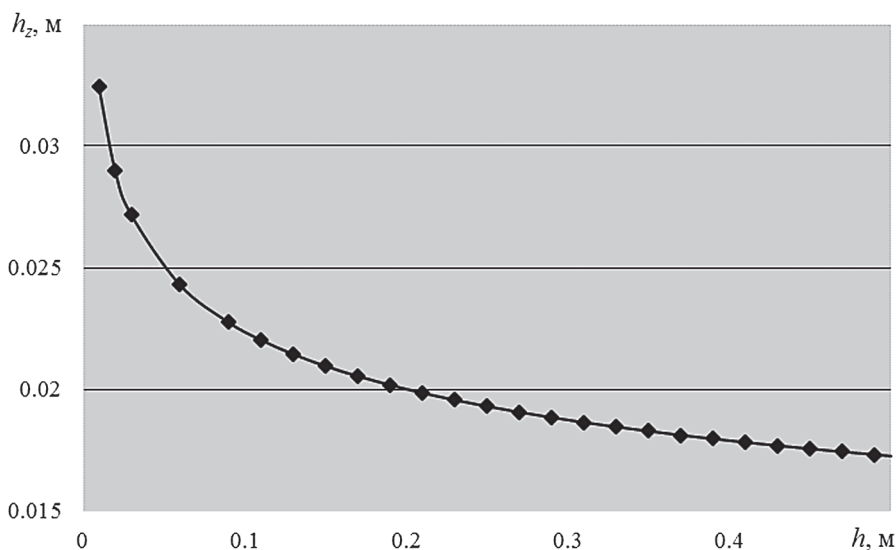


Рис. 2. Зависимость радиальной деформации колеса от деформации почвогрунта ($D = 1,6$ м, $B = 0,7$ м, $p_w = 350000$ Па, $G_w = 45000$ Н)

Fig. 2. The dependence of the radial deformation of the wheel from the deformation of soil-ground wheel ($D = 1,6$ м, $B = 0.7$ м, $p_w = 350000$ Pa, $G_w = 45000$ Н)

напротив, с увеличением податливости основания (при увеличении осадки h) при прочих равных условиях деформации колеса h_z снижаются.

Представляется перспективной разработка экспериментальной методики для проверки составленной модели, а также интеграция модели (9) в методику оценки затрат мощности при качении колеса, составленную на базе результатов работы [9].

Библиографический список

1. Григорьев, И.В. Обоснование методики оценки экологической эффективности лесопользования / И.В. Григорьев, А.И. Никифорова, О.И. Григорьева, О.А. Куницкая // Вестник КрасГАУ, 2012. – № 6. – С. 72–77.
2. Анисимов, Г.М. Экологическая эффективность трелевочных тракторов / Г.М. Анисимов, И. В. Григорьев, А. И. Жукова. – СПб.: СПбГЛТА, 2006. – 352 с.
3. Григорьев, И.В. Расчет показателей процесса уплотнения почвогрунта при трелевке пачки хлыстов / И.В. Григорьев, В.А. Макуев, В.Я. Шапиро, М.Е. Рудов, А.И. Никифорова // Вестник МГУЛ – Лесной вестник, 2014. – № 2(94). – С. 112–118.

4. Григорьев, И.В. Исследование коэффициента сопротивления передвижению колесных лесных машин / И.В. Григорьев, В.А. Макуев, А.И. Никифорова, Е.Г. Хитров, В.В. Устинов, С.Ю. Калинин // Вестник МГУЛ – Лесной вестник. 2014. – № 2'С. – С. 36–41.
5. Григорьев, И.В. Снижение отрицательного воздействия на почву колесных трелевочных тракторов обоснованием режимов их движения и технологического оборудования / И.В. Григорьев. – СПб.: СПбГЛТА. 2006. – 236 с.
6. Шапиро, В.Я. Моделирование уплотнения почвогрунта в боковых полосах трелевочного волока с учетом изменчивости трассы движения / В.Я. Шапиро, И.В. Григорьев, Д.В. Лепилин, А.И. Жукова // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. Естес. и техн. науки, 2010. – № 6. – С. 61–64.
7. Хитров, Е.Г. Расчет конусного индекса по величине модуля деформации лесного почвогрунта / Е.Г. Хитров, Г.В. Григорьев, И.Н. Дмитриева, Д.А. Ильющенко // Системы. Методы. Технологии, 2014. – № 4 (24). – С. 127–131.
8. Гуськов, В.В. Оптимальные параметры сельскохозяйственных тракторов / В.В. Гуськов. – М.: Машиностроение, 1966. – 195 с.
9. Агейкин, Я.С. Вездеходные колесные и комбинированные движители: теория и расчет / Я.С. Агейкин. – М.: Машиностроение, 1972. – 184 с.
10. Saarilahti, M. Development of a protocol for ecoefficient wood harvesting on sensitive sites (Ecwood). Evaluation of the WES-method in assessing the trafficability of terrain and the mobility of forest tractors. University of Helsinki, Department of Forest Resource Management. 2002. 28 p.

MODEL FOR ESTIMATING TYRE DEFLECTION OF FOREST MACHINES WHEELS REGARDING FOREST SOIL SINKAGE

Khitrov E.G., pg. SPbSFTU⁽¹⁾; **Grigorev I.V.**, Prof. SPbSFTU, Dr. Sci. (Tech.)⁽¹⁾; **Makuev V.A.** Prof. MSFU, Dr. Sci. (Tech.)⁽²⁾; **Khakhina A.M.**, SPbSPU, Ph.D. (Tech.)⁽³⁾; **Kalinin S.Y.**, MSFU⁽²⁾

yegorkhitrov@gmail.com, silver73@inbox.ru, ipsop@mgul.ac.ru

⁽¹⁾St Petersburg State Forest Technical University S.M. Kirov, 194021, Institutskiy per. 5, Saint-Petersburg, Russia

⁽²⁾Moscow State Forest University (MSFU), 1st Institutskaya street, 1, 141005, Mytischy, Moscow region, Russia

⁽³⁾Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Russia, 195251, St.Petersburg, Polytechnicheskaya, 29

The problem of accounting movers' elasticity in models which describe the impact of forest machinery on soils (which is the case when using the wheel logging machinery) needs to be further described. Monosyllabic formulas, which are often used, do not allow analyzing relationship between wheel's elasticity and the ground strains. Present article is devoted to working out models taking into account elasticity of forest machine's wheel, which is required for a refined mathematical model of wheeled vehicles and forest soil interaction. As the basic formulas for calculations, relationships obtained in the framework of the theory of off-the-road locomotion, as well as results obtained previously for the case of interaction of forest machines with a rigid ground are used. Calculations were carried out in a wide range of input data (the inputs are: diameter of the wheel, tyre width, tyre's inner pressure, related wheel load) regarding soil strain (sinkage). The calculation results are approximated using the least squares method, whereby obtained multi-parameter function describing relationship of the wheel diameter, tyre width, tyre's inner pressure, wheel load, soil's sinkage and radial tyre deflection. The resulting multi-parameter model is nearly consistent with physics of elastic wheel rolling on strained ground: an increase in the stiffness of the ground (with a decrease in sinkage) increases the calculated numeric of tyre's deflection, while a decrease in the stiffness of the ground (with an increase in sinkage) decreases the calculated numeric of tyre's deflection.

Keywords: tyre deflection, wheeled machinery, forest soil, strained ground

References

1. Grigor'ev I.V., Nikiforova A.I., Grigor'eva O.I., Kunitskaya O.A. *Obosnovanie metodiki otsenki ekologicheskoy effektivnosti lesopol'zovaniya* [Justification of methodology for assessing the environmental efficiency of forest management]. Vestnik KrasGAU, 2012. № 6, pp. 72-77.
2. Anisimov G. M., Grigor'ev I. V., Zhukova A. I. *Ekologicheskaya effektivnost' trelevochnykh traktorov* [Environmental efficiency of skidders]. Saint Petersburg: SPbGLTA, 2006, 352 p.
3. Grigor'ev I.V., Makuev V.A., Shapiro V.Ya., Rudov M.E., Nikiforova A.I. *Raschet pokazateley protsessa uplotneniya pochvogrunta pri trelevke pachki khlystov* [Calculation of the densification process of soil-ground skidding bundles of stems]. Moscow state forest university bulletin – Lesnoy vestnik, 2014. № 2(94). pp. 112-118.
4. Grigor'ev I.V. *Issledovanie koeffitsienta soprotivleniya peredvizheniyu kolesnykh lesnykh mashin* [A study of the drag coefficient mobility wheeled forestry machines] [Text]. Grigor'ev I.V., Makuev V.A., Nikiforova A.I., Khitrov E.G., Ustinov V.V., Kalinin S.Yu. Moscow state forest university bulletin – Lesnoy vestnik. 2014. № 2-S. pp. 36-41.
5. Grigor'ev I.V. *Snizhenie otritsatel'nogo vozdeystviya na pochvu kolesnykh trelevochnykh traktorov obosnovaniem rezhimov ikh dvizheniya i tekhnologicheskogo oborudovaniya* [Reducing the negative impacts on soil wheeled skidders justification modes of movement and technological equipment]. Saint Petersburg: SPbGLTA. 2006, 236 p.
6. Shapiro V.Ya., Grigor'ev I.V., Lepilin D.V., Zhukova A.I. *Modelirovanie uplotneniya pochvogrunta v bokovykh polosakh trelevochnogo voloka s uchetom izmenchivosti trassy dvizheniya* [Modelling of soil-ground compaction in the sidebands skid trails with the line of movement variability]. Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki. 2010. № 6, pp. 61-64.
7. Khitrov E.G., Grigor'ev G.V., Dmitrieva I.N., Il'yushenko D.A. *Raschet konusnogo indeksa po velichine modulya deformatsii lesnogo pochvogrunta* [Calculation of the index largest cone deformation modulus of the forest soil-ground]. Tekhnologii. 2014. № 4 (24). pp. 127-131.
8. Gus'kov V.V. *Optimal'nye parametry sel'skokhozyaystvennykh traktorov* [The optimal parameters of agricultural tractors]. Moscow: Mashinostroenie. 1966, 195 p.
9. Ageykin Ya.S. *Vezdekhodnye kolesnye i kombinirovannye dvizhiteli: teoriya i raschet* [ATV wheels and propellers combined theory and calculation]. Moscow: Mashinostroenie, 1972, 184 p.
10. Saarilahti M. Development of a protocol for ecoefficient wood harvesting on sensitive sites (Ecwood). Evaluation of the WES-method in assessing the trafficability of terrain and the mobility of forest tractors. M. Saarilahti. University of Helsinki, Department of Forest Resource Management. 2002, 28 p.