

Взаимосвязи сдвиговых напряжений и деформаций лесного почвогрунта

В.А. Иванов^{1 a}, Р.К. Коротков^{1 b}, А.М. Хахина^{2 c}, В.А. Лухминский^{3 d}, М.Н. Дмитриева^{3 e}

¹Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, ул. Политехническая 29, Санкт-Петербург, Россия

³Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, пер. Институтский 5, Санкт-Петербург, Россия

^aivanovva@mail.ru, ^bhahin@mail.ru, ^ctlzp@inbox.ru, ^ddima-ru25@mail.ru, ^emarina01031977@inbox.ru

Статья поступила 7.10.2016, принята 19.11.2016

Статья посвящена исследованию процессов взаимодействия движителей лесных машин с почвогрунтами лесосек. Распространенные в настоящее время модели описывают напряжения сдвига, возникающие под воздействием движителя, формально — в расчетах используется значение касательного напряжения, рассчитанное на основании закона Кулона. Целью работы является получение уточненных зависимостей для расчета напряжений сдвига почвогрунта под воздействием колесного движителя с учетом нормального напряжения по пятну контакта, шага грунтозацепов, сдвиговой деформации и физико-механических свойств почвогрунта. Результаты получены на основании анализа литературных источников из смежных областей знаний и численных методов математического моделирования. Рассмотрены зависимости для расчета напряжения сдвига в соответствии с физико-механическими свойствами поверхности движения, нормальным давлением по пятну контакта, шагом грунтозацепов и непосредственно деформацией сдвига, известными из общей теории движения автомобильного транспорта в условиях бездорожья. На основании результатов анализа этих зависимостей авторы установили модель, целесообразную для дальнейших исследований в области изучения процессов взаимодействия движителей лесных машин с почвогрунтами лесосек. Предложены формулы для оценки модуля сдвига и угла внутреннего трения грунта, удельного сцепления почвогрунта в зависимости от его категории, полученные путем аппроксимации данных проф. И.В. Григорьева. В итоге получены выражения для расчета максимального значения напряжения сдвига и соответствующего ему значения деформации сдвига, в которых используются интегральная характеристика свойств почвогрунта (модуль деформации), шаг грунтозацепов и нормальное давление по пятну контакта. Полученные уравнения в сумме позволяют проводить оценку максимального коэффициента сцепления движителя с почвогрунтом.

Ключевые слова: лесной почвогрунт; сдвиговые деформации; напряжения сдвига; взаимодействие с техникой.

Forest soil shear stress and strain relationships

V.A. Ivanov^{1 a}, R.K. Korotkov^{1 b}, A.M. Khakhina^{2 c}, V.A. Lukhminsky^{3 d}, M.N. Dmitrieva^{3 e}

¹Bratsk State University; 40 Makarenko St., Bratsk, Russia

²St. Petersburg Polytechnic University named after Peter the Great; 29 Polytechnicheskaya St. Petersburg, Russia

³St. Petersburg State Forestry University named after S.M. Kirov; 5 Institutskiy pereulok, St.Petersburg, Russia

^aivanovva@mail.ru, ^bhahin@mail.ru, ^ctlzp@inbox.ru, ^ddima-ru25@mail.ru, ^emarina01031977@inbox.ru

Received 7.10.2016, accepted 19.11.2016

The article refers to the study of the interaction between wheeled machinery and forest soil. Common models describe shear stress caused by machine's wheel overly simplistic, the shear stress calculation bases on Coulomb's dependence. The aim is to clarify relationship, which evaluates shear stress under the impact of the wheel regarding forest soil properties, shear strain, grousers' spacing and normal pressure in the contact area. The authors obtain results by analyzing the studies in the related fields of knowledge, and numerical methods of mathematical modeling. Dependences for shear stress evaluation as a function of the mechanical properties of the surface of locomotion, normal stress in the contact area, shear strain, known in general from off-the-road locomotion theory. On basis of analysis of several of these models, the authors choose a model, which is suitable for further research in the study. Article obtains formulas for estimating the shear modulus of the soil, the angle of internal friction and soil cohesion by fitting the data, collected by prof. I.V. Grigorev. As the result, the article obtains models maximum values of shear stress and the corresponding values of shear strain calculation. These models use an integral characteristic of forest soil properties (deformation modulus), grousers' spacing and normal pressure in the contact area. Finally, the models allow evaluating maximum net thrust coefficient of forest machine's wheel.

Key words: forest soil; shear stress; shear strain; machinery interaction.

Введение

Исследованию процессов взаимодействия движителей лесных машин с почвогрунтами лесосек посвящено множество работ как отечественных, так и зарубежных ученых [1; 2]. К основным показателям, характеризующим эти процессы, относятся глубина колеи после прохода машины по волоку (с помощью этого показателя оценивается экологическая эффективность трелевки) и тягово-сцепные свойства движителя, определяющие производительность трелевки [2–4]. Отмечается необходимость дальнейшего развития и уточнения математических моделей взаимодействия движителей с почвогрунтами [2; 5]. В частности, важнейшим вопросом в рамках задачи повышения сцепных свойств и проходимости лесозаготовительных и лесных машин с колесными движителями является исследование взаимосвязей параметров движителей, к которым относятся их геометрические и жесткостные свойства, и напряжений сдвига в массиве почвогрунта [3; 5]. Распространенные в настоящее время модели описывают напряжения сдвига, возникающие под воздействием движителя, формально — в расчетах используется значение касательного напряжения, рассчитанное на основании закона Кулона по нормальному давлению, удельному сцеплению и углу внутреннего трения почвогрунта. Прочими показателями зачастую пренебрегают.

Целью работы является получение зависимости для расчета напряжений сдвига почвогрунта под воздействием колесного движителя с учетом нормального напряжения по пятну контакта, шага грунтозацепов, сдвиговой деформации и физико-механических свойств почвогрунта.

Материалы и методы: анализ литературных источников из смежных областей знаний, численные методы математического моделирования.

Результаты исследования. В технике известно несколько зависимостей для расчета напряжения сдвига в соответствии с физико-механическими свойствами поверхности движения, нормальным давлением по пятну контакта, шагом грунтозацепов и непосредственно деформацией сдвига [2; 6].

Рассмотрим наиболее распространенные из них.

В монографии [6] предложена следующая формула:

$$\tau = \frac{jG}{t} \cdot \frac{tp \tan \varphi + Ct - Cj}{jG + tp \tan \varphi + Ct - Cj}, \quad (1)$$

где j — деформация сдвига; G — модуль сдвига грунта; t — шаг грунтозацепов; p — нормальное давление по пятну контакта; φ — угол внутреннего трения грунта; C — удельное сцепление грунта.

Среди достоинств формулы (1) применительно к нашему исследованию отметим, что параметры поверхности движения имеют четко определенный физический смысл, по ним накоплен обширный статистический материал, и они не зависят от параметров движителя.

Модификацией формулы (2) является следующее уравнение, в котором используется коэффициент учета неодновременности сдвигов m [6]:

$$\tau = \frac{jG}{t} \cdot \frac{tp \tan \varphi + Ct - Cmj}{jG + tp \tan \varphi + Ct - Cmj}. \quad (2)$$

Отметим, что коэффициент учета неодновременности сдвигов m четко не определен, что ограничивает область применения формулы (2).

Известны еще две зависимости соответственно с учетом и без учета неодновременности сдвигов [6–9]:

$$\tau = \frac{tp \tan \varphi + Ct - Cj}{t} \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{jG}{t}\right) \right), \quad (3)$$

$$\tau = \frac{tp \tan \varphi + Ct - Cmj}{t} \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{jG}{t}\right) \right). \quad (4)$$

Анализ формул (3), (4) показывает, что зависимости по ним не имеют максимума, что противоречит экспериментальным наблюдениям за развитием сдвиговых деформаций связных грунтов. Ввиду того, что поверхности движения лесных и лесозаготовительных машин в большинстве случаев являются связными почвогрунтами, это обстоятельство делает формулы (3), (4) мало пригодными для нашего исследования.

В.Ф. Бабковым предложена следующая формула для расчета напряжений сдвига [6]:

$$\tau = \left(p \tan \varphi + C \cdot \left(1 - \frac{j}{t} \right) \right) \sqrt{\frac{j}{j_0}}, \quad (5)$$

где j_0 — деформация сдвига, при которой напряжение τ имеет максимальное значение.

Чтобы исключить из формулы (5) дополнительный параметр j_0 , найдем первую производную τ по j :

$$\frac{d\tau}{dj} = -\frac{C}{t} \sqrt{\frac{j}{j_0}} + \frac{p \tan \varphi + C \cdot \left(1 - \frac{j}{t} \right)}{2j_0} \sqrt{\frac{j_0}{j}}. \quad (6)$$

Производная по формуле (6) равна нулю при выполнении следующего условия:

$$j = \frac{t}{3} \cdot \frac{p \tan \varphi + C}{C}. \quad (7)$$

Таким образом, параметр j_0 равен j по формуле (7):

$$j_0 = \frac{t}{3} \cdot \frac{p \tan \varphi + C}{C}. \quad (8)$$

После подстановки выражения (8) в формулу В.Ф. Бабкова (5) и ряда преобразований получим следующую зависимость:

$$\tau = \frac{tp \tan \varphi + Ct - Cj}{t} \cdot \sqrt{\frac{3jC}{tp \tan \varphi + Ct}}. \quad (9)$$

Заметим, что в выражение (9) не входит модуль сдвига грунта G .

М. Беккером предложено следующее уравнение для расчета напряжений сдвига [10; 11]:

$$\tau = \frac{p \tan \varphi + C}{Y_{\max}} \cdot \left\{ \exp\left(\left(-K_{\tau 2} + \sqrt{K_{\tau 2}^2 - 1}\right) \cdot K_{\tau 1} j\right) - \right.$$

$$-\exp\left\{\left(-K_{\tau 2}-\sqrt{K_{\tau 2}^2-1}\right) \cdot K_{\tau 1} j\right\}, \quad (10)$$

где $K_{\tau 1}, K_{\tau 2}$ — экспериментальные параметры, зависящие от геометрических свойств движителя; Y_{\max} — максимальное значение выражения в фигурных скобках.

После подстановки вместо символа Y_{\max} соответствующего выражения и сокращений получим следующее уравнение:

$$\tau = (p \tan \varphi + C) \left(\exp(j K_{\tau 1} \sqrt{K_{\tau 2}^2 - 1}) - j K_{\tau 1} K_{\tau 2} - 1 \right) \cdot \left(2 K_{\tau 2}^2 - 2 K_{\tau 2} \sqrt{K_{\tau 2}^2 - 1} - 1 \right)^{\frac{K_{\tau 2} + \sqrt{K_{\tau 2}^2 - 1}}{2 \sqrt{K_{\tau 2}^2 - 1}}}. \quad (11)$$

К его недостаткам в нашем случае относится необходимость использования двух дополнительных параметров $K_{\tau 1}, K_{\tau 2}$, которые не имеют четко определенного физического смысла. Кроме того, в формуле (11) не учитывается шаг грунтозацепов t .

Также известна формула В.В. Кацыгина, которая имеет следующий вид [12]:

$$\tau = f_{CK} p \cdot \left(1 + \frac{4 f_{II} - 3 f_{CK}}{2 f_{CK} \cosh \frac{j}{K_{\tau}}} \right) \tanh \frac{j}{K_{\tau}}, \quad (12)$$

где f_{CK} — коэффициент трения скольжения; f_{II} — коэффициент трения покоя; K_{τ} — параметр грунта, зависящий от шага грунтозацепов [12].

Область применения формулы (12) в наших исследованиях ограничена необходимостью использования трех дополнительных переменных параметров f_{CK}, f_{II}, K_{τ} , сведений о значениях которых накоплено сравнительно мало — известны только их приблизительные значения для торфянистых грунтов.

Ранее проф. И.В. Григорьевым было установлено, что для лесных почвогрунтов характерны определенные сочетания физико-механических свойств, по этим сочетаниям почвогрунты классифицируются на категории (табл. 1) [1; 2; 13; 14]. Классификация (см. табл. 1) апробирована и впоследствии использовалась, например, в работах [15–17].

Таблица 1

Классификация лесных почвогрунтов по физико-механическим свойствам

Свойства	Категории почвогрунта		
	III (слабый)	II (нормальный)	I (прочный)
E , МПа	0,4	1	3
C , кПа	5	12	24
φ , °	11	15	16
γ , кН/м ³	7,5	8,5	9,5
H , м	0,8	0,4	0,3
ν	0,35	0,25	0,15

В табл. 1 обозначено: E — модуль деформации; γ — объемный вес; H — толщина деформируемого слоя; ν — коэффициент Пуассона почвогрунта.

Принято считать, что модуль общей деформации E является интегральной характеристикой прочности и сопротивления деформации лесного почвогрунта.

Заметим также, что модуль сдвига выражается через модуль упругости E_0 по следующему соотношению [2]:

$$G = \frac{E_0}{2 \cdot (1 + \nu)}. \quad (13)$$

С учетом того, что для лесных почвогрунтов $E \approx 0,2E_0$ [19; 20], получим следующее уравнение:

$$G = \frac{5E}{2 \cdot (1 + \nu)}. \quad (14)$$

В программе *MS Excel 2013* на основании данных табл. 1 и с учетом формулы (14) получены следующие приближенные уравнения для расчета значений физико-механических свойств по модулю деформации лесного почвогрунта (размерности величин соответствуют размерностям по табл. 1):

$$C = 10,774E^{0,7737} \quad (15)$$

$$\varphi = 13,669E^{0,1818} \quad (16)$$

$$\gamma = 8,4008E^{0,1168} \quad (17)$$

$$H = 0,4714E^{-0,479} \quad (18)$$

$$\nu = 0,242E^{-0,422} \quad (19)$$

$$G = 1,9937E^{1,0798} \quad (20)$$

На рис. 1 – 3 в виде графиков представлены зависимости (1), (3), (9). При расчетах использованы значения C, φ и G по формулам (15), (16), (20) при модуле $E 0, 4, 1$ и 3 МПа (т. е. для слабого, нормального и прочного почвогрунта). Расчеты выполнены при значении нормального давления $p = 40$ кПа и шаге грунтозацепов $t = 0,14$ м.

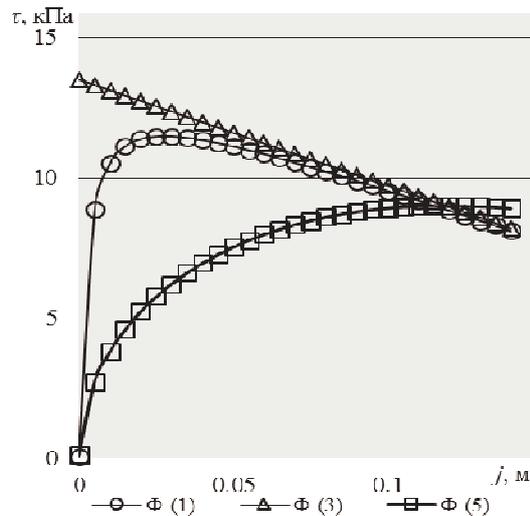


Рис. 1. Зависимость напряжений сдвига от деформации сдвига (почвогрунт III категории, $p = 40$ кПа, $t = 0,14$ м)

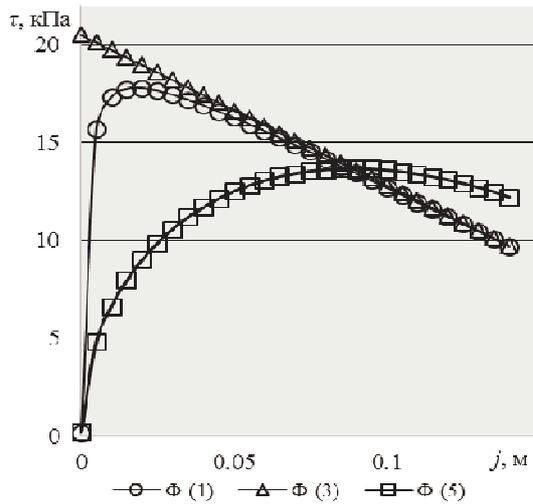


Рис. 2. Зависимость напряжений сдвига от деформации сдвига (почвогрунт II категории, $p = 40$ кПа, $t = 0,14$ м)

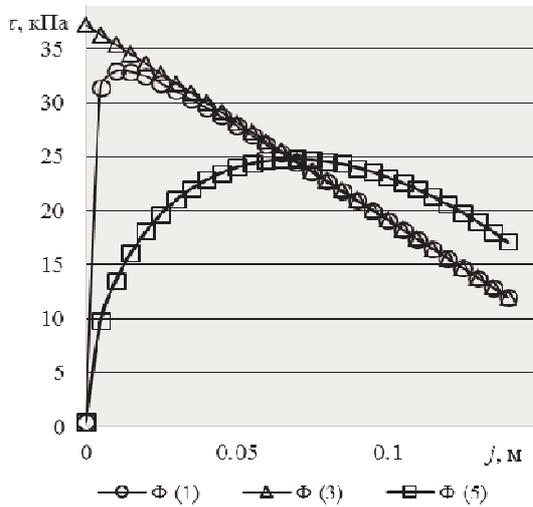


Рис. 3. Зависимость напряжений сдвига от деформации сдвига (почвогрунт I категории, $p = 40$ кПа, $t = 0,14$ м)

На графиках видно, что наибольшие значения напряжения сдвига τ получаются при использовании зависимости (3), у нее отсутствуют точки максимума, что противоречит физической картине деформации почвогрунтов [2; 5; 19; 20]. Результаты расчетов по этим формулам практически равняются расчетным значениям τ по формуле (1) при достижении последней ярко выраженных максимальных значений. Для кривой по формуле (9) характерно более медленное, по сравнению с остальными, нарастание напряжения τ по мере увеличения деформации сдвига j . Менее выражен также максимум функции $\tau(j)$ у слабых почвогрунтов.

С учетом требования о наличии максимума у функции $\tau(j)$, а также близких значений напряжения сдвига по формулам (1) и (3) вблизи максимумов считаем целесообразным в дальнейших расчетах использовать формулу (1) для выражения зависимости напряжения от деформации сдвига.

Исследуем функцию (1) подробнее. После однократного дифференцирования выражения (1) по j получим следующее выражение:

$$\frac{d\tau}{dj} = \frac{G}{t} \cdot \frac{tp \tan \varphi + C(t-j)}{jG + tp \tan \varphi + C(t-j)} - \frac{jGC}{t} \cdot \frac{1}{jG + tp \tan \varphi + C(t-j)} - \frac{jG(G-C)}{t} \cdot \frac{tp \tan \varphi + C(t-j)}{(jG + tp \tan \varphi + C(t-j))^2}. \quad (21)$$

Производная по формуле (21) равна нулю при деформации:

$$j_0 = \frac{t \cdot (\sqrt{CG} - C) \cdot (p \tan \varphi + C)}{CG - C^2}. \quad (22)$$

Для удобства практических расчетов формулу (22) можно аппроксимировать ($R^2 = 0,9872$):

$$j_0 = 0,022t \sqrt{\frac{p}{E}}, \quad (23)$$

где p [кПа], E [МПа].

После подстановки формулы (22) для j_0 в уравнение (1) вместо j получим выражение для расчета максимального значения напряжения сдвига почвогрунта, при котором коэффициент сцепления движителя с поверхностью, согласно [2; 6], будет максимальным:

$$\tau_{\max} = \frac{G \cdot (\sqrt{CG} - C)(G - \sqrt{CG})(p \tan \varphi + C)}{(C - G)^2 \sqrt{CG}}. \quad (24)$$

На рис. 4 представлена зависимость максимального напряжения сдвига по формуле (24) от нормального давления по пятну контакта p при выражении физико-механических свойств почвогрунта через его модуль деформации по формулам (15), (16), (20).

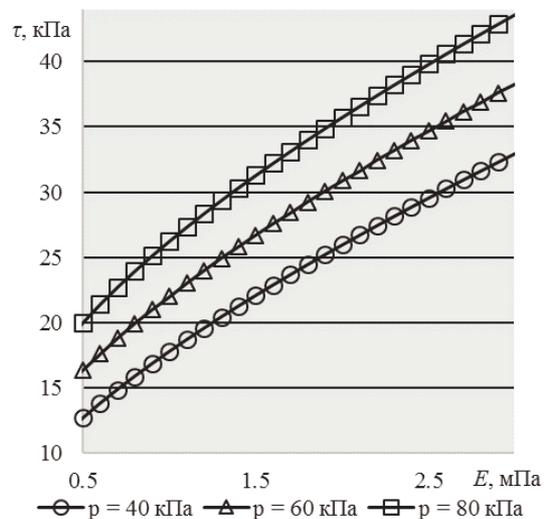


Рис. 4. Максимальное напряжение сдвига по формуле (23) в зависимости от модуля деформации почвогрунта и нормального давления в пятне контакта

Результаты расчетов по формулам (15), (16), (20), (24) практически точно описываются следующей приближенной зависимостью ($R^2 = 0,9953$):

$$\tau_{\max} = 2,86\sqrt{pE}, \quad (25)$$

где нормальное напряжение p [кПа], модуль деформации E [МПа], напряжение сдвига τ_{\max} [кПа].

Выводы

Резюмируем изложенное:

1. На основании результатов анализа моделей, предложенных в технике, считаем целесообразным в дальнейших исследованиях использовать формулу (1) для выражения зависимости напряжения от деформации сдвига. Модуль сдвига грунта, угол внутреннего трения грунта и удельное сцепление почвогрунта предлагаем оценивать, в зависимости от категории почвогрунта, по формулам (15), (16), (20).

2. Выражение для расчета максимального значения напряжения сдвига рассчитывается по формуле (25). Соответствующее ему значение деформации сдвига можно рассчитать по аппроксимированной зависимости (23). Уравнения (23), (25) в сумме позволяют проводить оценку максимального коэффициента сцепления движителя с почвогрунтом в зависимости от нормального давления по пятну контакта.

Литература

1. Григорьев И.В., Жукова А.И., Григорьева О.И., Иванов А.В. Средоадаптивные технологии разработки лесосек в условиях северо-западного региона российской федерации. СПб.: ЛТА, 2008. 176 с.
2. Григорьев И.В. Влияние способа трелевки на эксплуатационную эффективность трелевочного трактора. Диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук. СПб.: ЛТА. 2000. 143 с.
3. Григорьев И.В., Макуев В.А., Никифорова А.И., Хитров Е.Г., Устинов В.В. Калинин С.Ю. Исследование коэффициента сопротивления передвижению колесных лесных машин // Вестн. Моск. гос. ун-та леса - Лесной вестник. 2014. № 2. С. 36-41.
4. Григорьев И.В., Хитров Е.Г., Никифорова А.И., Григорьева О.И., Куницкая О.А. Определение энергоемкости продуктов лесопользования в рамках методики оценки экологической эффективности лесопользования // Вестн. Тамб. ун-та. Сер. Естественные и технические науки. 2014. Т. 19, № 5. С. 1499-1502.
5. Никифорова А.И., Хитров Е.Г., Пелымский А.А., Григорьева О.И. Определение осадки при движении лесозаготовительной машины по двуслойному основанию // Учен. записки Петрозавод. гос. ун-та. Сер. Естественные и технические науки. 2014, № 2 (139). С. 87-91.
6. Агейкин Я.С., Вольская Н.С. Динамика колесной машины при движении по неровной грунтовой поверхности. М.: МГИУ, 2003. 124 с.
7. Wong J.Y. Terramechanics and Off-road Vehicles. Amsterdam. The Netherlands: Elsevier Science, 1989.
8. Wong J.Y., Reece A.R. Soil Failure Beneath Rigid Wheels // Proc. 2nd Int. Conf. of the International Society for Terrain Vehicle Systems. Toronto. Canada: University of Toronto Press, 1966.
9. Wong J.Y. Review of 'Soil Mechanics for Off-road Vehicle Engineering. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 16, № 3.
10. Bekker M.G. Introduction to Terrain-Vehicle Systems. Ann Arbor, MI: University of Michigan Press, 1969.
11. McKyes E. Soil Cutting and Tillage. Developments in Agricultural Engineering 7. Amsterdam. The Netherlands: Elsevier Science. 1985.
12. Гуськов В.В., Велев Н.Н., Атаманов Ю.Е. Тракторы: теория. М.: Машиностроение, 1988. 376 с.
13. Grigorev I.V., Khitrov E.G., Ivanov, V.A., Kalistratov A.V., Bozhbov V.E. New approach for forest production stock-taking based on energy cost // Proceedings of the 14th International Multidisciplinary Scientific Geoconferences, Vol. 2. "Water Resources. Marine and Ocean Ecosystems", 16 – 26 June 2014, Albena, Bulgaria, P. 407-414.
14. Григорьев И.В., Никифорова А.И., Пелымский А.А., Хитров Е.Г., Хахина А.М. Экспериментальное определение времени релаксации напряжений лесного грунта. Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. Естественные и технические науки. 2013. № 8 (137). С. 77-80.
15. Рудов С.Е., Хитров Е.Г., Рудов М.Е., Устинов В.В. Расчет тяговых и сцепных свойств колесного скиддера с использованием данных зарубежных коллег // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3, № 1 (12). С. 223-228.
16. Grigorev I.V., Khitrov E.G., Kalistratov A.V., Stepanishcheva M.V. Dependence of filtration coefficient of forest soils to its density // Proceedings of the 14th International Multidisciplinary Scientific Geoconferences, Vol. 2 "Water Resources. Marine and Ocean Ecosystems", 16 – 26 June 2014, Albena, Bulgaria, P. 339-344.
17. Grigorev I.V., Khitrov E.G., Ivanov V.A., Gasparian G.D., Nikiforova A.I. Softwood harvesting and processing problem in Russian Federation // Proceedings of the 14th International Multidisciplinary Scientific Geoconferences, Vol. 2 "Water Resources. Marine and Ocean Ecosystems", 16 – 26 June 2014, Albena, Bulgaria. P. 443-446.
18. Калистратов А.В., Иванов В.А., Коротков Р.К., Хитров Е.Г., Григорьев Г.В. Исследование коэффициента фильтрации лесной почвы (случай дерново-подзолистой почвы). Системы. Методы. Технологии. 2014. № 2 (22). С. 190-193.
19. Хитров Е.Г., Божбов В.Е., Ильюшенко Д.А. Расчет несущей способности лесных почвогрунтов под воздействием колесных движителей. Системы. Методы. Технологии. 2014. № 4 (24). С. 122-126.
20. Хитров Е.Г., Григорьев Г.В., Дмитриева И.Н., Ильюшенко Д.А. Расчет конусного индекса по величине модуля деформации лесного почвогрунта. Системы. Методы. Технологии. 2014. № 4 (24). С. 127-131.

References

1. Grigorev I.V., Zhukova A.I., Grigoreva O.I., Ivanov A.V. Environmentally sparing technology of development felling areas in a north-western region of the Russian Federation. SPb.: LTA, 2008. 176 p.

2. Grigor'ev I.V. Influence of a way of logging on operational efficiency of the skidder. Dissertatsiya na soiskanie uchenoi stepeni kand. tekhn. nauk. SPb.: LTA. 2000. 143 p.
3. Grigor'ev I.V., Makuev V.A., Nikiforova A.I., Khitrov E.G., Ustinov V.V., Kalinin S.Yu. Studies of resistance coefficient to movement of wheeled forestry machines // Vestn. Mosk. gos. un-ta lesa - Lesnoi vestnik. 2014. № 2. P. 36-41.
4. Grigor'ev I.V., Khitrov E.G., Nikiforova A.I., Grigor'eva O.I., Kunitskaya O.A. Grigor'ev I.V., Khitrov E.G., Nikiforova A.I., Grigor'eva O.I., Kunitskaya O.A. Determination of energy-intensive products in the framework of forest management methodology for assessing the environmental effectiveness of forest management // Tambov University Reports. Series: Natural and Technical Sciences. 2014. T. 19, № 5. P. 1499-1502.
5. Nikiforova A.I., Khitrov E.G., Pelymskii A.A., Grigor'eva O.I. Definition of draft at the movement of the forest machine on the two-layer basis // Uchen. zap. Petr. gos. un-ta. Ser. Estestv. i tekhn. nauki. 2014. № 2 (139). P. 87-91.
6. Ageikin Ya.S., Vol'skaya N.S. Dynamics wheeled vehicle when driving on uneven grant covering surface. M.: MGIU, 2003. 124 p.
7. Wong J.Y. Terramechanics and Off-road Vehicles. Amsterdam. The Netherlands: Elsevier Science, 1989.
8. Wong J.Y., Reece A.R. Soil Failure Beneath Rigid Wheels // Proc. 2nd Int. Conf. of the International Society for Terrain Vehicle Systems. Toronto. Canada: University of Toronto Press, 1966.
9. Wong J.Y. Review of 'Soil Mechanics for Off-road Vehicle Engineering. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 16, № 3.
10. Bekker M.G. Introduction to Terrain-Vehicle Systems. Ann Arbor, MI: University of Michigan Press, 1969.
11. McKyes E. Soil Cutting and Tillage. Developments in Agricultural Engineering 7. Amsterdam. The Netherlands: Elsevier Science. 1985.
12. Gus'kov V.V., Velev N.N., Atamanov Yu.E. Tractors: Theory. M.: Mashinostroenie, 1988. 376 p.
13. Grigorev I.V., Khitrov E.G., Ivanov, V.A., Kalistratov A.V., Bozhbov V.E. New approach for forest production stock-taking based on energy cost // Proceedings of the 14th International Multidisciplinary Scientific Geoconferences, Vol. 2. "Water Resources. Marine and Ocean Ecosystems", 16 - 26 June 2014, Albena, Bulgaria, P. 407-414.
14. Grigor'ev I.V., Nikiforova A.I., Pelymskii A.A., Khitrov E.G., Khakhina A.M. Experimental determination of the time of stress relaxation of the forest soil // Uchen. zap. Petr. gos. un-ta. Ser. Estestv. i tekhn. nauki. 2013. № 8 (137). P. 77-80.
15. Rudov S.E., Khitrov E.G., Rudov M.E., Ustinov V.V. Calculation of tractive and coupling properties of a wheel skidder using data from foreign counterparts // Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika. 2015. T. 3, № 1 (12). P. 223-228.
16. Grigorev I.V., Khitrov E.G., Kalistratov A.V., Stepanishcheva M.V. Dependence of filtration coefficient of forest soils to its density // Proceedings of the 14th International Multidisciplinary Scientific Geoconferences, Vol. 2 "Water Resources. Marine and Ocean Ecosystems", 16 - 26 June 2014, Albena, Bulgaria, P. 339-344.
17. Grigorev I.V., Khitrov E.G., Ivanov V.A., Gasparian G.D., Nikiforova A.I. Softwood harvesting and processing problem in Russian Federation // Proceedings of the 14th International Multidisciplinary Scientific Geoconferences, Vol. 2 "Water Resources. Marine and Ocean Ecosystems", 16 - 26 June 2014, Albena, Bulgaria. P. 443-446.
18. Kalistratov A.V., Ivanov V.A., Korotkov R.K., Khitrov E.G., Grigor'ev G.V. Studies of filtration coefficient of sod-podzolic forest soils // Systems. Methods. Technologies. 2014. № 2 (22). P. 190-193.
19. Khitrov E.G., Bozhbov V.E., Il'yushenko D.A. The calculation of the carrying capacity of forest soil-ground under the influence of wheel propulsion devices // Systems. Methods. Technologies. 2014. № 4 (24). P. 122-126.
20. Khitrov E.G., Grigor'ev G.V., Dmitrieva I.N., Il'yushenko D.A. Calculation of the cone index in magnitude of deformation modulus of forest soil-ground // Systems. Methods. Technologies. 2014. № 4 (24). P. 127-131.