

УДК 625.033

## Уточненные зависимости для расчета сдвиговой деформации лесного почвогрунта по величине буксования и параметрам пятна контакта

В.А. Иванов<sup>1 a</sup>, А.М. Хахина<sup>2 b</sup>, В.В. Устинов<sup>2 c</sup>, Р.К. Коротков<sup>3 d</sup><sup>1</sup>Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия<sup>2</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет, ул. Политехническая 29, Санкт-Петербург, Россия<sup>3</sup>Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет, пер. Институтский 5, Санкт-Петербург, Россия<sup>a</sup>ivanovva@mail.ru, <sup>b</sup>hahin@mail.ru, <sup>c</sup>tlzp@inbox.ru, <sup>d</sup>marina01031977@inbox.ru

Статья поступила 20.09.2015, принята 25.10.2015

*Под воздействием движителей колесных машин лесные почвогрунты испытывают деформации сжатия и сдвига. Важность исследования воздействия движителей на почвогрунты неоднократно отмечалась ранее и обусловлена тем, что деформации сжатия используются как характеристики воздействия техники с точки зрения экологии, а учет деформаций сдвига необходим для исследования подвижности и проходимости лесных машин. Модели, описывающие деформации сжатия почвогрунтов, проработаны сравнительно подробно. При этом подходы к описанию сдвиговых деформаций нуждаются в дальнейшем развитии. Для разработки уточненных моделей, предназначенных для прогнозирования проходимости и тягово-сцепных свойств колесных лесных машин, необходимо проработать связь сдвиговой деформации почвогрунта, буксования колеса, а также геометрических параметров зоны контакта. Для этого в статье использованы методы механики плоского движения, математического анализа и численные методы аппроксимации расчетных данных. Рассмотрено плоское движение точек колеса, контактирующих с деформируемой опорной поверхностью. Получены общие зависимости, связывающие суммарную деформацию сдвига почвогрунта с радиальной деформацией колеса, его радиусом, глубиной колеи, образующейся под воздействием колеса, и коэффициентом буксования колеса. По полученным формулам проведена серия вычислений сдвиговой деформации при варьировании радиуса колеса, коэффициента буксования, радиальной деформации и глубины колеи. По результатам анализа численных результатов установлено, что влияние радиуса колеса, радиальной деформации и глубины колеи на суммарную сдвиговую деформацию можно без существенной потери точности учесть через производную от них величину — длину пятна контакта. В итоге при помощи метода наименьших квадратов получена приближенная зависимость для оценки деформации сдвига по коэффициенту буксования и длине пятна контакта движителя с почвогрунтом.*

**Ключевые слова:** лесные почвогрунты; колесная техника; сдвиговые деформации; длина пятна контакта; буксование.

## Refined dependencies for evaluating forest soil shear deformation through sliding ratio and contact patch parameters

V.A. Ivanov<sup>1 a</sup>, A.M. Khahina<sup>2 b</sup>, V.V. Ustinov<sup>2 c</sup>, R.K. Korotkov<sup>3 d</sup>

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

St. Petersburg State Polytechnical University; 29, Polytechnicheskaya St., St. Petersburg, Russia

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

<sup>a</sup>ivanovva@mail.ru, <sup>b</sup>hahin@mail.ru, <sup>c</sup>tlzp@inbox.ru, <sup>d</sup>marina01031977@inbox.ru

Received 20.09.2015, accepted 20.10.2015

*While interacting with wheeled machinery, forest soils suffer from compressional and shear deformations. The importance of research of the influence of forwarders on soils has repeatedly been noted earlier and is due to the fact that the compressional deformation are used as characteristics of machine influence in terms of ecology. Taking shear deformations into accounts is essential for studying the mobility and cross-country capability of forest machines. Models, describing the soil compressional deformation, are studied in details. However, approaches to describing shear deformations require further development. To develop refined models aimed at predicting cross-country capability and traction characteristics of wheeled forestry machines, it is necessary to study the connection between soil shear deformation, frictional sliding of a wheel and geometric parameters of a contact zone. To study it, methods of plane motion mechanics and mathematical analysis and numerical methods of data approximation have been used in the article. A plane motion of the wheel points, being in contact with the support surface under deformation, has been studied. General dependences have been received linking the total soil shear deformation with a radial deformation of a wheel, with its radius, track depth, which is formed under the influence of the wheel, and with the coefficient of wheel frictional sliding. According to the formulas, a series of calculations has been made for shear deformation by varying the radius of the wheel, sliding ratio, radial deformation and track depth. According to the analysis of numerical results, it has been found that the influence of the radius of the wheel, radial deformation and the track depth on the total shear deformation can be taken into account without significant loss of accuracy through their derive value – length of a contact patch. As a result, by using the least square method, approximate dependency has been received to evaluate the shear deformation through sliding ratio and length of a contact patch of the forwarder with soil.*

**Key words:** forest soil; wheeled machinery; shear deformations; length of a contact patch; frictional sliding.

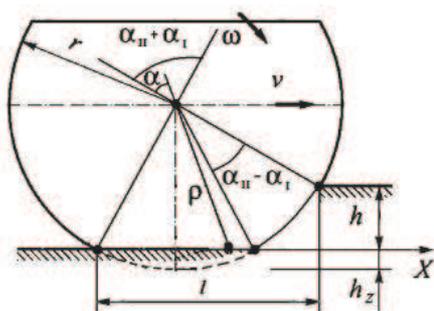
**Введение.** Под воздействием движителей колесных машин лесные почвогрунты испытывают деформации сжатия и деформации сдвига [1; 2]. Важность исследования воздействия движителей на почвогрунты неоднократно отмечалась ранее: деформации сжатия используются как характеристики воздействия техники с точки зрения экологии [3–6], а учет деформаций сдвига необходим для исследования подвижности и проходимости лесных машин [7–10]. Модели, описывающие деформации сжатия почвогрунтов, проработаны сравнительно подробно, например [11–14]. При этом подходы к описанию сдвиговых деформаций нуждаются в дальнейшем развитии [9; 10], в частности, необходимо исследовать связь сдвиговой деформации почвогрунта, буксования колеса, а также геометрических параметров зоны контакта.

**Цель работы:** получение уточненных зависимостей для расчета деформаций сдвига почвогрунта под воздействием колесного движителя.

**Материалы и методы исследования:** механика плоского движения, математический анализ, численные методы аппроксимации расчетных данных.

**Постановка задачи.** Для получения расчетной зависимости, которая позволит оценить сдвиговые деформации, вызываемые воздействием колесного движителя, используем схему (рис. 1).

Каждая точка колеса совершает плоское движение, состоящее из относительного (для центра колеса) и переносного (для опорной поверхности — деформируемой поверхности почвогрунта) [15].



**Рис. 1.** Схема к определению сдвиговой деформации поверхности почвогрунта:  $v$  — поступательная скорость геометрического центра колеса;  $r$  — радиус колеса;  $\rho$  — радиус-вектор точки колеса;  $h$  — глубина колес;  $h_z$  — радиальная деформация колеса;  $l$  — длина пятна контакта колеса с поверхностью движения

Относительная скорость равна [15]:

$$v_{\text{ОТН}} = \sqrt{v_r^2 + v_\tau^2}, \quad (1)$$

где  $v_r$  — радиальная скорость деформации беговой дорожки колеса (направлена по радиус-вектору точки к центру колеса);  $v_\tau$  — тангенциальная скорость сколь-

жения беговой дорожки относительно поверхности грунта (направлена по касательной к траектории движения точки).

Составляющие относительной скорости  $v_r$  и  $v_\tau$  находятся по формулам:

$$v_r = \frac{d\rho}{dt} = \frac{d\rho}{d\alpha} \cdot \frac{d\alpha}{dt} = \omega \frac{d\rho}{d\alpha}, \quad (2)$$

$$v_\tau = \omega \rho. \quad (3)$$

Переносная скорость состоит из продольной и вертикальной составляющих, причем продольная составляющая равна скорости перемещения оси колеса [15]:

$$v_{\text{ПЕР,X}} = \omega \cdot r_K, \quad (4)$$

где  $r_K$  — радиус качения колеса, который определяется по радиусу колеса и коэффициенту буксования  $s$  [16]:

$$r_K = r \cdot (1 - s). \quad (5)$$

Учтем также, что скорость скольжения и деформация сдвига связаны следующей зависимостью:

$$v_S = \frac{dj}{dt} = \frac{dj}{d\alpha} \cdot \frac{d\alpha}{dt} = \omega \frac{dj}{d\alpha}. \quad (6)$$

При этом скорость скольжения точек колеса относительно поверхности почвогрунта определяется по формуле [15]:

$$v_S = v_{\text{ОТН},\alpha} - v_{\text{ПЕР},\alpha}, \quad (7)$$

где  $v_{\text{ОТН},\alpha}$ ,  $v_{\text{ПЕР},\alpha}$  — проекции скоростей на касательную к продольному профилю, положение которой определяется углом  $\alpha$ .

Рассмотрим проекции по участкам.

Так, при изменении угла  $\alpha$  от  $0$  до  $\alpha_{II} - \alpha_I$ , траектория движения точки колеса представляет собой дугу окружности с центром, совпадающим с центром колеса. Тогда согласно схеме (рис. 1) имеют место уравнения:

$$\begin{cases} v_{\text{ПЕР},\alpha} = v_{\text{ПЕР,X}} \cos(\alpha_{II} - \alpha_I - \alpha) \\ v_{\text{ОТН},\alpha} = v_{\text{ОТН}} \\ \rho = r \end{cases} \quad (8)$$

На участке, где угол  $\alpha$  изменяется от  $\alpha_{II} - \alpha_I$  до  $\alpha_{II} + \alpha_I$ , траектория движения точки представляет собой прямую линию. В этом случае выполняются следующие соотношения:

$$\begin{cases} v_{\text{ПЕР},\alpha} = v_{\text{ПЕР,X}} \\ v_{\text{ОТН},\alpha} = v_{\text{ОТН}} \\ \rho = \frac{r - h_z}{\sin(0,5\pi - \alpha_I + \alpha)} \end{cases} \quad (9)$$

Тогда по формулам (1)–(9) получим для участков I и II соответственно:

$$dj = r - r_K \cdot \cos(\alpha_{II} - \alpha_I - \alpha) d\alpha, \quad (10)$$

$$dj = \frac{r - h_Z}{\cos(-\alpha_I + \alpha)} - r \cdot (1 - s) d\alpha. \quad (11)$$

После интегрирования выражений (10), (11) в пределах от 0 до  $\alpha_{II} - \alpha_I$  и от  $\alpha_{II} - \alpha_I$  до  $\alpha_{II} + \alpha_I$  соответственно и сложения результатов найдем итоговое выражение для суммарной деформации сдвига почвогрунта:

$$j = 4(h_Z - r) \operatorname{arctanh} \frac{\cos \alpha_{II} - 1}{\sin \alpha_{II}} - 2r \cdot (1 - s) \left( \alpha_{II} + \frac{1}{2} \sin(\alpha_I - \alpha_{II}) \right) + r \cdot (\alpha_{II} - \alpha_I) \quad (12)$$

Углы  $\alpha_I$  и  $\alpha_{II}$  найдем из геометрии задачи по схеме (рис. 1):

$$\alpha_I = \arccos \left( 1 - \frac{h_Z + h}{r} \right) \quad (13)$$

$$\alpha_{II} = \arccos \left( 1 - \frac{h_Z}{r} \right) \quad (14)$$

Уравнения (12)–(14) позволяют рассчитать деформацию сдвига, если известны значения  $r$ ,  $s$ ,  $h$  и  $h_Z$ . На рис. 2 представлен пример расчета «мгновенного» значения  $dj$  по формулам (10), (11) (отсчет угла  $\alpha$  ведется справа налево для облегчения сопоставления графиков (рис. 1) в силу специфики расчетной схемы: крайние точки графиков слева соответствуют крайней точке зоны контакта слева), на рис. 3 — пример расчета  $j$  по формуле (12) (в обоих случаях  $h_Z = 0,05$  м,  $h = 0,2$  м,  $r = 0,8$  м).

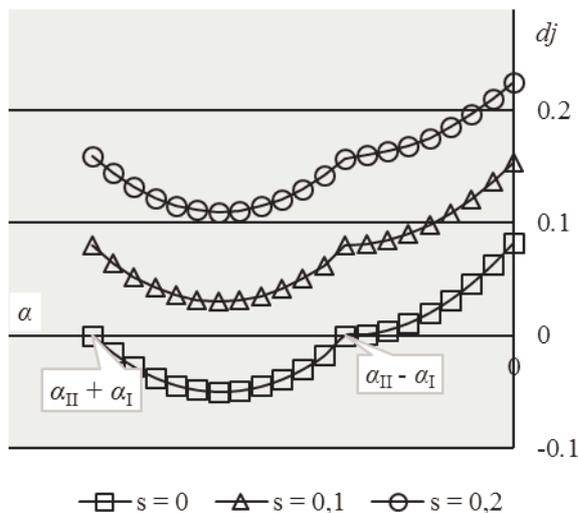


Рис. 2. Пример расчета «мгновенной» деформации сдвига в зависимости от коэффициента буксования

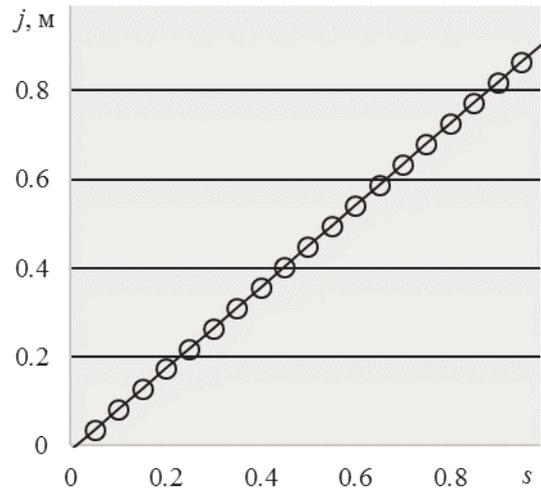


Рис. 3. Суммарная деформация сдвига почвогрунта в зависимости от коэффициента буксования

**Реализация результатов исследования.** Полученные выше соотношения предлагается использовать в моделях, описывающих взаимодействие эластичного колесного движителя с деформируемым почвогрунтом лесосеки, например [11; 17–20], однако значительный объем вычислений, требующихся для реализации этих моделей, делает целесообразным упрощение формул (12)–(14). Для этого воспользуемся формулой для осредненной длины пятна контакта движителя с почвогрунтом [11; 12]:

$$l = \sqrt{2rh_Z - h_Z^2} + \sqrt{2r \cdot (h_Z + h) - (h_Z + h)^2}. \quad (15)$$

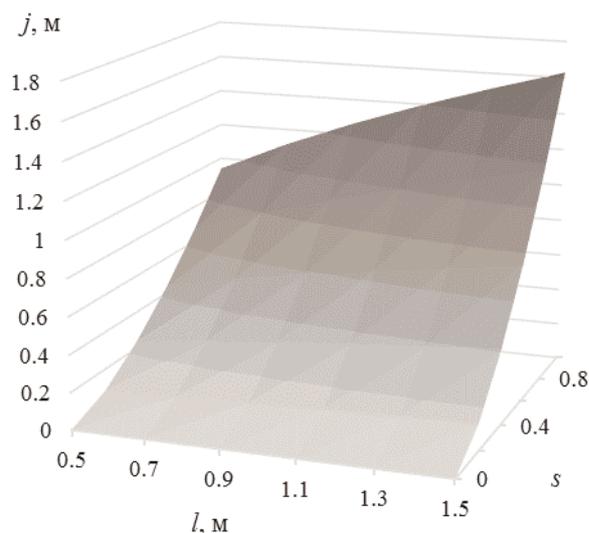
Нами была проведена серия вычислений при варьировании величин  $r$ ,  $s$ ,  $h$  и  $h_Z$ . В ходе вычислений рассчитывались значения  $j$  по формулам (12)–(14) и параллельно — длины пятна контакта  $l$  по формуле (15). После этого было проанализировано влияние значений  $r$ ,  $s$ ,  $h$ ,  $h_Z$  на деформацию сдвига  $j$  и взаимосвязь  $l$  и  $j$ .

Анализ численных результатов показал, что влияние  $r$ ,  $h$ ,  $h_Z$  можно без существенной потери точности учесть через производную от них величину  $l$ .

В итоге при помощи метода наименьших квадратов получена приближенная зависимость для оценки  $j$  по величине  $s$  и  $l$  ( $R^2 = 0,9554$ ):

$$j = 1,33 \sqrt{s^3 l}. \quad (16)$$

Для наглядности проиллюстрируем формулу (16) графиком (рис. 4).



**Рис. 4.** Иллюстрация зависимости суммарной деформации сдвига почвогрунта от коэффициента буксования колеса и длины пятна контакта

### Литература

1. Анисимов Г.М., Большаков Б.М. Основы минимизации уплотнения почвы трелевочными системами. СПб.: ЛТА, 1998. 108 с.

2. 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 14<sup>th</sup> International Multidisciplinary Scientific Geoconferences "Water Resources. Marine and Ocean Ecosystems", 16 – 26 June 2014, Albena, Bulgaria, Vol. 2 P. 443-446.

3. 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 // Вест. Тамбов. ун-та. Сер. Естеств. и техн. науки. 2014. Т. 19, № 5. С. 1499-1502.

4. Rowland D. Tracked vehicle ground pressure and its effect on soft ground performance // Proceedings of the 4th International ISTVS Conference, April 24-28.1972, Stockholm-Kiruna, Sweden. P. 1972. 353-384.

5. Rowland D., Peel J.W. Soft ground performance prediction and assessment for wheeled and tracked vehicles // Institute of mechanical engineering, 1975.

6. 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 14<sup>th</sup> International Multidisciplinary Scientific Geoconferences "Water Resources. Marine and Ocean Ecosystems", 16 – 26 June 2014, Albena, Bulgaria. 2014. Vol. 2. P. 407-414.

7. Turnage G.W. Prediction of in-sand tire and wheeled vehicle drawbar performance // Proceedings of the 8th International ISTVS Conference, Cambridge, UK, 6-10 July 1984, I:121-150.

8. Wong J.Y. Terramechanics and Off-road Vehicles. Amsterdam. The Netherlands: Elsevier Science, 1989.

9. 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.

10. Григорьев И.В., Макуев В.А., Никифорова А.И., Хитров Е.Г., Устинов В.В., Калинин С.Ю. Исследование коэффициента сопротивления передвижению колесных лесных ма-

шин // Вестн. Моск. гос. ун-та леса - Лесной вестник. 2014. № 2. С. 36-41.

11. Никифорова А.И., Хитров Е.Г., Пельмский А.А., Григорьева О.И. Определение осадки при движении лесозаготовительной машины по двуслойному основанию // Учен. зап. Петр. гос. ун-та. Сер. Естеств. и техн. науки. 2014. № 2. (139). С. 87-91.

12. Хитров Е.Г., Григорьев Г.В., Дмитриева И.Н., Ильющенко Д.А. Расчет конусного индекса по величине модуля деформации лесного почвогрунта // Системы. Методы. Технологии. 2014. № 4 (24). С. 127-131.

13. Григорьев И.В., Никифорова А.И., Пельмский А.А., Хитров Е.Г., Хахина А.М. Экспериментальное определение времени релаксации напряжений лесного грунта // Учен. зап. Петр. гос. ун-та. Сер. Естеств. и техн. науки. 2013. № 8 (137). С. 77-80.

14. 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 14<sup>th</sup> International Multidisciplinary Scientific Geoconferences "Water Resources. Marine and Ocean Ecosystems", 16 – 26 June 2014, Albena, Bulgaria. 2014. Vol. 2. P. 339-344.

15. Ларин В.В. Методы прогнозирования опорной проходимости многоосных колесных машин на местности: дис... д-ра техн. наук. М., 2007. 530 с.

16. Агейкин Я.С., Вольская Н.С. Динамика колесной машины при движении по неровной грунтовой поверхности. М.: МГИУ, 2003. 124 с.

17. Хитров Е.Г., Божбов В.Е., Ильющенко Д.А. Расчет несущей способности лесных почвогрунтов под воздействием колесных движителей. // Системы. Методы. Технологии. 2014. № 4 (24). С. 122-126.

18. Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Жукова А.И. Особенности динамического уплотнения почвы при ее циклическом нагружении // Актуальные проблемы современной науки. 2006. № 3. С. 286.

19. Анисимов Г.М., Григорьев И.В., Шкрум В.Д. Определение площади почвогрунта лесосеки, уплотняемой трелевочными системами // Изв. С.- Петерб. лесотехн. акад. 2006. № 177. С. 36-42.

20. Saarihtti M. Development of a protocol for ecoefficient wood harvesting on sensitive sites (Ecwood) // Soil interaction model. University of Helsinki, Department of Forest Resource Management, 2002. P. 39.

### Reference

1. Anisimov G.M., Bol'shakov B.M. Bases of minimization of consolidation of the soil by logging systems. SPb.: LTA, 1998. 108 p.

2. 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, Vol. 2 P. 443-446.

3. Grigorev I.V., Khitrov E.G., Nikiforova A.I., Grigoreva 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 // Vest. Tambov. un-ta. Ser. Estestv. i tekhn. nauki. 2014. Т. 19, № 5. P. 1499-1502.

4. Rowland D. Tracked vehicle ground pressure and its effect on soft ground performance // Proceedings of the 4th International ISTVS Conference, April 24-28. 1972, Stockholm-Kiruna, Sweden. P. 1972. 353-384.

5. Rowland D., Peel J.W. Soft ground performance prediction and assessment for wheeled and tracked vehicles // Institute of mechanical engineering, 1975.
6. 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 "Water Resources. Marine and Ocean Ecosystems", 16 - 26 June 2014, Albena, Bulgaria. 2014. Vol. 2. P. 407-414.
7. Turnage G.W. Prediction of in-sand tire and wheeled vehicle drawbar performance // Proceedings of the 8th International ISTVS Conference, Cambridge, UK, 6-10 July 1984, I:121-150.
8. Wong J.Y. Terramechanics and Off-road Vehicles. Amsterdam. The Netherlands: Elsevier Science, 1989.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. 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 "Water Resources. Marine and Ocean Ecosystems", 16 - 26 June 2014, Albena, Bulgaria. 2014. Vol. 2. P. 339-344.
15. Larin V.V. Forecasting methods supporting passability multi-wheeled vehicles on the terrain Metody prognozirovaniya opornoj prokhodivosti mnogogosnykh kolesnykh mashin na mestnosti: dis... d-ra tekhn. nauk. M., 2007. 530 p.
16. Ageikin Ya.S., Vol'skaya N.S. Dynamics wheeled vehicle when driving on uneven ground covering surface. M.: MGIU, 2003. 124 p.
17. 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.
18. Shapiro V.Ya., Grigor'ev I.V., Zhukova A.I. Features of dynamic soil compaction during its cyclic loading // Aktual'nye problemy sovremennoi nauki. 2006. № 3. P. 286.
19. Anisimov G.M., Grigor'ev I.V., Shkrum V.D. Determination of the area of soil-ground cutting area, sealing by logging systems // Izv. S.-Peterb. lesotekhn. akad. 2006. № 177. P. 36-42.
20. Saarilahti M. Development of a protocol for ecoefficient wood harvesting on sensitive sites (Ecowood) // Soil interaction model. University of Helsinki, Department of Forest Resource Management, 2002. P. 39.