

## РАСЧЕТ ГЛУБИНЫ КОЛЕИ КОЛЕСНОГО ДВИЖИТЕЛЯ ЛЕСНЫХ ТРАКТОРОВ НА СКЛОНАХ

кандидат технических наук **Е. Г. Хитров**<sup>1</sup>

доктор технических наук, профессор **И. М. Бартнев**<sup>2</sup>

1 – ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова,  
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

2 – ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова»,  
г. Воронеж, Российская Федерация

В предлагаемой статье представлена математическая модель, позволяющая проводить расчёт глубины колеи, образующейся под воздействием эластичного колесного движителя, с учётом свойств почвогрунта, параметров движителя и угла наклона поверхности движения машины по отношению к горизонту. При составлении математической модели учтено, что угол наклона трассы вызывает дополнительное смещение направления результирующей нагрузки на почвогрунт со стороны движителя от нормали к поверхности движения, что вызывает снижение несущей способности почвогрунта и, как следствие, увеличение глубины колеи. В качестве исходных данных в предлагаемой математической модели используются свойства почвогрунта и трассы движения (модуль деформации, внутреннее сцепление, угол внутреннего трения, удельный вес, модуль сдвига, толщина деформируемого слоя почвогрунта, угол наклона поверхности движения), а также характеристики движителя и его взаимодействия с почвогрунтом (приведенная нагрузка на колесо, внутреннее давление в шине, ширина шины, высота шины, диаметр колеса, коэффициент буксования, поступательная скорость машины, шаг грунтозацепов). По результатам расчётов показано, что с увеличением угла наклона поверхности движения до 30° глубина колеи увеличивается на величину до 40 %, а несущая способность почвогрунта снижается на величину до 25 %. Установлен нелинейный характер связей увеличения глубины колеи и снижения несущей способности почвогрунта с углом наклона поверхности движения. В статье предложены также упрощенные математические модели для расчета несущей способности почвогрунта в зависимости от модуля деформации (в пределах от 0.4 до 3 МПа), ширины колеса (в пределах от 0.6 до 0.8 м), диаметра колеса (в пределах от 1.2 до 1.8 м), угла наклона поверхности движения (в пределах от 5 до 30°); для расчета глубины колеи после однократного прохода колёсного движителя в зависимости от модуля деформации (в пределах от 0.4 до 3 МПа), ширины колеса (в пределах от 0.6 до 0.8 м), диаметра колеса (в пределах от 1.2 до 1.8 м), давления в шине (в пределах от 0.35 до 0.55 МПа), приведенной нагрузки на колесо (в пределах от 3.5 до 5.5 т), угла наклона поверхности движения (в пределах от 5 до 30°). В заключении приводятся соображения по перспективному направлению дальнейших теоретических исследований.

**Ключевые слова:** эластичный колесный движитель, колеобразование, несущая способность, угол наклона поверхности движения

## THE CALCULATION OF THE RUT DEPTH RUT AFTER THE PASSAGE OF WHEELED RUNNING GEAR TAKING ACCOUNT THE MOVEMENT INCLINATION

PhD in Engineering **E. G. Khitrov**<sup>1</sup>

DSc in Engineering, Professor **I. M. Bartenev**<sup>2</sup>

1 – Federal State Budget Education Institution of Higher Education «Saint-Petersburg State Forest Technical University under name of S.M.Kirov», Saint-Petersburg, Russian Federation

2 – Federal State Budget Education Institution of Higher Education «Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov», Voronezh, Russian Federation

### Abstract

The paper presents the mathematical model allowing to calculate the depth of the rut formed under the influence of elastic wheeled propulsion, based on the properties of soil parameters of the propeller and the angle of movement of the machine relative

to the horizon. When compiling the mathematical model we take into account that the angle of inclination causes an additional shift of the direction of the resultant load on the soil from the propulsion unit from the normal to the motion surface, that causes a decrease in the bearing capacity of soil and, as a consequence, increase of the rut depth. As input data in the proposed mathematical model we use the properties of soil and movement tracks (deformation modulus, internal cohesion, angle of internal friction, unit weight, shear modulus, thickness of the deformable layer of soil, angle of inclination of movement surface), and characteristics of the propeller and its interaction with the soil (load per wheel, internal tire pressure, tire width, tire height, wheel diameter, coefficient of slipping, translational speed of the machine, step of cleats). The results of the calculations demonstrate that with increasing slope angle of movement surface to 30°, the rut depth increases by up to 40% and the bearing capacity of soil is reduced by up to 25%. Non-linear nature of the relationship is defined to increase the depth of the rut and reduce of the bearing capacity of soil with a slope angle of the movement surface. The article also proposed a simplified mathematical model to calculate the bearing capacity of the soil depending on the modulus of deformation (in the range from 0.4 to 3 MPa), wheel width (in the range of 0.6 to 0.8 m), wheel diameter (in the range of 1.2 to 1.8 m), the angle of inclination of the movement surface (between 5 to 30°); to calculate the depth of ruts after a single pass of the wheel mover depending on the modulus of deformation (in the range from 0.4 to 3 MPa), wheel width (in the range of 0.6 to 0.8 m), wheel diameter (ranging from 1.2 to 1.8 m), tire pressure (in the range of from 0.35 to 0.55 MPa), given load on the wheel (ranging from 3.5 to 5.5 t), the slope angle of the movement surface (between 5 to 30°). Lastly, we give considerations for promising directions for future theoretical studies.

**Keywords:** elastic wheeled running gear, wheel track rutting, supporting capacity, movement surface slope

**Введение.** Оценка показателей взаимодействия движителей лесных машин с почвогрунтом является актуальной задачей науки о лесозаготовительном производстве. Цель настоящей статьи – разработать и представить математическую модель, позволяющую проводить расчёт глубины колеи, образующейся под воздействием эластичного колесного движителя, с учётом свойств почвогрунта, параметров движителя и угла наклона трассы движения машины по отношению к горизонту.

Угол наклона трассы вызывает дополнительное смещение направления результирующей нагрузки на почвогрунт со стороны движителя от нормали к поверхности движения. По этой причине снижается несущая способность почвогрунта и, как следствие, увеличивается глубина колеи – этот вопрос нуждается в дополнительной проработке [1, 2, 3].

**Постановка задачи.** В качестве основы математической модели примем формулу проф. Я.С. Агейкина [1], связывающую глубину колеи, параметры нагрузки и физико-механические свойства почвогрунта:

$$h = \frac{p_s p J a b \arctg\left(\frac{H-h}{ab}\right)}{(p_s - p) \cdot E}, \quad (1)$$

где  $p_s$  – несущая способность почвогрунта,

$p$  – среднее по пятну контакта давление движителя на почвогрунт,

$J$  – коэффициент учёта геометрии пятна кон-

такта,

$a$  – коэффициент учёта толщины деформируемого слоя почвогрунта,

$b$  – осредненная ширина пятна контакта движителя с почвогрунтом,

$H$  – толщина деформируемого слоя почвогрунта,

$E$  – модуль деформации почвогрунта.

Осредненная ширина пятна контакта движителя с почвогрунтом рассчитывается по формуле [1]:

$$b = B + \frac{10h \cdot h_z}{1 - h + H_T - h_z}, \quad (2)$$

где  $B$  – ширина шины,

$H_T$  – высота шины,

$h_z$  – радиальная деформация шины при качении по почвогрунту.

Для расчета радиальной деформации шины используем формулу, полученную на основании результатов аппроксимации сведений [4, 6, 7, 8, 9, 10]:

$$h_z = 0,0715 G_w^{0,691} B^{0,305} p_w^{-0,677} \cdot D^{-0,394} h^{-0,0891} p_w^{0,193} G_w^{-0,201} B^{-0,0574} \quad (3)$$

где  $p_w$  – внутреннее давление в камере шины,

$d$  – диаметр колеса машины,

$G_w$  – приведенная нагрузка на колесо машины.

Для расчета параметра  $J$ , учитывающего геометрию пятна контакта, известна формула [1, 11]:

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

где  $l$  – осредненная длина пятна контакта движителя с

почвогрунтом.

Осредненная длина пятна контакта движителя с почвогрунтом рассчитывается по формуле [1]:

$$l = \sqrt{dh_z - h_z^2} + \sqrt{d \cdot (h_z + h) - (h_z + h)^2}. \quad (5)$$

Коэффициент учёта толщины деформируемого слоя почвогрунта  $a$  находится по формуле:

$$a = \frac{0,64H + 0,64b}{H}. \quad (6)$$

Среднее по пятну контакта давление движителя на почвогрунт найдём по формуле:

$$P = \frac{G_w k_d}{bl k_f}, \quad (7)$$

где  $k_d$  – коэффициент динамичности нагрузки,

$k_f$  – коэффициент жесткости почвогрунта, позволяющий учесть влияние модуля деформации почвогрунта на форму пятна контакта.

Коэффициент динамичности нагрузки  $k_d$  можно найти, например, с учётом скорости движения машины  $v$  и реологического параметра почвогрунта – времени релаксации напряжений  $t_p$ :

$$k_d = \frac{l}{l + vt_p}. \quad (8)$$

При этом время релаксации напряжений равно:

$$t_p = 0,0083\varphi^{-1}, \quad (9)$$

где  $\varphi$  – угол внутреннего трения почвогрунта:

Коэффициент жесткости почвогрунта рассчитаем по формуле (модуль деформации  $E$  здесь имеет размерность [МПа]) [12]:

$$k_f = 0,8949E^{-0,12}. \quad (10)$$

Несущая способность почвогрунта зависит от ряда факторов, включающих как физико-механические свойства почвогрунта, так и параметры взаимодействия с ним движителя. В общем виде выражение для несущей способности примем следующее:

$$P_S = P_{S0} \alpha_Z, \quad (11)$$

где  $P_{S0}$  – несущая способность слоя почвогрунта неограниченной толщины,

$\alpha_Z$  – коэффициент учёта толщины деформируемого слоя.

Коэффициент  $\alpha_Z$  рассчитывается по формуле:

$$\alpha_Z = 1 + \frac{H^* h}{2H \cdot (H - h - 0,25H^*)}. \quad (12)$$

где  $H^*$  – вспомогательное обозначение:

$$H^* = \frac{\sqrt{2}}{2} \exp \left[ \left( \frac{\pi}{4} + \frac{3\varphi}{4} \right) \operatorname{tg} \frac{3\varphi}{4} \right] b \cos \frac{3\varphi}{4} \operatorname{tg} \varphi. \quad (13)$$

Несущая способность слоя почвогрунта неограниченной толщины оценивается по зависимости:

$$P_{S0} = 0,5J_1 K_1 N_1 \gamma b + N_2 \gamma h + J_3 K_3 N_3 C. \quad (14)$$

где  $K_1, K_3$  – коэффициенты учёта отклонения направления результирующей нагрузки от нормали к поверхности почвогрунта,

$J_1, J_3$  – коэффициенты учёта геометрии пятна контакта,

$N_1, N_2, N_3$  – коэффициенты учёта внутреннего трения почвогрунта,

$\gamma$  – объёмный вес почвогрунта,

$C$  – удельное внутреннее сцепление почвогрунта.

Коэффициенты учёта геометрии пятна контакта рассчитаем по формулам:

$$J_1 = \frac{l}{l + 0,4b}; \quad (15)$$

$$J_3 = \frac{l + b}{l + 0,5b}. \quad (16)$$

Коэффициенты учёта внутреннего трения почвогрунта равны:

$$N_1 = \frac{1 - S^4}{S^5}; \quad (17)$$

$$N_2 = \frac{1}{S^2}; \quad (18)$$

$$N_3 = \frac{2(1 + S^2)}{S^3}, \quad (19)$$

где  $S$  – вспомогательное обозначение:

$$S = \operatorname{tg} \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right). \quad (20)$$

Коэффициенты учёта отклонения направления результирующей нагрузки от нормали к поверхности почвогрунта находятся по следующим формулам:

$$K_1 = \frac{\pi - 4 \cdot (\beta + \alpha) \operatorname{tg} \varphi}{\pi + 4 \cdot (\beta + \alpha) \operatorname{tg} \varphi}; \quad (21)$$

$$K_3 = \frac{3\pi - 2 \cdot (\beta + \alpha)}{3\pi + 2 \cdot (\beta + \alpha)}, \quad (22)$$

где  $\alpha$  – угол наклона поверхности движения относительно горизонта (задаётся как исходная величина),

$\beta$  – угол отклонения результирующей нагрузки от нормали, вызванного касательными напряжениями.

Угол  $\beta$  равен:

$$\beta = \operatorname{arctg} \left( \frac{\tau}{P} \right), \quad (23)$$

где  $\tau$  – касательная нагрузка.

Для оценки касательной нагрузки воспользуемся формулой [13]:

$$\tau = \frac{jG \cdot (pt \operatorname{tg} \varphi + Ct - Cj)}{t \cdot (pt \operatorname{tg} \varphi + jG + Ct - Cj)}, \quad (24)$$

где  $G$  – модуль сдвига почвогрунта,

$t$  – шаг грунтозацепов движителя,

$j$  – сдвиговая деформация почвогрунта.

Оценка сдвиговой деформации почвогрунта производится по формуле [13]:

$$j = 1,33I^{0,55}S^{1,46}, \quad (25)$$

где  $S$  – коэффициент буксования движителя.

**Результаты исследования.** В сумме формулы (1)–(25) образуют математическую модель, позволяющую учесть угол наклона плоскости движения лесной машины при расчёте глубины колеи. В качестве исходных данных используются:

- свойства почвогрунта и трассы движения: модуль деформации  $E$ , внутреннее сцепление  $C$ , угол внутреннего трения  $\varphi$ , удельный вес  $\gamma$ , модуль сдвига  $G$ , толщина деформируемого слоя  $H$ , угол наклона  $\alpha$ .

- характеристики движителя и его взаимодействия с почвогрунтом: приведенная нагрузка  $G_W$ , внутреннее давление в шине  $p_W$ , ширина шины  $B$ , высота шины  $H_T$ , диаметр колеса  $d$ , коэффициент буксования  $S$ , поступательная скорость машины  $v$ , шаг грунтозацепов  $t$ .

Базовая зависимость математической модели – формула (1), при заданных значениях исходных данных хобращается в трансцендентное уравнение относительно глубины колеи  $h$ . Решение уравнение (1) осуществля-

ется методом итераций в любом современном пакете символьно-численных вычислений, например, *Maple*.

Зададимся следующими исходными данными для примера расчёта:  $E = 1$  МПа,  $G_W = 45$  кН,  $p_W = 350$  кПа,  $B = 0,7$  м,  $H_T = 0,55B$ ,  $d = 1,333$  м,  $S = 0,2$ ,  $v = 5$  км/час,  $t = 0,14$  м. Прочие свойства почвогрунта выразим через модуль деформации по формулам:

$$H = 0,4714E^{-0,479}. \quad (26)$$

$$C = 10,774E^{0,7737}. \quad (27)$$

$$\phi = 13,669E^{0,1818}. \quad (28)$$

$$\gamma = 8,4008E^{0,1168}. \quad (29)$$

$$G = 0,242E^{-0,422}. \quad (30)$$

На рис. 1 представлены результаты расчета глубины колеи после однократного прохода движителя при варьировании угла наклона трассы  $\alpha$ . Расчёты выполнены в программе Maple 2015.

График на рис. 2 построен для относительных величин  $\Delta h$ ,  $\Delta p_s$ , показывающих соответственно увеличение глубины колеи и снижение несущей способности почвогрунта при заданном угле наклона трассы относительно случая движения по горизонтальной поверхности.

По результатам расчётов можем заключить, что с увеличением угла наклона поверхности движения до  $30^\circ$  глубина колеи увеличивается на величину до 40 %, а несущая способность почвогрунта снижается на величину до 25 %. Отметим нелинейные связи увеличения глубины колеи и снижения несущей способности почвогрунта с углом наклона поверхности движения.

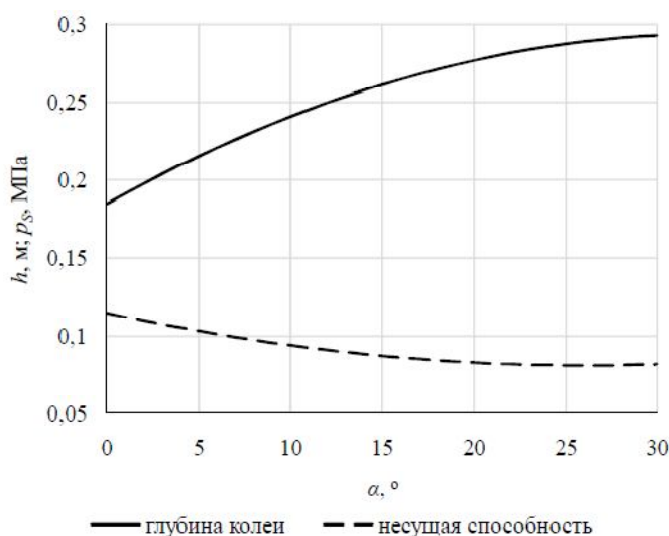


Рис. 1. Результаты расчета глубины колеи и несущей способности почвогрунта после однократного прохода движителя при варьировании угла наклона трассы  $\alpha$

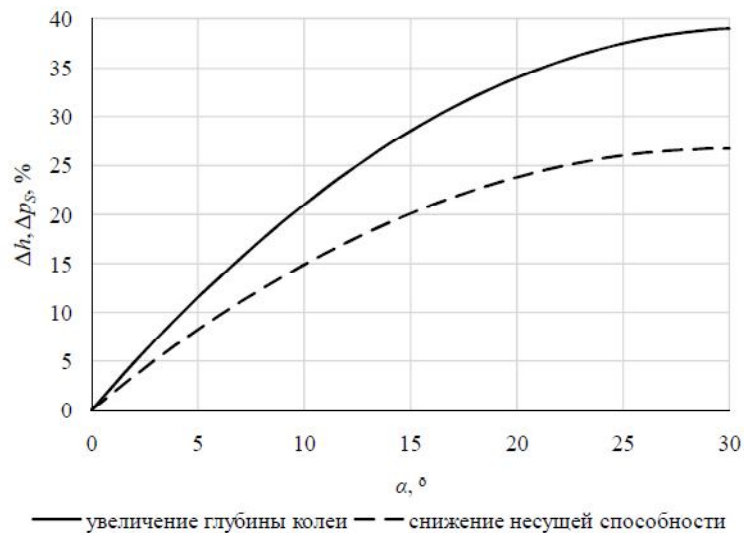


Рис. 2. Изменение глубины колеи и несущей способности почвогрунта после однократного прохода движителя при варьировании угла наклона трассы  $\alpha$

Для получения инженерных зависимостей, которые позволят в практических расчётах оценивать влияние факторов на глубину колеи и несущую способность почвогрунта, осуществим вычислительный эксперимент.

Зададимся диапазоном изменения исходных данных (при проведении расчётов все величины переводятся в единицы СИ, размерности здесь приводим лишь для удобства восприятия текста):

- модуль деформации  $E$  в пределах от 0,4 до 3 МПа
- ширина колеса  $B$  в пределах от 0,6 до 0,8 м
- диаметр колеса  $d$  в пределах от 1,2 до 1,8 м
- коэффициент буксования  $S$  в пределах от 0,1 до 0,3
- давление в шине  $p_W$  в пределах от 0,35 до 0,55 МПа
- приведенная нагрузка на колесо  $G_W$  в пределах от 3,5 до 5,5 т
- угол наклона поверхности движения  $\alpha$  в пределах от 5 до 30°
- шаг грунтозацепов  $t$  в пределах от 0,1 до 0,2 м
- скорость поступательного движения колеса  $v$  в пределах от 4 до 6 км/час

В указанных диапазонах изменения исходных данных проведены расчёты глубины колеи  $h$  и несущей способности почвогрунта  $p_s$ . Исходные данные генерировались в программе Maple 2015 как случайные величины, распределенные по закону равной плотно-

сти, в той же программе проводились расчёты по формулам (1)–(25). Всего получено 5000 сочетаний исходных данных и решений для глубины колеи  $h$  и несущей способности  $p_s$ . Результаты расчётов аппроксимировали при помощи метода наименьших квадратов.

Ряд факторов по результатам обработки расчётных данных признан незначимым при их изменении в пределах, указанных выше по тексту. Так, на глубину колеи не оказывают заметного влияния коэффициент буксования  $S$  (в пределах от 0,1 до 0,3), шаг грунтозацепов  $t$  (в пределах от 0,1 до 0,2 м), скорость поступательного движения колеса  $v$  (в пределах от 4 до 6 км/час). На несущую способность почвогрунта не оказывают значимого влияния коэффициент буксования  $S$  (в пределах от 0,1 до 0,3), давление в шине  $p_W$  (в пределах от 0,35 до 0,55 МПа), приведенная нагрузка на колесо  $G_W$  (в пределах от 3,5 до 5,5 т), шаг грунтозацепов  $t$  (в пределах от 0,1 до 0,2 м), скорость поступательного движения колеса  $v$  (в пределах от 4 до 6 км/час).

Расчет несущей способности почвогрунта  $p_s$  [МПа] в зависимости от модуля деформации  $E$  (в пределах от 0,4 до 3 МПа), ширины колеса  $B$  (в пределах от 0,6 до 0,8 м), диаметра колеса  $d$  (в пределах от 1,2 до 1,8 м), угла наклона поверхности движения  $\alpha$  (в пределах от 5 до 30°) ( $R^2 = 0,94$ ):

$$p_s = 0,11 \cdot \frac{E^{0,85} B^{0,11}}{\alpha^{0,079} d^{0,093}} \quad (31)$$

Расчет глубины колеи после однократного

прохода колёсного движителя  $h$  [м] в зависимости от модуля деформации  $E$  (в пределах от 0,4 до 3 МПа), ширины колеса  $B$  (в пределах от 0,6 до 0,8 м), диаметра колеса  $d$  (в пределах от 1,2 до 1,8 м), давления в шине  $p_w$  (в пределах от 0,35 до 0,55 МПа), приведенной нагрузки на колесо  $G_w$  (в пределах от 3,5 до 5,5 т), угла наклона поверхности движения  $\alpha$  (в пределах от 5 до 30°) ( $R^2 = 0,92$ ):

$$h = 0,015 \cdot \frac{p_w^{0,23} G_w^{1,5} \alpha^{0,092}}{E^{1,7} B^{2,1} d^{0,60}}. \quad (32)$$

Полученные упрощенные модели (31), (32) предлагаем использовать в практических расчётах для оценки влияния угла наклона поверхности движения на глубину колеи, образующейся под

воздействием эластичного движителя. Полагаем перспективным направлением дальнейших теоретических исследований проработку вопросов оценки тягово-сцепных свойств колёсных машин при работе на наклонной опорной поверхности.

**Благодарности.** Исследования выполнены при поддержке Федерального государственного бюджетного учреждения «Российский Фонд Фундаментальных Исследований» в рамках реализации проекта № 16-38-50117 «Исследование взаимодействия колесного движителя с почво-грунтом и его курсовой устойчивости в условиях склонов лесосеки и вырубки».

### Библиографический список

- 1 Агейкин, Я.С. Вездеходные колесные и комбинированные движители: теория и расчет [Текст] / Я.С. Агейкин. – М.: Машиностроение, 1972. – 184 с.
- 2 Wong, J. Y. Terramechanics and Off-Road Vehicle Engineering [Text] / J. Y. Wong, Second Edition. Elsevier, Oxford, England, 488 pages, 2010. ISBN: 978-0-7506-8561-0.
- 3 Беккер, М.Г. Введение в теорию систем местность-машина [Текст] / пер. с англ ; под ред. В. В. Гуськова. – М.: Машиностроение, 1973. – 520 с.
- 4 Хитров, Е.Г. Модель для оценки радиальной деформации колеса лесной машины с учетом деформации почвогрунта [Текст] / Е.Г. Хитров, И.В. Григорьев, В.А. Макуев, А.М. Хахина, С.Ю. Калинин // Вестник Московского государственного университета леса - Лесной вестник. – 2015. – Т. 19. – № 6. – С. 87-90.
- 5 Wismer, R.D. Off-road traction prediction for wheeled vehicles. [Text] / R.D. Wismer, H. J. Luth // Transaction ASAE 17(1), 1973. – 8-10. – 14 p.
- 6 Saarihahti, M. Development of a protocol for ecoefficient wood harvesting on sensitive sites (Ecowood). Evaluation of the WES-method in assessing the trafficability of terrain and the mobility of forest tractors [Text] / M. Saarihahti // University of Helsinki, Department of Forest Resource Management. – 2002. – 28 p.
- 7 Dwyer, M.J. Tractive performance of a wide, low-pressure tyre compared with conventional tractor drive tyres. [Text] / M.J. Dwyer // Journal of terramechanics. – 1987. – 24(3). – 227-234 pp.
- 8 Brixius, W.W. Traction prediction equations for bias ply tires [Text] / W.W. Brixius // ASAE paper. – 1987. – no. 87-1622.
- 9 Maclaurin, E.B. The use of mobility numbers to describe the in-field tractive performance of pneumatic tyres. [Text] / E.B. Maclaurin // Proceedings of the 10th International ISTVS Conference, Kobe, Japan, August 20-24, 1990. I: 177-186.
- 10 Ashmore, C. An empirical equation for predicting tractive performance of log- skidder tires. [Text] / C. Ashmore, C. Burt, J. Turner // Transactions of the ASAE. – 1987. – 30(5). – 1231-1236 pp.
- 11 Хитров, Е.Г. Расчет несущей способности лесных почвогрунтов под воздействием колесных движителей [Текст] / Е.Г. Хитров, В.Е. Божбов, Д.А. Ильюшенко // Системы. Методы. Технологии. – 2014. – № 4 (24). – С. 122-126.
- 12 Хахина, А.М. Влияние модуля деформации на форму пятна контакта движителя с почвогрунтом [Текст] / А.М. Хахина, В.В. Устинов // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2015. – Т. 3. – № 9-2 (20-2). – С. 287-290.
- 13 Иванов, В.А. Уточненные зависимости для расчета сдвиговой деформации лесного почвогрунта по величине буксования и параметрам пятна контакта [Текст] / В.А. Иванов, А.М. Хахина, В.В. Устинов, Р.К. Коротков // Системы. Методы. Технологии. – 2015. – № 4 (28). – С. 116-120.

## References

- 1 Agejkin, Ja.S. *Vezdehodnye kolesnyye i kombinirovannyye dvizhiteli: teorija i raschet* [Theory and calculation of wheeled vehicles]. Moscow, 1972, 184 p. (In Russian)
- 2 Wong J.Y. *Terramechanics and Off-Road Vehicle Engineering*. Second Edition. Elsevier, Oxford, England, 2010, 488 p.
- 3 Bekker M.G. *Vvedenie v teoriju sistem mestnost'-mashina* [Introduction to systems theory-terrain vehicle]. Moscow, 1973, 520 p. (In Russian)
- 4 Khitrov E.G., Grigorev I.V., Makuev V.A., Khakhina A.M., Kalinin S.Ju. *Model' dlja ocenki radial'noj deformacii koleasa lesnoj mashiny s uchetom deformacii pochvogrunta* [Model to assess the tyre deflection of the wheeled forest machine regarding the forest soil strain] *Vestnik MGUL -Lesnojvestnik* [Herald MSFU - Forestry Gazette]. 2015, no. 6(19), pp. 87-90. (In Russian)
- 5 Wismer R.D., Luth, H. J. Off-road traction prediction for wheeled vehicles. *Transaction ASAE* 17(1), 1973, 8-10, 14 p.
- 6 Saarilahti M. Development of a protocol for ecoefficient wood harvesting on sensitive sites (Ecowood). Evaluation of the WES-method in assessing the trafficability of terrain and the mobility of forest tractors [Text]/M. Saarilahti. University of Helsinki, Department of Forest Resource Management, 2002, 28 p.
- 7 Dwyer M.J. Tractive performance of a wide, low-pressure tyre compared with conventional tractor drive tyres. *Journal of terramechanics* 1987, 24 (3), 227-234 pp.
- 8 Brixius W.W. Traction prediction equations for bias ply tires. *ASAE paper* 1987, no. 87-1622.
- 9 Maclaurin E. B. The use of mobility numbers to describe the in-field tractive performance of pneumatic tyres. *Proceedings of the 10th International ISTVS Conference, Kobe, Japan, August 20-24, 1990*, I: 177-186.
- 10 Ashmore C., Burt C., Turner J. An empirical equation for predicting tractive performance of log- skidder tires. *Transactions of the ASAE*. 1987, 30(5), 1231-1236 pp.
- 11 Khitrov E.G., Bozhbov V.E., Iljushenko D.A. *Raschet nesushhej sposobnosti lesnyh pochvogruntov pod vozdeystviem kolesnyh dvizhitelej* [Calculation of bearing capacity of forest soils under the influence of wheeled mover]. *Sistemy. Metody. Tehnologii* [Systems. Methods. Technologies]. 2014, no. 4 (24), pp. 122-126. (In Russian)
- 12 Khakhina A.M., Ustinov V.V. *Vlijanie modulja deformacii na formu pjatna kontakta dvizhitelja s pochvogruntom* [Dependence of contact area and deformation modulus of forest soil] *Aktual'nye napravlenija nauchnyh issledovanij XXI veka: teorija i praktika* [Current research trends of the XXI century: Theory and Practice]. 2015, Vol. 3, no 9-2 (20-2), pp. 287-290. (In Russian)
- 13 Ivanov V.A., Khakhina A.M., Ustinov V.V., Korotkov R.K. *Utochnnennye zavisimosti dlja rascheta sdvigovoj deformacii lesnogo pochvogrunta po velichine buksovanija i parametram pjatna kontakta* [Refined dependencies for evaluating forest soil shear deformation through sliding ratio and contact patch parameters] *Sistemy. Metody. Tehnologii* [Systems. Methods. Technologies]. 2015, no. 4 (28), pp. 116-120. (In Russian)

## Сведения об авторах

*Хитров Егор Германович* – доцент кафедры математических методов в управлении ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова», кандидат технических наук, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; e-mail: yegorkhitrov@gmail.com

*Бартенев Иван Михайлович* – профессор кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», доктор технических наук, профессор, г. Воронеж, Российская Федерация, e-mail: kafedramehaniza@mail.ru

## Information about authors

*Khitrov Egor Germanovich* – Associate Professor of the Department of mathematical methods in management, Federal State Budget Education Institution of Higher Education «Saint-Petersburg State Forest Technical University under name of S.M.Kirov», PhD in Engineering, Saint-Petersburg, Russia-Federation; e-mail: yegorkhitrov@gmail.com

*Bartenev Ivan Mikhailovich* – Professor of Forestry Mechanization department, Federal State Budget Education Institution of Higher Education «Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov», DSc in Engineering, Professor, Voronezh, Russian Federation; e-mail: kafedramehaniza@mail.ru.