

DOI: 10.15393/j2.art.2019.4983

УДК 630.3

Статья

Исследование напряжённо-деформированного состояния почвогрунта под гусеничной лесной машиной

Константинов Валерий Фёдорович

кандидат технических наук, Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (Российская Федерация), konstantinov@mgul.ac.ru

Борисов Вячеслав Алексеевич

кандидат технических наук, Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (Российская Федерация), vborisov@bmstu.ru

Курляндский Александр Сергеевич

Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (Российская Федерация), sashaku.wot@yandex.ru

Получена: 27 Ноября 2019 / Принята: 22 декабря 2019 / Опубликовано: 31 декабря 2019

Аннотация: Рассматривается актуальность проблемы повышения проходимости лесозаготовительных машин, исследуемой с учётом механики грунтов. Представлены характеристики почвенно-грунтовых условий, а также зависимости воздействия гусеничной лесозаготовительной машины на почвогрунт от глубины и уклона местности на лесопокрытых территориях Российской Федерации. Данное исследование посвящено определению характера поля напряжений и деформаций в почвогрунте под гусеницами лесной машины, чтобы учитывать данные воздействия на растительность в зоне лесозаготовительных и транспортных операций, так как, учитывая многообразие структуры и вязко-упруго-пластические свойства почвогрунта, возможно представить только качественную картину. Рассматриваемая задача принадлежит к классу задач плоской деформации. В статье приводятся формулы для приближенного определения напряжений в грунтовом массиве от полосовой нагрузки. В результате проведённого исследования было выявлено, что с удалением от центра загруженной поверхности и с увеличением глубины вертикальные давления уменьшаются. Горизонтальными сечениями изобар можно проследить закономерности изменения давлений по ширине грунтового массива. А общая закономерность сводится к тому, что при увеличении глубины воздействия интенсивность давлений уменьшается, а зона их действия по ширине увеличивается. Также было получено поле напряжений в зоне воздействия лесной машины на почвогрунт, пригодное для построения математической модели.

Ключевые слова: лесозаготовительная машина, гусеничный движитель, лесная почва, глубина колеи, тяговые и сцепные свойства, проходимость

DOI: 10.15393/j2.art.2019.4983

Article

Investigation of stress-strain state of soil under a tracked forest machine

Valery Konstantinov

PhD in engineering, Moscow State Technical University named after N. E. Bauman (Russian Federation), konstantinov@mgul.ac.ru

Vyacheslav Borisov

PhD in engineering, Moscow State Technical University named after N. E. Bauman (Russian Federation), vborisov@bmstu.ru

Alexander Kurlandsky

Moscow State Technical University named after N. E. Bauman (Russian Federation), sashaku.wot@yandex.ru

Received: 27 November 2019 / Accepted: 22 December 2019 / Published: 31 December 2019

Abstract: The article considers the urgent problem of increasing the cross-country ability of forestry machines by taking soil mechanics into account. The characteristics of soil conditions, as well as the dependence of the soil impact of a tracked forestry machine on the depth and slope of the terrain in the forested areas of the Russian Federation are presented. This study is focused on determining the nature of the stress and strain field in the soil under the forest machine tracks to take into account the data on the impact of vegetation in the area of logging and transport operations since the diversity of the soil structure and its visco-elastic-plastic properties provides only a qualitative explanation of the situation. The problem under consideration belongs to the class of plane deformation problems. The article provides formulas for the approximate determination of stresses in a soil mass from a band load. It was found that with the increasing distance from the center of the loaded surface and with the increasing depth, the vertical pressures decrease. By horizontal sections of isobars, one can trace the patterns of pressure changes across the width of the soil mass. And the general pattern is that when the depth of the impact increases, the pressure intensity decreases, and the zone of their action increases in width. A stress field was also obtained in the zone of the forest machine impact on the soil suitable for constructing a mathematical model.

Keywords: forestry machine, caterpillar mover, forest soil, track depth, traction and hitching properties, cross-country ability

1. Введение

Характер поля напряжений и деформаций в почвогрунте под гусеницами лесной машины важно представлять, чтобы учитывать воздействие их на растительность в зоне лесозаготовительных и транспортных операций. Учитывая многообразие структуры и вязкоупруго-пластические свойства почвогрунта, возможно представить только качественную картину. Обратимся к классической задаче механики грунтов.

При разработке методов расчёта грунтовой среды, а следовательно, математического описания наблюдаемых в ней процессов приходится прибегать к схематизации рассматриваемых явлений и свойств грунтов. Работами Н. П. Пузыревского, Н. М. Герсеванова, В. А. Флорина, Н. А. Цытовича, а также зарубежных учёных Ж. Буссинеска, Ф. Фламана, К. Роскоу, К. Терцаги, Э. Керизель, И. Бринч-Хансена и др. была показана допустимость применения к грунтам решений теории упругости, обозначены границы применения к грунтам этой расчётной модели.

Рассмотрим идеализированные условия воздействия гусеничной машины в предположении упругой стадии деформирования почвогрунта.

Плоская задача теории упругости. Трёхмерная задача теории упругости сводится к двумерной при следующих условиях:

- при деформации тела перемещения точек тела происходят только параллельно определённой плоскости (случай плоской деформации);
- компоненты тензора напряжений, параллельные некоторой оси, равны нулю (плоское напряжённое состояние).

Примером плоской деформации является деформация призматического или цилиндрического тела постоянного поперечного сечения, имеющего достаточно большую длину в направлении продольной оси и подвергающегося действию равномерной нагрузки по длине, взаимно уравновешенной в любой плотности, перпендикулярной продольной оси.

Подробную информацию по этой теме можно получить в работах [1—4].

Задача Фламана (Flamant, 1892). Областью, занятой упругой средой, в данной задаче является полупространство $0 \leq z < \infty$ (рисунок 1). Граница области $z = 0$ свободна от напряжений везде, за исключением оси y , вдоль которой приложена линейная нагрузка равномерной интенсивности p .

2. Материалы и методы

Рассматриваемая задача принадлежит к классу задач плоской деформации. Это обусловлено структурой области и граничными условиями. Все плоскости, перпендикулярные оси y , являются в данной задаче равноправными. Поэтому все искомые функции не зависят от координаты y .

Следовательно, достаточно рассмотреть только одну из таких плоскостей, например, плоскость xOz . Компонента v вектора смещения вдоль оси y тождественно равна нулю, однако нормальное напряжение σ_y отлично от нуля.

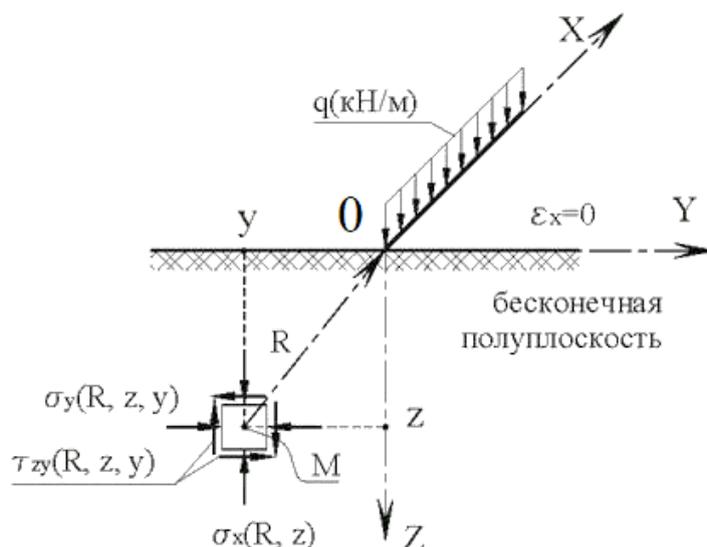


Рисунок 1. Схема к задаче Фламана

Figure 1. Scheme to the Flamant problem

Тогда в сечениях полупространства плоскостями, нормальными к оси x , будем иметь полуплоскости, напряжённо-деформированное состояние которых подобно, а деформация по направлению оси x равна нулю. Как уже отмечалось, такое напряжённое состояние называется плоской деформацией [9—11]. Напряжения в точке M полуплоскости с радиус-вектором R и координатами y, z в соответствии с решением Фламана определяются формулами:

$$\sigma = \frac{2 \times q \times z^3}{\pi \times R^4}; \sigma_y = \frac{2 \times q \times y^2}{\pi \times R^4}; \tau_{zy} = \frac{2 \times q \times y \times z^2}{\pi \times R^4}. \quad (1)$$

Практический интерес представляет распределение напряжений в полуплоскости от действия бесконечно протяжённой полосовой нагрузки (рисунок 2) конечной ширины B . Подобное напряжённое состояние возникает в поперечных сечениях основания протяжённого ленточного фундамента.

Напряжения при действии на поверхность грунта равномерно распределённой полосообразной нагрузки представлены на рисунке 2 [7], [8].

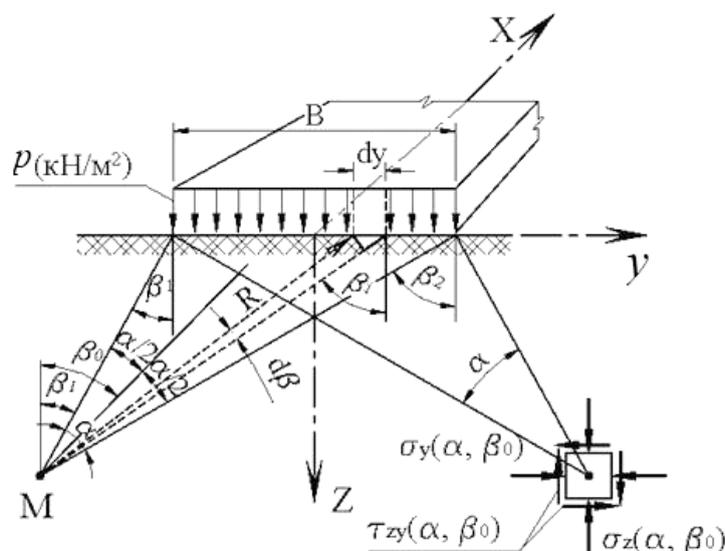


Рисунок 2. Напряжённое состояние полуплоскости от действия полосовой нагрузки интенсивностью p (кН/м²)

Figure 2. The stress state of the half-plane from the action of a strip load of intensity p (кН/м²)

Пусть интенсивность нагрузки в пределах полосы постоянна и равна p (кН/м²). Соединим точку M с концами полосовой нагрузки в сечении полуплоскостью. Угол между проведёнными таким образом лучами из точки M назовём углом видимости α . Интенсивность полосовой нагрузки dq шириной dy будет равна: $dq = p \times dy = p \times R \times db/\cos(b_i)$, где b_i — угол между вертикалью и лучом, проведённым из точки M к площадке dy ; db — угол видимости площадки dy . Граничными значениями угла b_i будут углы b_1 и b_2 , составляемые с вертикалью лучами угла видимости α . Положительное направление указанных углов отсчитывается от вертикали при повороте её в сторону луча по ходу часовой стрелки.

Подставляя в уравнения (1) вместо q dq и производя их интегрирование по b , получим выражения для определения напряжений в грунтовом массиве от полосовой нагрузки:

$$\begin{aligned} \sigma_z &= -\frac{p}{\pi} \left[\beta_1 - (\pm\beta_2) + \frac{1}{2} \sin 2\beta_1 - \frac{1}{2} \sin(\pm 2\beta_2) \right]; \\ \sigma_y &= -\frac{p}{\pi} \left[\beta_1 - (\pm\beta_2) - \frac{1}{2} \sin 2\beta_1 + \frac{1}{2} \sin(\pm 2\beta_2) \right]; \\ \sigma_{yz} &= -\frac{p}{2\pi} (\cos 2\beta_2 - \cos 2\beta_1). \\ \beta_0 &= \frac{\beta_1 + \beta_2}{2}. \end{aligned} \tag{2}$$

Здесь $(+\beta)$ — для точек, лежащих вне полосы нагружения, знак $(-\beta)$ — для точки в пределах полосы.

Компоненты деформации могут быть выражены через компоненты напряжения:

$$\begin{aligned}\varepsilon_y &= \frac{1}{E}(1-\mu^2)\sigma_y - \mu(1+\mu)\sigma_z; \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E}(1-\mu^2)\sigma_z - \mu(1+\mu)\sigma_y; \\ \gamma_{yz} &= \frac{1+\mu}{E}\tau_{yz}.\end{aligned}\tag{3}$$

где E — модуль упругости, μ — коэффициент Пуассона.

3. Результаты исследования

В результате проведённого исследования было выявлено следующее:

- С удалением от центра загруженной поверхности и с увеличением глубины вертикальные давления уменьшаются.
- Горизонтальными сечениями изобар можно проследить закономерности изменения давлений по ширине грунтового массива.

Общая закономерность сводится к следующему:

- В несвязных грунтах можно приблизительно полагать, что область распределения давлений в грунтовом массиве ограничена расходящимися лучами, исходящими из крайних точек загруженной поверхности и наклонёнными к горизонтали под острыми углами, равными углу внутреннего трения [12—14].

На рисунках 3—6 приведены схемы воздействия при проведённом исследовании воздействия на почвогрунт гусеничных лесозаготовительных машин с различными массами и колёй, а также представлены изобары, распоры и сдвиги на глубинах от 0,25 до 1 м.

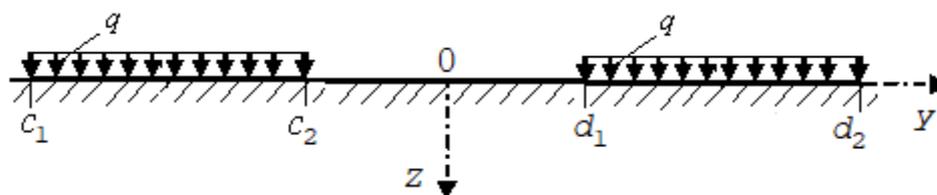


Рисунок 3. Схема воздействия гусеничной машины на почвогрунт: масса машины 6,5 т; ширина гусеницы 300 мм; колея 2100 мм; среднее давление 50 кПа

Figure 3. Scheme of the impact of the tracked vehicle on the soil: vehicle weight 6.5 tons; track width 300 mm; track 2100 mm; average pressure is 50 kPa

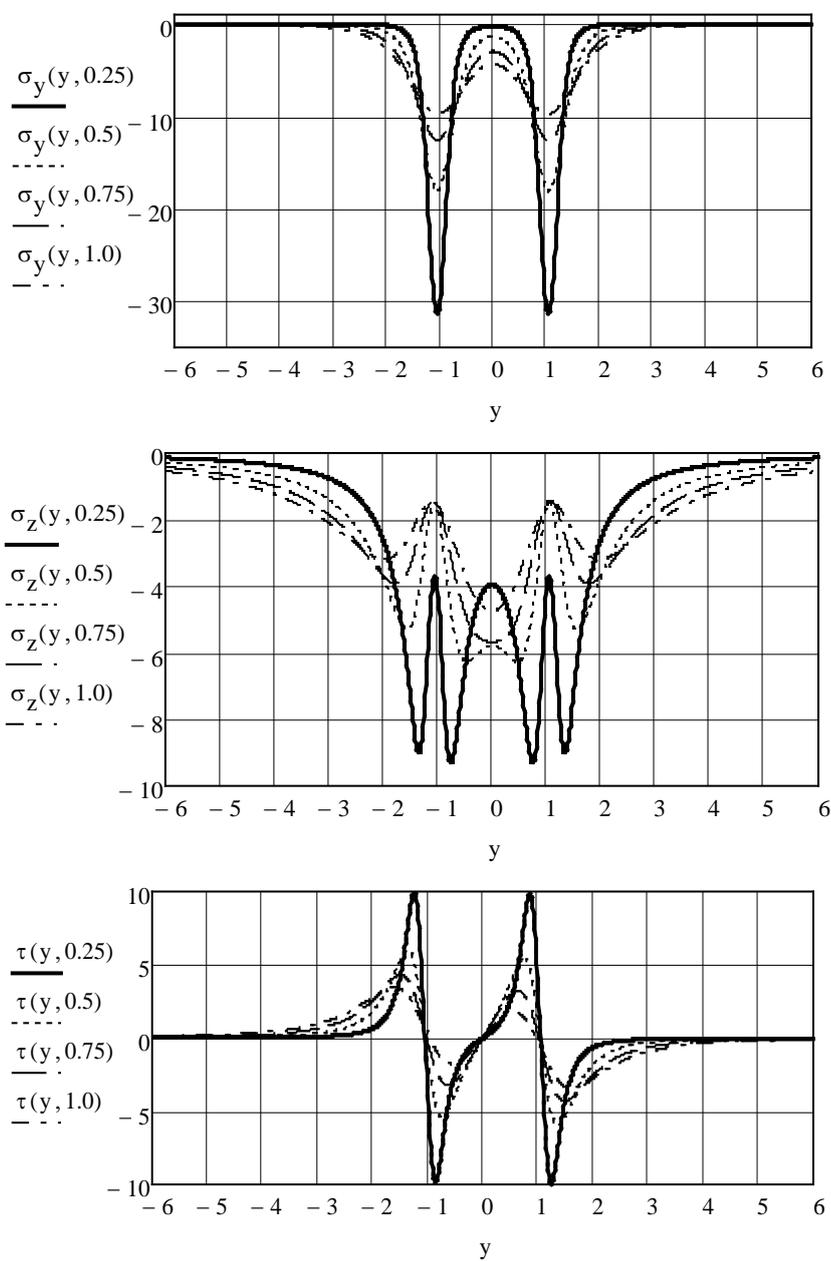


Рисунок 4. Изобары, распоры и сдвиги на глубине 0,25; 0,5; 0,75; и 1,0 м

Figure 4. Isobar, spacers and shifts at depth 0.25; 0.5; 0.75; and 1.0 m

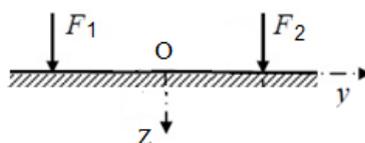


Рисунок 5. Схема воздействия колёсной машины на почвогрунт: масса машины 5 т; колея 1500 мм

Figure 5. Scheme of the impact of a wheeled machine on the soil: machine weight 5 t; track of 1500 mm

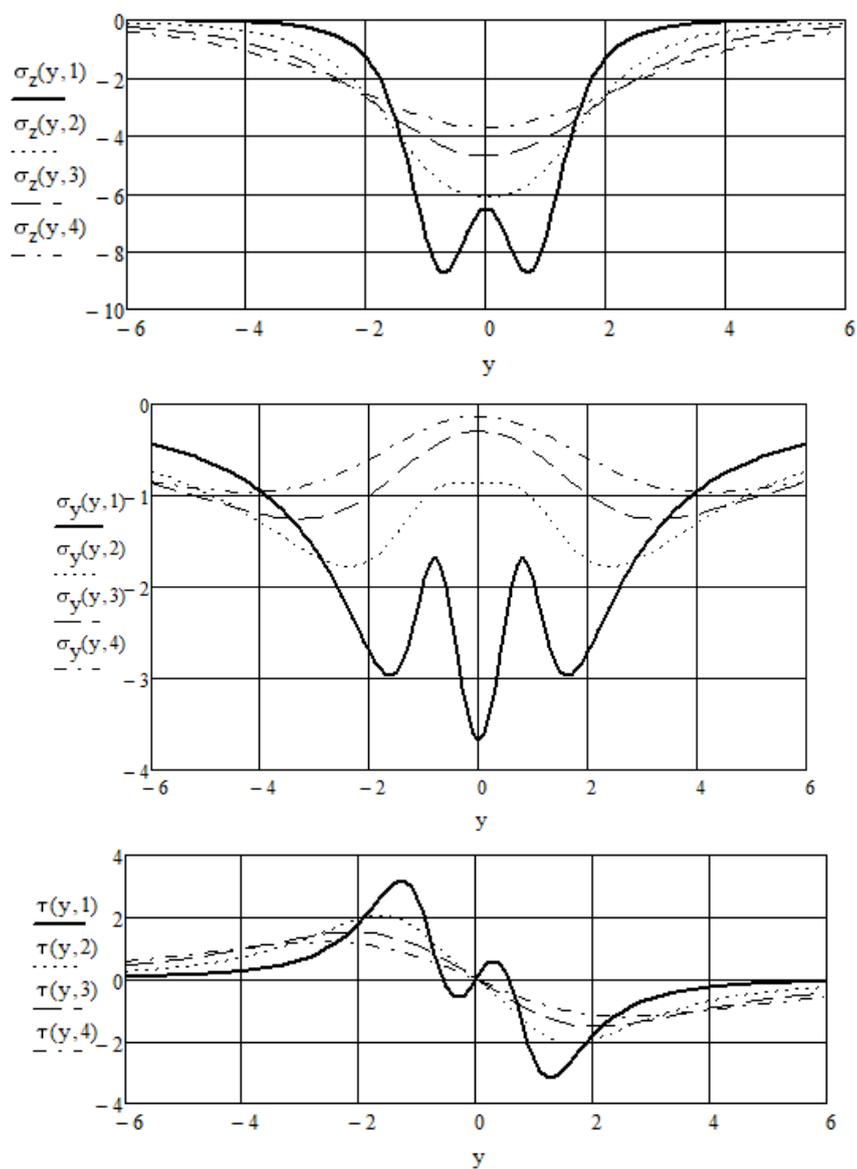


Рисунок 6. Изобары, распоры и сдвиги на глубине 0,25; 0,5; 0,75; и 1,0 м

Figure 6. Isobar, spacers and shifts at depth 0.25; 0.5; 0.75; and 1.0 m

4. Выводы

- С увеличением глубины воздействия лесозаготовительной машины на почвогрунт интенсивность давлений уменьшается, а зона их действия по ширине увеличивается.
- Зона воздействия лесной машины достигает более 12 м по ширине, когда колея не более 1,5 м [15], [16].
- Поле напряжений в зоне воздействия рассматриваемой лесозаготовительной машины на почвогрунт пригодно для построения математической модели [17].

Список литературы

1. Александров А. В., Потапов В. Д. Основы теории упругости и пластичности. М.: Высш. шк., 1990. 400 с.
2. Самуль В. И. Основы теории упругости и пластичности. М.: Высш. шк., 1982. 264 с.
3. Безухов Н. И. Основы теории упругости, пластичности и ползучести. М.: Высш. шк., 1968. 512 с.
4. Киселев В. А. Плоская задача теории упругости. М.: Высш. шк., 1976. 151 с.
5. Вонг Дж. Теория наземных транспортных средств: Пер. с англ. М.: Машиностроение, 1982. 284 с.
6. Агейкин Я. С. Вездеходные колёсные и комбинированные движители. М.: Машиностроение, 1981. 232 с.
7. Цытович Н. А. Механика грунтов: Учебное пособие. М.: Высш. шк., 1963. 636 с.
8. Цытович Н. А., Тер-Мартirosян З. Г. Основы прикладной геомеханики в строительстве: Учебное пособие. М.: Высш. шк., 1981. 317 с.
9. Борисов В. А., Акинин Д. В., Кирей В. В. Распределение нормальных реакций по длине опорной поверхности гусеничных движителей лесозаготовительных машин с полужёсткой подвеской // Лесной вестник. Forestry Bulletin. 2017. Т. 21, № 6. С. 31—37.
10. Акинин Д. В., Борисов В. А., Казначеева Н. И., Жиганов Н. Н., Авшарян Т. М. Анализ сцепления шин и гусениц лесозаготовительных машин с поверхностью качения // Наука сегодня: задачи и пути их решения: Материалы междунар. научно-практич. конф. 25 мая 2016 г. Вологда: Маркер, 2016. С. 11—13.
11. Акинин Д. В., Казначеева Н. И., Борисов В. А. Лесные машины и почвенная часть лесной экосистемы // Наука третьего тысячелетия: Сб. ст. Междунар. научно-практич. конф. Самара, 2015. С. 23—31.
12. Борисов В. А., Акинин Д. В., Казначеева Н. И. Анализ характеристик динамических воздействий на лесные машины при погрузочных и других технологических операциях // Проблемы и перспективы технических наук: Сб. ст. Междунар. научно-практич. конф. Уфа, 2015. С. 28—34.
13. Акинин Д. В., Казначеева Н. И., Борисов В. А. Способы снижения динамических нагрузок, действующих на гусеничную лесозаготовительную машину // Проблемы и перспективы технических наук: Сб. ст. Междунар. научно-практич. конф. Уфа, 2015. С. 3—12.
14. Акинин Д. В., Борисов В. А., Казначеева Н. И. Глубина колеи и число опорных катков гусеничной лесозаготовительной машины // Наука сегодня: проблемы и перспективы развития: Сб. науч. тр. по материалам междунар. научно-практич. конф.: в 3 ч. / Научный центр «Диспут». Вологда: Маркер, 2015. С. 5—8.

15. Акинин Д. В., Казначеева Н. И., Борисов В. А. Анализ взаимодействия лесных машин с почвенной экосистемой // Сборники конференций НИЦ «Социосфера». 2015. № 48. С. 66—70.
16. Борисов В. А., Казначеева Н. И., Акинин Д. В. Глубина колеи и потеря подвижности в результате буксования гусеничной лесозаготовительной машины // Национальная Ассоциация Учёных. 2015. № 10—1 (16). С. 11—14.
17. Хахина А. М., Григорьев И. В. Анализ зарубежных математических моделей взаимодействия движителей лесных машин с поверхностью движения // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2017. Т. 5, № 10 (36). С. 548—551.

References

1. Aleksandrov A. V., Potapov V. D. Fundamentals of the theory of elasticity and plasticity. Moscow: Higher school, 1990. 400 p. (in Rus.)
2. Samul V. I. Fundamentals of the theory of elasticity and plasticity. Moscow: Higher school, 1982. 264 p. (in Rus.)
3. Bezukhov N. I. Fundamentals of the theory of elasticity, plasticity and creep. Moscow: Higher school, 1968. 512 p. (in Rus.)
4. Kiselev V. A. The plane problem of the theory of elasticity. Moscow: Higher school, 1976. 151 p. (in Rus.)
5. Wong J. Theory of land vehicles: Per. with eng. Moscow: Mechanical Engineering, 1982. 284 p. (in Rus.)
6. Ageikin Ya. S. All-terrain wheeled and combined propulsors. Moscow: Mechanical Engineering, 1981. 232 p. (in Rus.)
7. Tsytoovich N. A. Mechanics of soils: a training manual. Moscow: Higher school, 1963. 636 p. (in Rus.)
8. Tsytoovich N. A., Ter-Martirosyan Z. G. Fundamentals of applied geomechanics in construction: a training manual. Moscow: Higher school, 1981. 317 p. (in Rus.)
9. Borisov V. A., Akinin D. V., Kirey V. V. Distribution of normal reactions along the length of the supporting surface of tracked movers of forestry machines with semi-rigid suspension // Forest Gazette. Forestry Bulletin. 2017. Т. 21, No. 6. P. 31—37. (in Rus.)
10. Akinin D. V., Borisov V. A., Kaznacheeva N. I., Zhiganov N. N., Avsharyan T. M. Analysis of the adhesion of tires and tracks of forestry machines to the rolling surface // In the collection: Science today: problems and ways to solve them materials of the international scientific-practical conference. Vologda: Marker, 2016. P. 11—13. (in Rus.)
11. Akinin D. V., Kaznacheeva N. I., Borisov V. A. Forest machines and the soil part of the forest ecosystem // Science of the Third Millennium Collection of articles of the International scientific-practical conference. Samara, 2015. P. 23—31. (in Rus.)
12. Borisov V. A., Akinin D. V., Kaznacheeva N. I. Analysis of the characteristics of the dynamic effects on forest machines during loading and other technological operations // In the collection: Problems and prospects of technical sciences. Collection of articles of the International scientific-practical conference. Ufa, 2015. P. 28—34. (in Rus.)
13. Akinin D. V., Kaznacheeva N. I., Borisov V. A. Ways to reduce dynamic loads acting on a tracked forestry machine // In the collection: Problems and prospects of technical sciences Collection of articles of the International scientific and practical conference. Ufa, 2015. P. 3—12. (in Rus.)

14. *Akinin D. V., Borisov V. A., Kaznacheeva N. I.* Track depth and the number of track rollers of a tracked forestry machine // In collection: Science today: problems and development prospects collection of scientific papers based on materials of the international scientific-practical conference: in 3 parts. / Scientific Center «Disputation». Vologda: Marker, 2015. P. 5—8. (in Rus.)
15. *Akinin D. V., Kaznacheeva N. I., Borisov V. A.* Analysis of the interaction of forest machines with the soil ecosystem // Conference proceedings SIC Sociosphere. 2015. No. 48. P. 66—70. (in Rus.)
16. *Borisov V. A., Kaznacheeva N. I., Akinin D. V.* Gauge depth and loss of mobility as a result of slipping of a tracked forestry machine // National Association of Scientists. 2015. No. 10—1 (16). P. 11—14. (in Rus.)
17. *Hakhina A. M., Grigoryev I. V.* Analysis of foreign mathematical models of the interaction of the engines of forest machines with the movement surface // Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice. 2017. Vol. 5, No. 10 (36). P. 548—551. (in Rus.)

© Константинов В. Ф., Борисов В. А., Курляндский А. С., 2019