

ВЛИЯНИЕ УГЛА ТРЕНИЯ ТРАКА О ПОЧВУ НА КОЭФФИЦИЕНТ СЦЕПЛЕНИЯ ТРАКА

А.Ф. Алябьев, А.А. Котов, В.Е. Клубничкин, Е.Е. Клубничкин

МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), 141005, Московская область, г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1
alyabievaf@gambler.ru

Исследовано взаимодействие трака гусеницы трактора с почвой. Рассмотрено влияние коэффициента трения трака о почву на тягово-сцепные свойства трака. В качестве модели использовалась двумерная модель, построенная на основе методов статики сыпучей среды. Представлены результаты экспериментальных исследований, проведенных с помощью двумерной модели при различных значениях коэффициента трения трака о почву. Определена предельная внешняя касательная сила на траке. В ходе сравнения полученных значений с результатами расчета установлено, что сцепные свойства трака незначительно варьируют при изменении коэффициента трения трака о почву, причем при его уменьшении эти свойства улучшаются. Даны рекомендации о необходимости использования коэффициента трения покоя, который учитывает даже незначительные перемещения области предельного равновесия по траку.

Ключевые слова: трак гусеницы трактора, коэффициент сцепления трака с почвой, угол трения

Ссылка для цитирования: Алябьев А.Ф., Котов А.А., Клубничкин В.Е., Клубничкин Е.Е. Влияние угла трения трака о почву на коэффициент сцепления трака // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2019. Т. 23. № 6. С. 75–80. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-6-75-80

На тягово-сцепные качества трактора значительное влияние оказывают параметры трака гусеницы, в частности изменение его геометрических размеров: длины, ширины, высоты грунтозацепа, а также формы, расположения грунтозацепов, значений коэффициента трения материала трака о почву.

Цель работы

Цель работы — изучение влияния коэффициента трения материала трака о почву на коэффициент его сцепления с помощью методов статики сыпучей среды, поскольку в литературе [1, 2] этому вопросу уделено мало внимания в отличие от влияния геометрических размеров трака на коэффициент сцепления, рассмотренного многими исследователями [3–15]. При изучении взаимодействия трака с почвой ранее нами применялись [5, 6] методы статики сыпучей среды [2, 16–20], показавшие свою эффективность судя по полученным результатам.

Материалы и методы

В качестве математической модели взаимодействия трака гусеницы с почвой использовалась двумерная модель [5], построенная на основе методов статики сыпучей среды [16]. В этой модели предельно допустимые касательные напряжения на площадке скольжения определяются по закону Кулона, масса почвы не учитывается.

Предельная внешняя касательная сила P_y на траке составляет (рис. 1):

$$P_y = b(h\sigma_{ky} + l\sigma_{kx} \operatorname{tg} \omega),$$

где ω — угол трения трака о почву;

σ_{ky} — нормальное к грунтозацепу давление на почву, Н/см²,

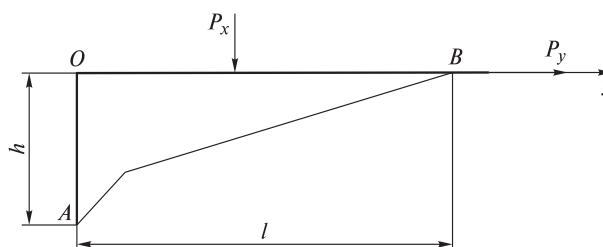


Рис. 1 Внешние силы, действующие на трак
Fig. 1. The external forces acting on the truck

$$\sigma_{ky} = \sigma_y (1 + \sin \rho) \frac{\sin(\varphi_y - \delta)}{\sin(\varphi_y + \delta)} - C \operatorname{ctg} \rho;$$

σ_y — среднее приведенное нормальное напряжение, возникающее под действием грунтозацепа, Н/см²,

$$\sigma_y = \frac{\sigma_{kx} + C \operatorname{ctg} \rho}{1 + \sin \rho \cos(2\varphi_y)};$$

σ_{kx} — нормальное к подошве трака давление на почву, Н/см²,

$$\sigma_{kx} = \frac{P_x}{bl};$$

φ_y — угол между грунтозацепом и направлением главного компонента напряжения σ_{\max} , действующего со стороны подошвы трака,

$$\varphi_y = \frac{\pi}{2} - \frac{1}{2} \left(\arcsin \frac{\sin \omega}{\sin \rho} - \omega \right);$$

δ — угол между линией разрыва и приведенным напряжением вблизи линии разрыва,

$$\sin \varphi_y = \frac{\sin \delta}{\sin \rho};$$

l — длина области предельного равновесия, см,

$$l = h \frac{1 + \operatorname{ctg}(\alpha) \operatorname{ctg} \left(\varepsilon - \left(\frac{\pi}{2} - \varphi_y \right) \right)}{\operatorname{ctg}(\alpha) + \operatorname{ctg} \left(\frac{\pi}{2} - \varepsilon \right)};$$

α — угол наклона линии разрыва к грунтозацепу,

$$\alpha = \frac{1}{2} \left(\arcsin \left(\frac{\sin \delta}{\sin \rho} \right) + \delta \right);$$

ε — углы наклона линий скольжения к направлению σ_{\max} ,

$$\varepsilon = \frac{\pi}{4} - \frac{\rho}{2}.$$

Т а б л и ц а 1

Физические и прочностные свойства дерново-подзолистой суглинистой почвы
Physical and strength properties of sod-podzolic loamy soil

| Показатель | Значения |
|--|----------|
| Число пластичности | 12 |
| Плотность частиц почвы, г/см ³ | 2,33 |
| Влажность почвы в слое 0...5 см, % | 36,81 |
| Плотность почвы, г/см ³ | 1,54 |
| Плотность сухой почвы, г/см ³ | 1,12 |
| Относительная влажность почвы, % | 80,24 |
| Угол внутреннего трения ρ , град | 21,8 |
| рад | 0,38 |
| Сцепление почвы C , Н/см ² | 1,0 |
| Угол трения ω поверхности трака о почву: наждачная бумага P40, град | 36,8 |
| рад | 0,642 |
| сталь, град | 26,4 |
| рад | 0,461 |
| сталь с силиконовой смазкой, град | 23,9 |
| рад | 0,417 |

Используя приведенные выше формулы, построим график зависимости предельной внешней касательной силы P_y на траке от угла трения трака ω о почву (рис. 2). При расчетах воспользуемся свойствами почвы (табл. 1).

По графику (см. рис. 2) видно, что при уменьшении угла трения трака о почву предельная внешняя касательная сила на траке растет, а длина области предельного равновесия увеличивается. Утверж-

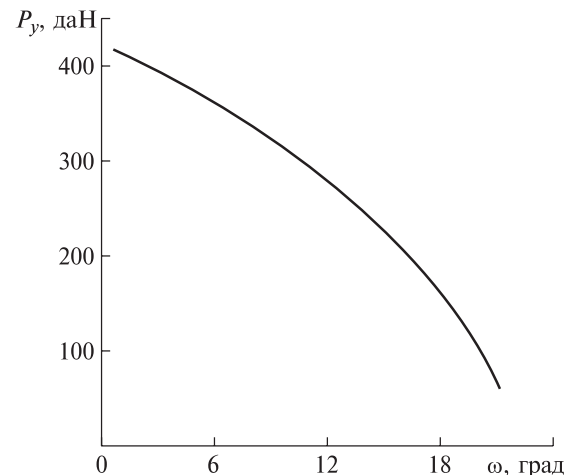


Рис. 2. Зависимость предельной внешней касательной силы P_y на траке от угла трения ω трака о почву

Fig. 2. Dependence of the limiting external tangential force P_y on the track on the angle of friction ω of the track on the soil

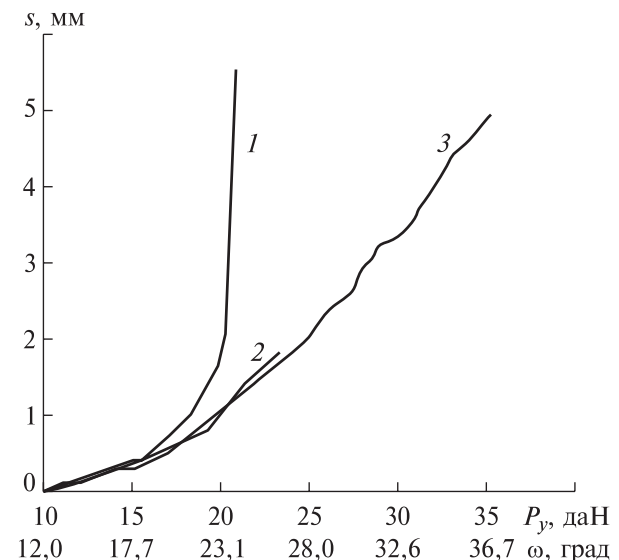
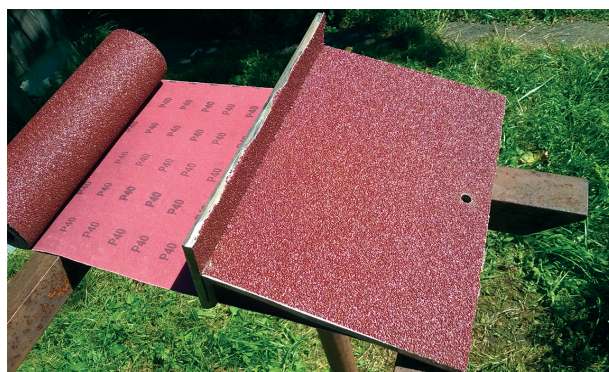


Рис. 3. Зависимость перемещения пластины от внешней касательной силы на траке: 1 — стальная поверхность, обработанная наждачной бумагой P800 и покрытая силиконовой смазкой; 2 — стальная поверхность, обработанная наждачной бумагой P800; 3 — поверхность, оклеенная наждачной бумагой P40

Fig. 3. The dependence of the plate movement on the external tangent force on the track: 1 — steel surface treated with P800 sandpaper and coated with silicone grease; 2 — the steel surface is treated with sandpaper P800; 3 — surface covered with sand paper P40

дение о предельной внешней касательной силе на траке, сделанное на основании расчетов, нуждается в экспериментальной проверке, поскольку при рассмотрении взаимодействия гусеницы с почвой другими методами [4] сделаны противоположные выводы о влиянии коэффициента трения трака о почву на сцепные свойства гусеничного движителя. Для проверки результатов расчета были проведены экспериментальные исследования.



а



б

Рис. 4. Модели траков: а — трак с рабочей поверхностью, оклеенной наждачной бумагой Р40; б — трак со стальной рабочей поверхностью, обработанной наждачной бумагой Р800
Fig. 4. Models of trucks: а — a truck with a working surface covered with sand paper Р40; б — the truck with a steel working surface treated with sandpaper R800

Результаты и обсуждение

Работа проводилась в квартале 26В Хотьковского участкового лесничества Сергиево-Посадского филиала ГКУ «Мособллес». В одном месте определялись физические и прочностные характеристики почвы [21–23] (см. табл. 1).

Влажность почвы определялась методом высушивания до постоянной массы, плотность — режущим кольцом, плотность сухой почвы — расчетным методом, плотность частиц почвы — пикнометрическим методом с водой, влажность на границе текучести — пенетрацией конусом, влажность на границе раскатывания — раскатыванием в жгут, угол внутреннего трения и удельное сцепление почвы определялись методом одноплоскостного среза.

Значение коэффициента $\operatorname{tg}\omega$ трения трака о почву находили с помощью протаскивания пластины из материала трака по почве. При проведении работ исследовались пластины с поверхностью, оклеенной наждачной бумагой Р40, со стальной поверхностью, обработанной наждачной бумагой Р800, и со стальной поверхностью, обработанной наждачной бумагой Р800 и покрытой силиконовой смазкой. Обработка пластин абразивным материалом зернистостью М20 [20] (наждачная бумага Р800) имитирует поверхность трака, работающего на суглинистых почвах. Пластина нагружалась грузом (общая масса m пластины с грузом составляла 47 кг), устанавливалась предельная внешняя касательная сила на траке, необходимая для начала движения пластины (см. рис. 1). Внешнюю касательную силу на траке увеличивали ступенчато. При этом на каждой ступени происходило перемещение пластины, которое фиксировалось индикатором часового типа ИЧ 10 0.01 (рис. 3).

В месте определения свойств почвы проводились исследования физических моделей трака. Размер моделей траков: ширина — $b = 30$ см; высота грунтозацепа — $h = 4$ см; длина опорной поверхности — $l = 21$ см. Исследовались траки с рабочей поверхностью, оклеенной наждачной бумагой Р40, со стальной рабочей поверхностью, обработанной наждачной бумагой Р800 и со стальной рабочей поверхностью, обработанной наждачной бумагой Р800 и покрытой силиконовой смазкой (рис. 4).

Исследования физических моделей велись следующим образом. На поверхности почвы выравнивалась площадка. В ней была проделана прорезь по размерам грунтозацепа трака. Трак заглублялся в почву. Общая масса m трака и груза также составляла 47 кг. К траку прикладывалась внешняя касательная сила, которая увеличивалась до срыва трака (см. рис. 1) (табл. 2).

Т а б л и ц а 2

Результаты определения предельной внешней касательной силы на траке P_y , N
The results of determining the ultimate external tangential force on the track P_y , N

| Поверхность трака | Эксперимент | Расчет | Расчетные значения коэффициента трения $\operatorname{tg}\omega$ / угла трения трака о почву ω |
|-------------------|-------------|--------|---|
| Наждачная бумага | 1410 | 1410 | 0,345 / 19,8 |
| Сталь | 1480 | 1475 | 0,341 / 19,6 |
| Сталь со смазкой | 1525 | 1536 | 0,338 / 19,3 |

Анализ результатов экспериментальных исследований

Для использования математической модели [5] необходимо знать угол ω трения поверхности трака о почву. При этом должно выполняться условие $\omega < \rho$. Из табл. 1 следует, что это условие не было соблюдено. Примем значения угла ω трения трака о почву, при которых расчетные значения предельной внешней касательной силы P_y на траке близки к экспериментальным. Эти значения можно найти по графику (см. рис. 2) или рассчитать, используя приведенный в начале статьи алгоритм. Полученные значения угла трения трака о почву для различных поверхностей трака либо совпадают, либо очень близки. В математической модели [5] угол ω трения используется при рассмотрении взаимодействия области предельного равновесия почвы с поверхностью трака. Эта область перемещается вместе с траком, и перемещение трака относительно области предельного равновесия небольшое. К тому же при небольших перемещениях трака относительно почвы угол трения (угол трения покоя) изменяется от нуля до значения угла внутреннего трения (см. рис. 3, табл. 1). Для рассматриваемого случая при массе трака с грузом в размере 47 кг и коэффициенте трения трака о почву, равном 0,341, предельная внешняя касательная сила на траке составляет 16 даН. Для $P_y = 16$ даН все три кривые для рассмотренных поверхностей трака практически совпадают (см. рис. 3), а перемещение трака относительно области предельного равновесия составит около 0,05 мм.

Выводы

Экспериментальные исследования показали, что траки с различными коэффициентами трения рабочей поверхности о почву имеют близкие сцепные свойства, однако, траки с меньшим коэффициентом трения имеют несколько лучшие сцепные свойства.

При использовании двумерной математической модели [5] в качестве угла трения поверхности трака о почву необходимо брать угол трения покоя в диапазоне от нуля до значений угла внутреннего трения.

Список литературы

- [1] Ляско М.И. Влияние распределения нагрузки по опорным каткам на тягово-сцепные качества трактора / Труды НАТИ, вып. 240. М., 1975. 73 с.
- [2] Пинигин Б.Н. Теория трактора. Исследование свойств гусеничных движителей. Челябинск, ЧПИ, 1985. 93 с.
- [3] Агейкин Я.С. Вездеходные колесные и комбинированные движители. М.: Машиностроение, 1972. 184 с.
- [4] Агейкин Я.С. Проходимость автомобилей. М.: Машиностроение, 1981. 232 с.
- [5] Алябьев А.Ф., Калинин С.Ю. Модель взаимодействия гусеницы трактора с грунтом // Лесной вестник. 2016. № 2. С. 173–177.
- [6] Алябьев А.Ф., Котов А.А. Изменение тяговых свойств гусеничного движителя при замерзании-оттаивании почвы // Техника и оборудование для села. 2018. № 4. С. 15–18.
- [7] Антонов А.С. Теория гусеничного движителя. М.: Машгиз, 1949. 214 с.
- [8] Берестов Е.И., Кулабухов А.В., Лесковец И.В. Об особенностях работы гусеничных движителей землеройно-транспортных машин // Механизация строительства. 2009. № 10. С. 15–18.
- [9] Беккер М.Г. Введение в теорию систем местность – машина: пер. с англ. / под ред. В.В. Гуськова. М.: Машиностроение, 1973. 520 с.
- [10] Берестов Е.И., Кулабухов А.В., Печковская О.Е. Исследование разрушения грунта траками гусеничных машин // Механизация строительства. 2014. № 10. С. 21–25.
- [11] Боровских А.М. Разработка новых и совершенствование существующих конструкций узлов гусеничных движителей для лесных машин: монография. Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2007. 269 с.
- [12] Васильев А.В., Докучаева Е.Н., Уткан-Любовцев О.И. Влияние конструктивных параметров гусеничного трактора на его тягово-сцепные свойства. М.: Машиностроение, 1969. 191 с.
- [13] Клубничкин Е.Е., Клубничкин В.Е., Башкирцев Ю.В., Крылов В.М. Изменение длины опорно-активных участков движителя гусеничной лесозаготовительной машины с учетом режимов // Лесной вестник. 2013. № 2. С. 119–121.
- [14] Ляско М.И., Зайдельман Н.И., Слажинский В.О. Влияние шага и высоты грунтозацепов на величину коэффициента сцепления гусеничного трактора // Труды МАДИ, вып. 114. М.: 1976. С. 115–119.
- [15] Беляков В.В., Куркин А.А. Полотно пути транспортно-технологических машин (справочные материалы к теории «машина — местность»). Нижний Новгород: Нижегород. гос. тех. ун-т Р.Е. Алексеева, 2014. 447 с.
- [16] Wong J.Y. Terramechanics and Off-Road Vehicle Engineering, 2nd Edition, 2009, 488 p.
- [17] Редкозубов А.В., Зезюлин Д.В., Макаров В.С., Беляков В.В. Математическая модель поверхности движения лесных дорог // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2014. № 4 (106). С. 348–352.
- [18] Соколовский В.В. Статика сыпучей среды. М.: Наука, 1990. 272 с.
- [19] Ryu H.S., Bae D.S., Choi J.H., Shabana A.A. A compliant track link model for high-speed, highmobility tracked vehicles // Int. J. Numer. Methods Eng., 2000, v. 48, no. 10, pp. 1481–1502.
- [20] Цитович Н.А. Механика грунтов (краткий курс). М.: Высш. школа, 1983. 288 с.
- [21] ГОСТ 5180–2015. Межгосударственный стандарт. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. Введ. 01.04.16. М.: Госстрой России, 2015. 32 с.
- [22] ГОСТ 12248–2010. Межгосударственный стандарт. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости. Введ. 01.01.12. М.: Госстрой России, 2010. 54 с.
- [23] ГОСТ 3647–80 Материалы шлифовальные. Классификация. Зернистость и зерновой состав. Методы контроля. Введ. 01.01.82. М.: Госстрой России, 1982. 46 с.

Сведения об авторах

Алябьев Алексей Федорович — д-р техн. наук, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), alyabievaf@rambler.ru

Котов Алексей Александрович — д-р техн. наук, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), kotov@mgul.ac.ru

Клубничкин Владислав Евгеньевич — канд. техн. наук, доцент МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), vklubnichkin@gmail.com

Клубничкин Евгений Евгеньевич — канд. техн. наук, доцент МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), klubnichkin@mgul.ac.ru

Поступила в редакцию 04.03.2019.

Принята к публикации 16.09.2019.

INFLUENCE OF TRACK SOIL FRICTION ANGLE ON TRACK ADHESION COEFFICIENT

A.F. Alyabiev, A.A. Kotov, V.E. Klubnichkin, E.E. Klubnichkin

BMSTU (Mytishchi branch), 1, 1st Institutskaya st., 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia

alyabievaf@rambler.ru

The article is devoted to the study of the interaction of track tractor tracks with the soil. The influence of the friction coefficient of the track on the soil on the traction properties of the track is considered. As a mathematical model of the interaction of the truck with the soil caterpillar used a two-dimensional model constructed on the basis of methods of static granular medium. The results of experimental studies of the interaction of caterpillar track models with the soil at different coefficients of friction of the track on the soil are presented. The limiting external tangent force on the track was determined. The obtained values were compared with the calculation results. It is found that the coupling properties of the track change slightly when the coefficient of friction of the track on the soil, and with a decrease in the coefficient of friction coupling properties of the track increase. In the calculations it is necessary to use the coefficient of friction of rest, taking into account the slight movement of the region of ultimate equilibrium on the track.

Keywords: trak caterpillar tractor, the coefficient of adhesion of the track with the soil friction angle

Suggested citation: Alyabiev A.F., Kotov A.A., Klubnichkin V.E., Klubnichkin E.E. *Vliyanie ugla treniya traka o pochvu na koeffitsient stsepleniya traka* [Influence of track soil friction angle on track adhesion coefficient]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2019, vol. 23, no. 6, pp. 75–80. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-6-75-80

References

- [1] Lyasko M.I. *Vliyanie raspredeleniya nagruzki po opornym karkam na tyagovo-stsepnnye kachestva traktora* [Influence of load distribution on the support rollers on the traction quality of the tractor]. Tr. MADI [Proceedings of the Moscow automobile road Institute], 1975, iss. 114, 73 p.
- [2] Pinigin B.N. *Teoriya traktora. Issledovanie svoystv gusenichnykh dviziteley* [The theory of the tractor. The study of the properties of caterpillar mover]. Chelyabinsk: ChPI [Chelyabinsk Polytechnic Institute], 1895, 93 p.
- [3] Ageykin Ya.S. *Vezdehodnye kolesnye i kombinirovannye dvijiteli* [Off-road wheeled and combined locomotion]. Moscow: Mashinostroenie [Engineering], 1972. 184 p.
- [4] Ageykin Ya.S. *Prokhozimost' avtomobiley* [The flow of cars]. Moscow: Mashinostroenie [Engineering], 1981, 232 p.
- [5] Alyab'ev A.F., Kalinin S.Yu. Model' vzaimodeystviya gusenitsy traktora s gruntom [The interaction model of the caterpillar tractor with the ground]. *Moscow state forest university bulletin – Lesnoy vestnik*, 2016, no. 2, pp. 173–177.
- [6] Alyab'ev A.F., Kotov A.A. *Izmenenie tagovykh svoystv gusenichnogo dvijitela pri zamerzanii-ottaivanii pochvy* [The Change of the Traction Properties of the Tracked Mover in the Freezing – Thawing of the Soil]. *Tehnika i oborudovanie dla sela* [Machinery and equipment for the village], 2018, no. 4, pp. 15–18.
- [7] Antonov A.S. *Teoriya gusenichnogo dvizhitelya* [The theory of caterpillar tracks]. Moscow: Mashgiz, 1949, 214 p.
- [8] Berestov E.I., Kulabukhov A.V., Leskovets I.V. *Ob osobennostyakh raboty gusenichnykh dvizhiteley zemleroyno-transportnykh mashin* [Some features of caterpillar drives Earthmoving machinery]. *Mehanizatsiya stroitelstva* [Mechanization of construction], 2009, no. 10, pp. 15–18.
- [9] Bekker M.G. *Vvedenie v teoriyu sistem mestnost' — mashina* [Introduction to the theory of terrain — machine systems]. Moscow: Mashinostroenie [Engineering], 1973, 520 p.
- [10] Berestov E.I., Kulabukhov A.V., Pechkovskaya O.E. *Issledovanie razrusheniya grunta trakami gusenichnykh mashin* [Study destruction of a ground caterpillar machines]. *Mehanizatsiya stroitelstva* [Mechanization of construction], 2014, no. 10, pp. 21–25.

- [11] Borovskikh A.M. *Razrabotka novykh i sovershenstvovanie sushchestvuyushchikh konstruktivnykh uzlov gusenichnykh dvizhiteley dlya lesnykh mashin: monografiya* [Development of new and improvement of existing designs of knots caterpillar mover for forestry machines: monograph]. Ekaterinburg: Ural. gos. lesotehn. un-t [Ural state forest engineering University], 2007, 269 p.
- [12] Vasil'ev A.V., Dokuchaeva E.N., Utkan-Lyubovtsev O.I. *Vliyaniye konstruktivnykh parametrov gusenichnogo traktora na ego tyagovo-stsepnyye svoystva* [The influence of design parameters of the crawler tractor on its traction characteristics]. Moscow: Mashinostroeniye [Engineering], 1969, 191 p.
- [13] Klubnichkin E.E., Klubnichkin V.E., Bashkirtsev Yu.V., Krylov V.M. *Izmeneniye dliny oporno-aktivnykh uchastkov dvijitel'nykh gusenichnykh lesozagotovitel'nykh mashin s uchetom rejimov* [Changing the length of the support-active sections of the caterpillar logging machine engine, taking into account the modes]. *Lesnoy vestnik* [Forestry Bulletin], 2013, no. 2, pp. 119–121.
- [14] Lyasko M.I., Zaydel'man N.I., Slazhinskiy V.O. *Vliyaniye shaga i vysoty gruntozatshepov na velichinu koeffitsienta stsepleniya gusenichnogo traktora* [The effect of pitch and height of the grousers on the value of the coefficient of friction crawler tractor]. *Tr. MADI* [Proceedings of the Moscow automobile road Institute], 1976, iss. 114, pp. 115–119.
- [15] Belyakov V.V., Kurkin A.A. *Polotno puti transportno-tekhnologicheskikh mashin (spravochnyye materialy k teorii «mashina-mestnost'»)* [Canvas tracks of transport-technological machines (reference materials to the theory of «machine-terrain»)]. Nizhniy Novgorod: Nizhegorod. gos. tekhn. un-t im. R.E. Alekseeva, 2014, 447 p.
- [16] Wong J.Y. *Terramechanics and Off-Road Vehicle Engineering*. Elsevier Ltd, 2010, 488 p.
- [17] Redkozubov A.V., Zezyulin D.V., Makarov V.S., Belyakov V.V. *Matematicheskaya model' poverkhnosti dvizheniya lesnykh dorog* [A mathematical model of the surface of the movement of forest roads] *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva* [Transactions of NGTU im. R.E. Alekseeva], 2014, no. 4 (106), pp. 348–352.
- [18] Sokolovskiy V.V. *Statika sypuchey sredy* [Statics of granular media]. Moscow: Nauka, 1990, 272 p.
- [19] Ryu H.S., Bae D.S., Choi J.H., Shabana A.A. A compliant track link model for high-speed, highmobility tracked vehicles. *Int. J. Numer. Methods Eng.*, 2000, v. 48, no. 10, pp. 1481–1502.
- [20] Tsitovich N.A. *Mekhanika gruntov (kratkiy kurs)* [Soil mechanics (short course)]. Moscow: Vyssh. shkola, 1983, 288 p.
- [21] *GOST 5180–2015. Mezhdgosudarstvennyy standart. Grunty. Metody laboratornogo opredeleniya fizicheskikh kharakteristik. Vved. 01.04.16.* [Soils. Laboratory methods for determining of physical characteristics]. Moscow: Gosstroy Rossii, 2015, 32 p.
- [22] *GOST 12248–2010. Mezhdgosudarstvennyy standart. Grunty. Metody laboratornogo opredeleniya kharakteristik prochnosti i deformiruemosti. Vved. 01.01.12.* [Laboratory methods for determining the strength and strain characteristics]. Moscow: Gosstroy Rossii, 2010, 54 p.
- [23] *GOST 3647–80 Materialy shlifoval'nyye. Klassifikatsiya. Zernistost' i zernovoy sostav. Metody kontrolya. Vved. 01.01.82.* [Abrasives. Grain sizing. Graininess and fractions. Test methods]. Moscow: Gosstroy Rossii, 1982, 46 p.

Authors' information

Alyabiev Alexey Fedorovich — Dr. Sci. (Tech.), Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), alyabievaf@rambler.ru

Kotov Alexey Aleksandrovich — Dr. Sci. (Tech.), Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), kotov@mgul.ac.ru

Klubnichkin Vladislav Evgenievich — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), vklubnichkin@gmail.com

Klubnichkin Evgeniy Evgenievich — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), klubnichkin@mgul.ac.ru

Received 04.03.2019.

Accepted for publication 16.09.2019.