

УДК 630.91

МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГУСЕНИЦЫ ТРАКТОРА С ГРУНТОМ

А.Ф. АЛЯБЬЕВ, *проф. МГУЛ, д-р техн. наук⁽¹⁾*,
С.Ю. КАЛИНИН, *ст. препод. МГУЛ⁽¹⁾*

alyabievaf@rambler.ru

⁽¹⁾ ФГБОУ ВО «Московский государственный университет леса»
141005, Московская обл., г. Мытищи-5, ул. 1-я Институтская, д. 1

Решена плоская задача взаимодействия трака гусеницы трактора с грунтом. Рассматривался трак с углом между грунтозацепом и подошвой трака равным 90° . В качестве инструмента построения модели использованы методы статики сыпучей среды. Построена область предельного равновесия грунта и определены условия буксования трактора. В результате установлено, что область предельного равновесия состоит из двух областей, граница между которыми образует линию разрыва, вблизи которой равновесие сохраняется, но нет полной непрерывности напряжений. Форма области предельного равновесия определяется свойствами грунта и свойствами материала трака: углом внутреннего трения и углом трения грунта о трак. Размер области предельного равновесия определяется размером грунтозацепа. Форма и размер области предельного равновесия не зависят от сцепления грунта и силы тяги. Если область предельного равновесия выходит за габариты подошвы трака (высота грунтозацепа велика), то трактор будет буксовать («закапываться») при любом тяговом усилии, при котором возникает область предельного равновесия. Если область предельного равновесия не выходит за габариты подошвы трака, то трактор будет буксовать при превышении нормальной составляющей нагрузки, уравнивающей тяговое усилие трактора, веса трактора, приходящегося на подошву трака (то есть будет происходить выклинивание области предельного равновесия). Модель позволяет определить соотношение между высотой грунтозацепа и длиной подошвы трака для различных грунтов, коэффициент сцепления трака и, с учетом линейной деформируемости грунта, коэффициент сцепления трактора. Приведен пример расчета коэффициента сцепления трактора Б10М при работе на суглинке. Полученные значения соответствуют реальным.

Ключевые слова: гусеничный движитель, трак, геометрические параметры грунтозацепов, грунт, сила тяги по сцеплению.

На тягово-сцепные качества трактора большое влияние оказывают параметры гусеницы [1–3]. Есть мнение, что каждому типу грунта и высоте грунтозацепов соответствует определенный шаг гусеницы, позволяющий получить максимальный коэффициент сцепления [4]. Построим модель взаимодействия гусеницы трактора с грунтом, используя методы статики сыпучей среды, и определим коэффициент сцепления трактора. Методы статики сыпучей среды используются для расчета фундаментов, устойчивости откосов, подпорных стенок [5], расчета сил сопротивления при резании грунта землеройными и почвообрабатывающими орудиями [6–8], при исследованиях разрушения грунта траками гусеничных машин [9, 10].

Рассмотрим плоское предельное равновесие грунта при его взаимодействии с траком гусеницы. Предельно допустимые касательные напряжения на площадке скольжения определяются по закону Кулона. Процесс заглубления грунтозацепа в грунт мы не рассматриваем. Массу грунта не учитываем. Будем использовать положения механики грунтов [11, 12], а именно, «принцип линейной деформируемос-

ти» (при изменении внешних давлений порядка 0,3–0,5 МПа, а для плотных и твердых грунтов и до 0,5–0,7 МПа их можно рассматривать как линейно деформируемые тела) и линейную связь между внешним давлением (в указанных пределах) и осадкой. Угол между грунтозацепом и подошвой трака гусеницы равен 90° , распределение нагрузки на траки гусеницы от веса трактора равномерное.

При взаимодействии трака гусеницы с грунтом на грунт действуют силы (рис. 1):

– со стороны грунтозацепа OA распределенное нормальное к грунтозацепу давле-

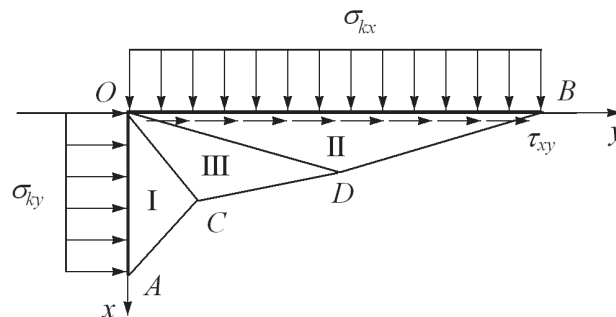


Рис. 1. Схема взаимодействия трака гусеницы с грунтом

Fig. 1. Scheme of the interaction with the ground caterpillar truck

ние σ_{ky} , определяющее часть тягового усилия трактора;

– со стороны подошвы OB трака распределенное нормальное к подошве трака давление σ_{kx} , соответствующее части веса трактора, и распределенная касательная к подошве трака нагрузка τ_{xy} , соответствующая трению, возникающему при движении грунта по траку.

При взаимодействии трака гусеницы с грунтом может образовываться область предельного равновесия (рис. 1). Рассмотрим две гипотезы буксования трактора.

Гипотеза 1. При увеличении тягового усилия увеличивается уравнивающая тяговое усилие нагрузка на подошву трака гусеницы. При буксовании трактора предельное равновесие нарушается. Это происходит при превышении нормальной составляющей нагрузки, уравнивающей тяговое усилие трактора, веса трактора, приходящегося на подошву трака (выклинивания).

Гипотеза 2. При увеличении тягового усилия область предельного равновесия увеличивается [9] и выходит за габариты подошвы трака.

Для проверки гипотез построим область предельного равновесия и определим действующие нагрузки при равенстве уравнивающей тяговое усилие нагрузки на грузке от части веса трактора.

Выделим область предельного равновесия AOB (рис. 2) и определим граничные условия.

Нормальные и касательные компоненты приведенного давления p вдоль положи-

тельного направления оси OX по линии AO выражены как

$$p = p_n = \sigma_{ky} + H, \quad p = \text{const}, \quad (1)$$

$$p_\tau = 0, \quad \delta_{kx} = 0$$

где H – временное сопротивление всестороннему равномерному растяжению:

$$H = C \cdot \text{tg} \rho;$$

ρ – угол внутреннего трения грунта;

C – сцепление грунта;

p – приведенное давление;

p_n – нормальная составляющая приведенного давления p ;

p_τ – касательная составляющая приведенного давления p ;

δ_{kx} – угол между нормалью к грунтозацепу и приведенным давлением p .

Нормальные и касательные компоненты приведенного давления q вдоль положительного направления оси OY по линии OB выражены как

$$q_n = \sigma_{kx} + H, \quad q_\tau = \sigma_{kx} \cdot \text{tg} \omega,$$

$$\delta_{ky} = \arctg \frac{q_\tau}{q_n}, \quad q = \frac{q_n}{\cos \delta_{ky}}, \quad (2)$$

$$|\omega| < \rho; \quad |\delta_{ky}| < \rho$$

где ω – угол трения грунта о поверхность трака;

q_n – нормальная составляющая приведенного давления q ;

q_τ – касательная составляющая приведенного давления q ;

δ_{ky} – угол между нормалью к подошве трака и приведенным давлением q .

Так как грунтозацеп и подошва трака жестко связаны, то при увеличении тягового усилия грунт уплотняется и движется относительно подошвы трака в направлении грунтозацепа, так что $\omega < 0$.

Как видно из (1) и (2), p , q и их первые производные непрерывны.

Нарушение предельного равновесия приводит к «выпиранию» вдоль положительного направления оси OY и к «оседанию» массива грунта вдоль положительного направления оси OX . Таким образом, вдоль положительной полуоси OX при $\kappa = +1$ и $\delta_{kx} = 0$ нужно принять [5]

$$\sigma_1 = \frac{p}{1 + \sin \rho}, \quad \varphi_1 = \frac{\pi}{2}. \quad (3)$$

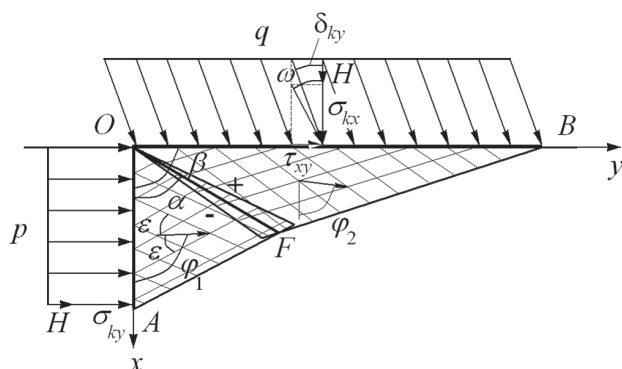


Рис. 2. Область предельного равновесия
Fig. 2. Scope of the limit equilibrium

где σ_1 – среднее приведенное нормальное напряжение;

φ_1 – угол между направлением σ_{max} и осью OX вдоль положительной полуоси OX ;

σ_{max} – главный компонент напряжения в рассматриваемой точке.

Вдоль положительного направления оси OY при $\kappa = +1$, $\omega < 0$ и значением угла между грунтозацепом и подошвой трака $\beta = \pi/2$ нужно принять [5]

$$q = \sigma_2 \frac{\sin(\Omega - \omega)}{\sin \Omega}, \quad \varphi_2 = \frac{\pi}{2} - \frac{1}{2}(|\Omega| - |\omega|), \quad (4)$$

где φ_2 – угол между направлением σ_{max} и осью OX вдоль положительной полуоси OY ;

σ_2 – среднее приведенное нормальное напряжение;

$$\sin \Omega = \frac{\sin \omega}{\sin \rho}, \quad |\Omega| < \frac{\pi}{2}.$$

Итак, мы сформулировали граничные условия для нашей задачи.

Семейство характеристик, которые являются линиями скольжения, для невесомой среды описывается уравнениями статики сыпучей среды

$$\begin{cases} dy = dx \cdot \operatorname{tg}(\varphi \mp \varepsilon) \\ d\sigma \mp 2\sigma \cdot \operatorname{tg} \rho d\varphi = 0 \end{cases} \quad (5)$$

где $\pm \varepsilon$ – углы наклона линий скольжения к направлению σ_{max} ;

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

Будем рассматривать область предельного равновесия, состоящую из трех областей. Так же, как в задаче Прандтля [13], на плоскости xu мы строим два треугольника: треугольник AOC (область I), примыкающий к грунтозацепу, и треугольник BOD (область II), примыкающий к подошве трака, и соединяющий их сектор COD (область III) (рис. 1). При равномерном распределении приведенного нормального давления $p = \text{const}$ задача упрощается [5]. Для невесомой среды в области I и области II на плоскости xu сетку линий скольжения образуют два семейства параллельных прямых, а в области III одно семейство – прямые, проходящие через точку O , а другое – логарифмические спирали.

Однако возможен вариант, когда область III вырождается, а область I и область II «наползают» друг на друга (рис. 2). В этом случае в области предельного равновесия образуются линии разрыва [5], вблизи которых равновесие сохраняется, но нет полной непрерывности напряжений

$$\sigma_{n+} = \sigma_{n-}, \quad \tau_{n+} = \tau_{n-}, \quad \sigma_+ \neq \sigma_-,$$

или иначе

$$p_+ = p_-, \quad \delta_+ = \delta_-,$$

где знаками «+» и «-» отмечены разные стороны от линии разрыва;

σ_n – нормальное к линии разрыва приведенное напряжение

τ_n – касательное к линии разрыва приведенное напряжение;

σ – среднеприведенное напряжение вблизи линии разрыва;

p – приведенное напряжение вблизи линии разрыва;

δ – угол между линией разрыва и приведенным напряжением вблизи линии разрыва.

Линия разрыва будет образовываться, если $\varphi_1 > \varphi_2$.

Из (3) и (4) следует, что

$$\varphi_1 = \frac{\pi}{2} > \frac{\pi}{2} - \frac{1}{2}(|\Omega| - |\omega|) = \varphi_2,$$

т. е. в области предельного равновесия будет образовываться линия разрыва. Из условий разрыва [5]

$$\begin{cases} \varphi_- = \alpha + \frac{\pi}{2} - \frac{1}{2}(\Delta + \delta) + m\pi \\ \varphi_+ = \alpha + \frac{1}{2}(\Delta - \delta) + m\pi \end{cases},$$

$$\frac{\sigma_+}{\sigma_-} = \frac{\sin(\Delta + \delta)}{\sin(\Delta - \delta)},$$

где α – угол наклона линии разрыва к оси OX ,

$$\sin \Delta = \frac{\sin \delta}{\sin \rho}, \quad |\Delta| < \frac{\pi}{2},$$

следует, что вдоль линии разрыва

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{1}{2}(\Delta + \delta), \\ \sigma_+ &= \frac{p}{1 + \sin \rho} \frac{\sin(\Delta + \delta)}{\sin(\Delta - \delta)}, \quad \varphi_+ = \Delta. \end{aligned} \quad (6)$$

В области OBF (рис. 2)

$$\sigma_2 = \sigma_+, \quad \varphi_2 = \varphi_+.$$

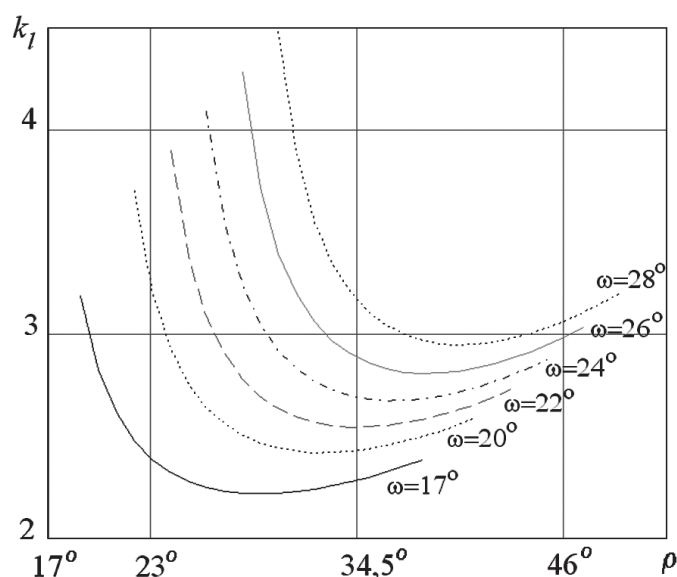


Рис. 3. Зависимость размера трака от свойств грунта
Fig. 3. The size dependence of the truck on the soil properties

Из соотношений (4) и (6) получим, что вдоль положительной полуоси OY

$$q = \frac{p}{1 + \sin \rho} \frac{\sin(\Delta + \delta) \sin(\Omega - \omega)}{\sin(\Delta - \delta) \sin \Omega}, \quad (7)$$

$$\Delta = \varphi_2 = \frac{\pi}{2} - \frac{1}{2}(|\Omega| - |\omega|).$$

Таким образом, зная свойства грунта, размеры трака, мы можем построить область предельного равновесия (рис.2)

$$l = h \frac{1 + \operatorname{ctg}(\alpha) \operatorname{ctg}\left(\varepsilon - \left(\frac{\pi}{2} - \varphi_2\right)\right)}{\operatorname{ctg}(\alpha) + \operatorname{ctg}\left(\frac{\pi}{2} - \varepsilon\right)}, \quad (8)$$

где l – длина области предельного равновесия вдоль подошвы трака (положительной полуоси OX);

h – высота грунтозацепа (вдоль положительной полуоси OY).

Из соотношений (3–8) видно, что форма области предельного равновесия определяется свойствами грунта и свойствами материала трака: углом внутреннего трения ρ и углом трения грунта о трак ω . Размер области предельного равновесия определяется размером грунтозацепа. Форма и размер области предельного равновесия не зависят от сцепления грунта C и силы тяги.

Таким образом, вторая гипотеза отвергается. Для конкретных почвенных условий и размеров трака форма и размер области предельного равновесия не изменяется при изменении тягового усилия. Если область предельного равновесия выходит за габариты подошвы трака, то трактор будет буксовать («закапываться») при любом тяговом усилии, при котором возникает область предельного равновесия. На рис. 3 приведены зависимости отношения длины подошвы трака к высоте грунтозацепа k_l от свойств грунта.

Распределенное нормальное к подошве трака давление σ_{kx} определим по формуле [5]

$$\sigma_{kx} = \sigma_2 (1 + \sin \rho \cdot \cos 2\varphi_2) - H.$$

Необходимо отметить, что давление от грунтозацепа на подошву трака будет передаваться при $\sigma_{kx} > 0$, или

$$\sigma_{ky} > \sigma_{ky \min} = H \left(\frac{1 + \sin \rho}{1 + \sin \rho \cdot \cos(2\varphi_2)} \frac{\sin(\varphi_2 - \delta)}{\sin(\varphi_2 + \delta)} - 1 \right).$$

Построенная модель позволяет определить коэффициент сцепления трактора в зависимости от характеристики трактора и свойств грунта.

Тяговое усилие P , развиваемое на траке, будет равно сумме сил, действующих на грунтозацеп, и силы трения подошвы трака о почву

$$P = bh\sigma_{ky} + blq_{\tau}.$$

Касательную составляющую q_{τ} приведенного давления q определим из соотношения (2). Буксование начнется, когда $\sigma_{kx}lb$ будет больше части веса трактора Q , приходящегося на трак

$$bl\sigma_{kx} > Q.$$

Зная вес Q , приходящийся на трак, свойства грунта и размер трака, мы можем найти коэффициент сцепления трака k_p

$$k_p = \frac{P}{Q} = \frac{h\sigma_{ky} + l\sigma_{kx} \operatorname{tg} \omega}{l\sigma_{kx}}.$$

Зная коэффициент сцепления трака, определим коэффициент сцепления трактора. Рассмотрим трак. В начальный момент после внедрения грунтозацепа в грунт на переднем траке нормальное к грунтозацепу давление σ_{ky} близко к нулю. При движении трактора нормальное к грунтозацепу давление σ_{ky} линейно растет и достигает максимума в момент перед выглублением трака из грунта [9]. Буксование трактора начнется с нарушения предельного равновесия на последнем траке (по ходу движения). В силу линейной деформируемости грунта коэффициент сцепления трактора, при котором не будет нарушения предельного равновесия грунта, равен

$$k = \frac{1}{2} k_p.$$

В качестве примера определим коэффициент сцепления трактора Б10М со следующими характеристиками: масса 20 т, опорная длина гусениц 3,2 м, ширина гусеницы 0,5 м, шаг и высота грунтозацепов 0,203 м и 0,065 м; при работе на грунте $C = 1,167$ даН/см², $\rho = 23^\circ$, $\omega = 17^\circ$ рад [6, 7]. Для указанных условий коэффициент сцепления трактора $k = 0,946$, при этом $\sigma_{kx} = 0,778$ даН/см², $\sigma_{ky} = 3,044$ даН/см², $\sigma_{ky \min} = 1,768$ даН/см², т. е., соблюдены ограничения: грунт можно считать линейно деформируемым, и при взаимодействии трака с почвой образуется область предельного равновесия.

Выводы

1. Форма области предельного равновесия определяется свойствами грунта

и свойствами материала трака: углом внутреннего трения ρ и углом трения трака о грунт ω .

2. Размер области предельного равновесия определяется размером грунтозацепа h .

3. Форма и размер области предельного равновесия не зависят от сцепления грунта C и силы тяги.

4. Предложенная модель взаимодействия гусеницы трактора с грунтом позволяет определять коэффициент сцепления трактора в зависимости от характеристики трактора и свойств грунта.

Библиографический список

1. Васильев, А.В. Влияние конструктивных параметров гусеничного трактора на его тягово-сцепные свойства / А.В. Васильев, Е.Н. Докучаева, О.И. Уткан-Любовцев. – М.: Машиностроение, 1969. – 191 с.
2. Боровских, А.М. Разработка новых и совершенствование существующих конструкций узлов гусеничных движителей для лесных машин / А.М. Боровских // Монография – Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2007. – 269 с.
3. Пинигин, Б.Н. Теория трактора. Исследование свойств гусеничных движителей / Б.Н. Пинигин – Челябинск, ЧПИ, 1985. – 93 с.
4. Ляско, М.И. Влияние шага и высоты грунтозацепов на величину коэффициента сцепления гусеничного трактора / М.И. Ляско, Н.И. Зайдельман, В.О. Слажинский // Труды МАДИ. – М., 1976. – Вып. 114. – С. 115–119
5. Соколовский, В.В. Статика сыпучей среды / В.В. Соколовский. – М.: Наука, 1990. – 272 с.
6. Алябьев, А.Ф. Обоснование технологических комплексов машин для лесовосстановления : монография / А.Ф. Алябьев. – М.: МГУЛ, 2010. – 265 с.
7. Бахтин, П.У. Технологические свойства почв : монография / П.У. Бахтин, В.Н. Винокуров, А.Ф. Алябьев. – М.: МГУЛ, 2014. – 168 с.
8. Ветров, Ю.А. Резание грунтов землеройными машинами / Ю.А. Ветров. – М.: Машиностроение, 1971. – 357 с.
9. Берестов, Е.И. Исследование разрушения грунта траками гусеничных машин / Е.И. Берестов, А.В. Кулабухов, О.Е. Печковская // Механизация строительства. – 2014. – № 10. – с. 21–25. – <http://ms.enjournal.net/article/10322/>
10. Берестов, Е.И. Об особенностях работы гусеничных движителей землеройно-транспортных машин / Е.И. Берестов, А.В. Кулабухов, И.В. Лесковец // Механизация строительства. – 2009. – № 10. – С. 15–18.
11. Маслов, Н.Н. Основы инженерной геологии и механики грунтов / Н.Н. Маслов. – М.: Высш. школа, 1982. – 511 с.
12. Цитович, Н.А. Механика грунтов (краткий курс) / Н.А. Цитович. – М.: Высш. школа, 1983. – 288 с.
13. Работнов, Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела / Ю.Н. Работнов. – М.: Наука, 1988. – 712 с.

THE INTERACTION MODEL OF THE CATERPILLAR TRACTOR WITH THE GROUND

Alyabiev A.F., Prof. MSFU, Dr. Sci. (Tech.)⁽¹⁾; Kalinin S.Yu., senior lecturer MSFU⁽¹⁾

alyabievaf@rambler.ru

⁽¹⁾Moscow State Forest University (MSFU), 1-st Institutskaya st., 1, 141005, Mytitschi, Moskow reg., Russia

Solved a plane problem of interaction of the caterpillar truck tractor with the ground. Considered the truck with the angle between the lug and the sole of the track is 90°. As a tool for building models used methods of statics of granular media. Built area of limit equilibrium of the soil and the conditions of slipping of the tractor. The results showed that the area of limit equilibrium consists of two regions, the boundary between them forms a break line, near which the equilibrium is preserved, but no complete continuity of stresses. The shape of the area limiting equilibrium is determined by the properties of the soil and material properties of the track: the angle of internal friction and angle of friction of soil on the truck. The size of the area of limit equilibrium is determined by the size of the lug. The shape and size of the area of limit equilibrium do not depend on the coupling of soil and traction. If the limit equilibrium is beyond the dimensions of the base of the track (lug height is large), the tractor will be stuck ("dig") when any pulling force, which occurs when the area of limit equilibrium. If the area of limit equilibrium does not exceed the dimensions of the base of the truck, the tractor will slip in excess of the normal component of the load, balancing the tractive effort of the tractor, tractor weight per foot of track (i.e. there will be a thinning of the area of limit equilibrium). The model allows to determine the ratio between the height of the lug and long track soles for different soils, the coefficient of adhesion of the track and, given the linear deformability of the soil, the coefficient of adhesion of the tractor. The example of calculation of the coefficient of adhesion of the tractor B10M on loam. The values obtained correspond to the real.

Keywords: caterpillar tracks, track, geometrical parameters lugs, ground, thrust linkage.

References

1. Vasil'ev A.V., Dokuchaeva E.N., Utkan-Lyubovcev O.I. *Vliyanie konstruktivnykh parametrov gusenichnogo traktora na ego tyagovo-scepnnye svoystva* [The influence of design parameters of the crawler tractor on its traction characteristics]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1969. 191 p.
2. Borovskih A.M. *Razrabotka novykh i sovershenstvovanie sushestvuyushih konstruktsiy uzlov gusenichnykh dviziteley dlya lesnykh mashin: monografiya* [Development of new and improvement of existing designs of knots caterpillar mover for forestry machines]. Ekaterinburg: Ural state forest engineering University, 2007. 269 p.
3. Pinigin B.N. *Teoriya traktora. Issledovanie svoystv gusenichnykh dviziteley* [The theory of the tractor. The study of the properties of caterpillar mover]. Chelyabinsk: Chelyabinsk Polytechnic Institute, 1895. 93 p.
4. Lyasko M.I., Zaydelman N.I., Slazinskiy V.O. *Vliyanie shaga i vysoty gruntozacepov na velichinu koeffitsienta scepheniya gusenichnogo traktora* [The effect of pitch and height of the grousers on the value of the coefficient of friction crawler tractor]. Tr. MADI: V. 114 [Proceedings of the Moscow automobile road Institute: issue 114]. Moscow, 1976. pp. 115-119.
5. Sokolovskiy V.V. *Statika sypuchey sredy* [Statics of granular media] Moscow, 1990. 272 p.
6. Alyab'ev A.F. *Obosnovanie tekhnologicheskikh kompleksov mashin dlya lesovosstanovleniya: monografiya* [Substantiation of technological machines for reforestation: monograph]. Moscow: MSFU, 2010. 265 p.
7. Bahtin P.U., Vinokurov V.N., Alyab'ev A.F. *Tekhnologicheskie svoystva pochv* [Technological properties of soil]. Moscow: MSFU, 2014. 168 p.
8. Vetrov Yu.A. *Rezanie gruntov zemleroynymi mashinami* [The cutting of soil by digging machines]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1971. 357 p.
9. Berestov E.I., Kulabuhov A.V., Pechkovskaya O.E. *Issledovanie razrusheniya grunta trakami gusenichnykh mashin* [Study destruction of a ground caterpillar machines]. *Mehanizatsiya stroitelstva*, 2014. № 10. pp 21–25
10. Berestov E.I., Kulabuhov A.V., Leskovets I.V. *Ob osobennostyakh raboty gusenichnykh dviziteley zemleroyno-transportnykh mashin* [Some features of caterpillar drives Earthmoving machinery]. *Mehanizatsiya stroitelstva*, 2009. № 10. pp 15-18.
11. Maslov N.N. *Osnovy inzhenernoy geologii i mekhaniki gruntov* [Fundamentals of engineering Geology and soil mechanics]. Moscow: Vysshaya shkola, 1982. 511 p.
12. Tsitovich N.A. *Mekhanika gruntov (kratkiy kurs)* [Soil mechanics (short course)] Moscow: Vysshaya shkola, 1983. 288 p.
13. Pabotnov Yu. N. *Mekhanika deformiruemogo tverdogo tela* [Mechanics of deformable solids]. Moscow: Nauka, 1988. 712 p.