

УДК 630*372/375

Влияние деформации движителей колесно-гусеничных машин на их проходимость по лесосеке*

С.М. Базаров¹, И.В. Григорьев¹, Д.С. Киселев¹, А.И. Никифорова¹, А.В. Иванов²¹Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Институтский пер. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: tlzp@inbox.ru²Братский государственный университет, Макаренко 40, Братск, Россия

Статья поступила 12.08.2012, принята 16.11.2012

В известных исследованиях уплотняющего воздействия трелевочных систем на лесные почвогрунты просматривается некорректный подход, заключающийся в том, что в них не учитывается характер взаимодействия движителя с почвогрунтом, его физико-механические свойства и состояние, наличие корневой системы, суммарная площадь волоков и т.д. Колесные тракторы являются перспективной базой для лесозаготовительных машин поскольку, по сравнению с гусеничными, имеют большую производительность за счет более высоких транспортных скоростей. Для широкого внедрения новых машин в практику лесозаготовок необходимо иметь возможность их круглогодичного использования, поскольку сезонность работы техники существенно удлиняет срок ее окупаемости и делает ее приобретение нерентабельным. Для повышения эффективности эксплуатации колесных лесозаготовительных машин на переувлажненных почвогрунтах в теплое время года ведущие фирмы производители лесной техники выпускают моногусеницы. Колеса с гусеницами имеют большее сцепление с почвогрунтом, оказывая на него меньшее давление. Особенно хорошо видно преимущество использования гусениц при работе на мягких и болотистых грунтах. До настоящего времени не разработаны методики и модели, позволяющие прогнозировать изменения глубины колеи, особенно в переувлажненных почвогрунтах, под воздействием колесно-гусеничного движителя лесозаготовительной машины. Разработанная в статье математическая модель влияния деформации движителей колесно-гусеничных машин на их проходимость по лесосеке убедительно показывает, что варьируя скоростью движения лесных колесно-гусеничных машин, натяжением гусениц и упругими показателями колес можно в известной мере снижать давление на почвогрунт, что будет способствовать большей проходимости машин при освоении лесосек.

Ключевые слова: реология, скорость, упругость, вязкость, время.

Effect of deformation of wheel caterpillar vehicles propelling devices on their passability through logging area

S. M. Bazarov¹, I. V. Grigor'yev¹, D. S. Kiselyov¹, A. I. Nikiforova¹, A. V. Ivanov²¹St. Petersburg State Forestry Engineering University, 5 Institutsky lane, St. Petersburg, Russia E-mail: tlzp@inbox.ru²Bratsk State University, 40, Makarenko str., Bratsk, Russia

The article received 12.08.2012, accepted 16.11.2012

In the known researches of compacting effect of skidding machines on forest soils the incorrect approach can be viewed as it does not take into account the nature of propelling device-soil interaction, its physical-mechanical properties and condition, the presence of root system, the total skid roads area etc. Wheeled tractors make up a promising base as logging machines because in comparison with caterpillar ones they have greater productivity due to higher travelling speed. For widespread adoption of new machines in logging practice, it is necessary to have an opportunity of their all-the-year-round use as the seasonal prevalence of machinery operation essentially extends its cost recovery period and makes its purchase unprofitable. To increase the operational efficiency of wheeled logging machines on wet soils during frost-free season, the leading logging machinery manufacturers produce monocaterpillar tracks. The wheels with caterpillar tracks have better soil adherence exerting lower pressure on it. This advantage of caterpillar tracks employment is well demonstrated while working on soft and marshy soils. The techniques and models that allow predicting the track depth changes especially on wet soils under the impact of the wheel caterpillar vehicle propelling device have not been developed so far. The mathematical model of the deformation effect of the wheel caterpillar vehicle propelling device on their passability through the logging area developed in the paper convincingly shows that by varying the speed of the logging wheel caterpillar vehicles, caterpillar tracks tension and wheels elastic parameters, it is possible to reduce the pressure on soil to a certain extent. This will promote greater vehicles passability when developing logging areas development.

Keywords: rheology, speed, pressure, viscosity, time.

Упрочнению почвогрунтов с упруго-вязкой реологией в процессе образования колеи лесными колесными и гусеничными машинами соответствует нелинейная модель

$$p = (c + c_x x) \cdot x + (\mu_0 + \mu \cdot x) \frac{dx}{dt}, \quad (1)$$

* Материалы данной статьи получены при выполнении НИР № 01201255482 «Разработка теоретических основ сквозных техноло-

гических процессов и модульных систем машин лесозаготовительно-го производства»

здесь p – давление на почвогрунт; c, c_x, μ_0, μ – параметры, характеризующие образование колеи в упруго-вязких почвогрунтах, t – время; x – глубина осадки.

После разделения переменных в (1)

$$dt = (\mu_0 + \mu \cdot x) [p - (c + c_x \cdot x) \cdot x]^{-1} dx \quad (2)$$

и интегрирования получаем следующую динамическую картину формирования колеи в почвогрунтах:

$$t = -\frac{1}{2} c_x^{-1} \ln [p - (c + c_x \cdot x)] + (\mu_0 - \mu \frac{c}{2c_x})(4pc_x - c^2)^{-1} \ln \left[\frac{c + 2c_x x + (4pc_x + c^2)^{\frac{1}{2}}}{c + 2c_x x - (4pc_x + c^2)^{\frac{1}{2}}} \right] + C.$$

С учетом значения постоянной интегрирования при $x = 0$ и $t = 0$ получаем

$$t = (2c_x)^{-1} \cdot \ln [p(p - cx - c_x x^2)^{-1}] + \left[(\mu_0 - \mu \frac{c}{2c_x})(4pc_x - c^2)^{-1} \ln \left\{ \left[\frac{c - (4pc_x + c^2)^{\frac{1}{2}}}{c + 2c_x x - (4pc_x + c^2)^{\frac{1}{2}}} \right] \times \left[\frac{c + 2c_x x + (4pc_x + c^2)^{\frac{1}{2}}}{c + 2c_x x - (4pc_x + c^2)^{\frac{1}{2}}} \right] \right\} \right]^{-1} \times \left[\frac{c + 2c_x x + (4pc_x + c^2)^{\frac{1}{2}}}{c + 2c_x x - (4pc_x + c^2)^{\frac{1}{2}}} \right]^{-1} \quad (3)$$

Асимптотическому значению глубины колеи при $t \rightarrow \infty$ соответствует условие

$$p - cx - c_x x^2 = 0, \quad (4)$$

из которого следует величина максимальной глубины

$$x_m = \left(\frac{c^2}{4c_x} + 4 \frac{p}{c_x} \right)^{\frac{1}{2}} - \frac{c}{2c_x}. \quad (5)$$

При $c_x = 0$ согласно (4) получаем

$$x_m = \frac{p}{c}. \quad (6)$$

Сравнивая (4) и (5), получаем влияние параметра нелинейности c_x .

При $c_x = 0$ уравнение (1) переходит в

$$p = cx + (\mu_0 + \mu x) \frac{dx}{dt}, \quad (7)$$

исследованное в [1, 2], а при $\mu_0 = 0$ уравнение (7) переходит в

$$p = cx + \mu x \frac{dx}{dt}, \quad (8)$$

исследованное в [3].

При построении картины деформации почвогрунтов движителями колесно-гусеничных машин сделаем следующие допущения:

- гусеница рассматривается как тонкая лента, упруго деформируемая вдоль оси, параллельной движению;
- ширина ленты равна ширине обода колес;
- движение происходит по ровной поверхности при однородном состоянии почвогрунта;
- выдавливанием почвогрунта из колеи в процессе движения пренебрегается;
- движение происходит по одному и тому же следу;
- упругая деформации ленты происходит в той ее части, которая находится между сопряженными колесами лесной машины, и касается почвогрунта;
- стрела прогиба профиля деформируемости ленты определяется величиной осадки, образующейся при прохождении почвогрунта;
- колеса имеют жесткий обод.

Принципиальная схема деформации почвогрунта под гусеницей с упругой жесткостью показана на рис. 1.

Напряжение ленты при ее упругой деформации определим формулой

$$T = T_0 + s(L - L_0), \quad (9)$$

здесь T_0 – начальное напряжение гусеницы; s – модуль упругости; L_0 – начальная длина ленты, обусловленная ее монтажным натяжением; L – длина растянутой ленты в результате ее удлинения как результат деформации при образовании колеи сопряженными колесами машины.

В результате упругой деформации ленты возникает разгрузочное давление, приводящее к уменьшению силы воздействия машины на почвогрунт,

$$p_T = T \sin \alpha, \quad (10)$$

где α – угол между касательной к профилю ленты в зоне контакта колеса с почвогрунтом и горизонтальным направлением движения.

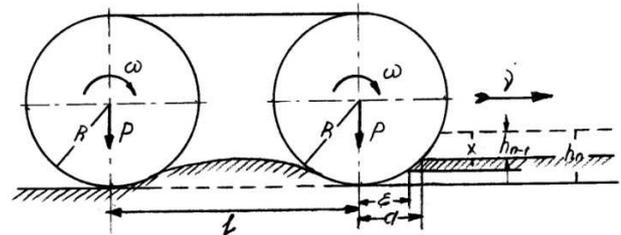


Рис. 1. Принципиальная схема деформации почвогрунта под колесно-гусеничным движителем: T – натяжение гусеницы; R – радиус колеса; P – сила; h_{n-1} – осадка после $n-1$ – кратного прохода; ξ – расстояние от точки контакта колеса с поверхностью почвогрунта; v – скорость движения машины; ω – угловая скорость вращения колеса.

Из условия $\sin \alpha \ll 1$ выражение (10) можно записать в виде

$$p_T = T \alpha. \quad (10a)$$

Профиль растянутой между колесами гусеничной ленты будем рассматривать как асимметричный относительно оси, проходящей посередине между сопряженными колесами, как сумму двух асимметричных дуг.

Удлинение длины дуги растяжения ленты гусеницы определим как состоящую из удлинений двух дуг: дуги под сопряженным колесом, деформирующем почвогрунт, и дуги между колесами машины:

$$L - L_0 = L_a + L_c. \quad (11)$$

С достаточной точностью первое удлинение определим выражением

$$L_a = \left[a^2 + (h_n - h_{n-1})^2 \right]^{\frac{1}{2}} - a, \quad (12)$$

а второе

$$L_c = R \cdot \alpha_0 - (l - a), \quad (13)$$

где l – расстояние между осями сопряженных колес.

В свою очередь, радиус

$$R = \frac{\left[(l_0 - a)^2 + (h_n - h_{n-1})^2 \right]}{(h_n - h_{n-1})}, \quad (14)$$

а угол

$$\alpha_0 = (l_0 - a) \left[R - (h_n - h_{n-1}) \right]^{-1}. \quad (15)$$

Тогда

$$L_c = \left[(l_0 - a)^2 + (h_n - h_{n-1})^2 \right] (h_n - h_{n-1})^{-1} (l_0 - a) \times \left[R - (h_n - h_{n-1}) \right]^{-1} - (l_0 - a) \quad (16)$$

В условиях, когда $\frac{(h_n - h_{n-1})}{R} \ll 1$, получаем нулевое значение $L_c = 0$.

Это означает, что удлинение ленты в основном обусловлено образованием дуги под сопряженным колесом, деформирующим почвогрунт.

Из выражения (12) следует

$$h_n - h_{n-1} = \frac{a^2}{2R}. \quad (17)$$

С учетом (17) представление (12) можно записать в виде

$$L_a = \left[a^2 + \frac{a^4}{4R^2} \right]^{\frac{1}{2}} - a, \quad (18)$$

или

$$L_a = a \left[1 + \frac{a^2}{4R^2} \right]^{\frac{1}{2}} - a. \quad (19)$$

В условиях, когда $\frac{a^2}{4R^2} \ll 1$, удлинение ленты будет определяться выражением:

$$L_a = \frac{a^3}{8R^2}. \quad (20)$$

С учетом полученного выражения (20) представление (9) переходит в

$$T = T_0 + s \frac{a^3}{8R^2}, \quad (21)$$

а (10 а) в

$$p_T = \left(T_0 + s \frac{a^3}{8R^2} \right) \xi R^{-1}. \quad (22)$$

Тогда сила разгрузки колеса равна

$$P_T = \int \left(T_0 + s \frac{a^3}{8R^2} \right) \xi R^{-1} d\xi,$$

или, после интегрирования,

$$P_T = \frac{1}{2} \left(T_0 + s \frac{a^3}{8R^2} \right) a^2. \quad (22 \text{ а})$$

Запишем представление

$$x = h_n - \frac{\xi^2}{2R}, \quad (23)$$

а также

$$\frac{d\xi}{dt} = -v, \quad \frac{dx}{dt} = -2\xi(2R)^{-1} \frac{d\xi}{dt} = \xi R^{-1} v. \quad (24)$$

С учетом (23) и (24) уравнение образования колеи в почвогрунтах (1) принимает вид

$$p = \left[c + c_x \left(h_n - \frac{\xi^2}{2R} \right) \right] \left(h_n - \frac{\xi^2}{2R} \right) + \left[\mu_0 + \mu \left(h_n - \frac{\xi^2}{2R} \right) \right] \xi R^{-1} v. \quad (25)$$

С учетом наличия касательного натяжения, давление на почвогрунт (22) следует определять на основании уравнения

$$p = p_0 + p_T = \left[c + c_x \left(h_n - \frac{\xi^2}{2R} \right) \right] \left(h_n - \frac{\xi^2}{2R} \right) + \left[\mu_0 + \mu \left(h_n - \frac{\xi^2}{2R} \right) \right] \xi R^{-1} v + \left(T_0 + s \frac{a^3}{8R^2} \right) \xi R^{-1},$$

из которого следует, что значение давления на почвогрунт равно

$$p_0 = p - p_T = \left[c + c_x \left(h_n - \frac{\xi^2}{2R} \right) \right] \left(h_n - \frac{\xi^2}{2R} \right) + \left[\mu_0 + \mu \left(h_n - \frac{\xi^2}{2R} \right) \right] \xi R^{-1} v - \left(T_0 + s \frac{a^3}{8R^2} \right) \xi R^{-1}, \quad (26)$$

здесь p_0 – давление на почвогрунт.

Формула (26) указывает на снижение давления на почвогрунт при прохождении колесно-гусеничной машины с упругим двигателем.

Сила нагрузки на почвогрунт равна

$$P_0 = \int pbd\xi, \quad (27)$$

и с учетом (26) интеграл (27) принимает вид

$$P_0 = \int \left\{ \begin{aligned} & \left[c + c_x \left(h_n - \frac{\xi^2}{2R} \right) \right] \left(h_n - \frac{\xi^2}{2R} \right) + \\ & \left[\mu_0 + \mu \left(h_n - \frac{\xi^2}{2R} \right) \right] \xi R^{-1} \nu \end{aligned} \right\} bd\xi = \quad (27 \text{ а})$$

$$= P - \int \left[\left(T_0 + s \frac{a^3}{8R^2} \right) \xi R^{-1} \right] bd\xi,$$

в котором b – ширина обода колеса. Интегрирование производится от 0 до a .

Запишем (27 а) в виде

$$P = \int \left\{ \begin{aligned} & \left[c + c_x \left(h_n - \frac{\xi^2}{2R} \right) \right] \left(h_n - \frac{\xi^2}{2R} \right) + \\ & \left[\mu_0 + \mu \left(h_n - \frac{\xi^2}{2R} \right) \right] \xi R^{-1} \nu + \left(T_0 + s \frac{a^3}{8R^2} \right) \xi R^{-1} \end{aligned} \right\} bd\xi \quad (28)$$

и выполним интегрирование. В результате интегрирования (28) принимает вид

$$Pb^{-1} = ch_n a - \frac{1}{6} ca^3 R^{-1} + c_x ah_n^2 - \frac{2}{3} c_x a^3 h_n + \frac{1}{20} c_x a^5 R^{-2} + \nu R^{-1} \left(\frac{1}{2} \mu_0 a^2 + \frac{1}{2} \mu h_n a^2 - \frac{1}{8} R^{-2} \mu a^4 \right) + \frac{1}{2} a^2 R^{-1} \left(T_0 + s \frac{a^3}{8R^2} \right). \quad (29)$$

С учетом (17) формула (29) переходит в

$$Pb^{-1} = ch_{n-1} a + \frac{1}{3} ca^3 R^{-1} + c_x a \left(h_{n-1} + \frac{1}{2} a^2 R^{-1} \right)^2 - \frac{2}{3} c_x a^3 \times \\ \times \left(h_{n-1} + \frac{1}{2} a^2 R^{-1} \right) + \frac{1}{20} c_x a^5 R^{-2} + \nu R^{-1} \left[\frac{1}{2} \mu_0 a^2 + \frac{1}{2} \mu \left(h_{n-1} + \frac{1}{2} a^2 R^{-1} \right) a^2 - \frac{1}{8} R^{-1} \mu a^4 \right] + \\ + \frac{1}{2} a^2 R^{-1} \left(T_0 + s \frac{a^3}{8R^2} \right). \quad (30)$$

Формулы (17) и (30) при известных параметрах, характеризующих реологию почвогрунта c , c_x , μ_0 , μ и машину P , R , T_0 , s , позволяют определять глубину h_n колеи от n -го прохода по информации глубины h_{n-1} после $n-1$ прохода.

Принимая в качестве первого шага условие, что $h_0 = 0$, находим значение a_1 после первого прохода, решая уравнение

$$P = \frac{1}{3} ca^3 R^{-1} + \frac{1}{4} c_x a^3 R^{-2} - \frac{1}{3} c_x a^5 R^{-1} + \frac{1}{20} c_x a^5 R^{-2} + \nu R^{-1} \left(\frac{1}{2} \mu_0 a^2 + \frac{1}{4} \mu a^4 R^{-1} \right) + \frac{1}{2} a^2 R^{-1} \left(T_0 + s \frac{a^3}{8R^2} \right), \quad (31)$$

глубина колеи после первого прохода равна $h_1 = \frac{1}{2} a_1^2 R^{-1}$, после второго $h_2 = h_1 + \frac{1}{2} a_2^2 R^{-1}$, и т. д.

При $c_x = 0$ и $\mu_0 = 0$ формула (30) переходит в

$$Pb^{-1} = ch_{n-1} a + \frac{1}{3} ca^3 R^{-1} + \nu R^{-1} \left[\frac{1}{2} \mu \left(h_{n-1} + \frac{1}{2} a^2 R^{-1} \right) a^2 - \frac{1}{8} R^{-1} \mu a^4 \right] + \frac{1}{2} a^2 R^{-1} \left(T_0 + s \frac{a^3}{8R^2} \right), \quad (32)$$

а при малых скоростях

$$Pb^{-1} = ch_{n-1} a + \frac{1}{3} ca^3 R^{-1} + \frac{1}{2} a^2 R^{-1} \left(T_0 + s \frac{a^3}{8R^2} \right). \quad (33)$$

Соответственно, для представления (33) глубину колеи после первого прохода можно определить, решая уравнение

$$Pb^{-1} = \frac{1}{3} ca^3 R^{-1} + \frac{1}{2} a^2 R^{-1} \left(T_0 + s \frac{a^3}{8R^2} \right) \quad (34)$$

методом итераций: в качестве первого приближения принимаем

$$Pb^{-1} = \frac{1}{3} ca^3 R^{-1}, \quad (35)$$

тогда глубина колеи равна

$$h_{11} = \frac{1}{2} \left(3Pb^{-1} R c^{-1} \right)^{\frac{2}{3}} R^{-1}.$$

На основании (35) можно записать второе приближение:

$$Pb^{-1} - \frac{1}{2} \left(3Pb^{-1} c^{-1} \right)^{\frac{2}{3}} \left(T_0 + \frac{3}{8} sPb^{-1} c^{-1} R^{-1} \right) = \frac{1}{3} ca^3 R^{-1},$$

из которого следует значение

$$a_1^3 = \left(3Rc^{-1} \right) \left[Pb^{-1} - \frac{1}{2} \left(3Pb^{-1} c^{-1} \right)^{\frac{2}{3}} \left(T_0 + \frac{3}{8} sPb^{-1} c^{-1} R^{-1} \right) \right],$$

позволяющее определить глубину колеи после первого прохода с учетом влияния упругой деформации шины двигателя

$$h_{12} = \frac{1}{2} R^{-1} \left\{ (3Rc^{-1}) \left[Pb^{-1} - \frac{1}{2} (3Pb^{-1}c^{-1})^{\frac{2}{3}} \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \left(T_0 + \frac{3}{8} sPb^{-1}c^{-1}R^{-1} \right) \right] \right\}^{\frac{2}{3}}, \quad (36)$$

или

$$h_{12} = \frac{1}{2} R^{-1} (3Pb^{-1}Rc^{-1})^{\frac{2}{3}} \left[1 - \frac{1}{2} (3P^{-1}b^2c^{-1})^{\frac{2}{3}} \times \right. \\ \left. \times \left(T_0 + \frac{3}{8} sPb^{-1}c^{-1}R^{-1} \right) \right]^{\frac{2}{3}}, \quad (37)$$

или

$$h_{12} = h_{11} \left[1 - \frac{1}{2} (3P^{-1}b^2c^{-1})^{\frac{2}{3}} \left(T_0 + \frac{3}{8} sPb^{-1}c^{-1}R^{-1} \right) \right]^{\frac{2}{3}}. \quad (38)$$

Согласно результатам исследований [1, 2] обобщенная формула для расчета глубины колеи в почвогрунтах после многократных проходов лесной машины имеет вид

$$h_n = h_1 n^{\frac{1}{2}} \quad (39)$$

и, с учетом (37), формула (39) переходит в

$$h_n = \left\{ \frac{1}{2} R^{-1} (3Pb^{-1}Rc^{-1})^{\frac{2}{3}} \times \right. \\ \left. \times \left[1 - \frac{1}{2} (3P^{-1}b^2c^{-1})^{\frac{2}{3}} \left(T_0 + \frac{3}{8} sPb^{-1}c^{-1}R^{-1} \right) \right]^{\frac{2}{3}} \right\} n^{\frac{1}{2}}. \quad (40)$$

При учете влияния скорости движения машины на образование колеи в почвогрунтах следует воспользоваться формулой (32), которая позволяет определить глубину колеи после первого прохода на основании представления

$$Pb^{-1} = \frac{1}{3} ca^3 R^{-1} + \frac{1}{8} \mu v R^{-2} a^4 + \frac{1}{2} a^2 R^{-1} \left(T_0 + s \frac{a^3}{8R^2} \right), \quad (41)$$

из которого следует значение

$$a_1^3 = (3Rc^{-1}) \left[Pb^{-1} - \frac{1}{8} \mu v R^{-2} (3Pb^{-1}Rc^{-1})^{\frac{4}{3}} - \right. \\ \left. - \frac{1}{2} (3Pb^{-1}c^{-1})^{\frac{2}{3}} \left(T_0 + \frac{3}{8} sPb^{-1}c^{-1}R^{-1} \right) \right],$$

и на основании метода итераций получаем глубину после первого прохода

$$h_{12} = \left\{ (3Rc^{-1}) \left[Pb^{-1} - \frac{1}{8} \mu v R^{-2} (3Pb^{-1}Rc^{-1})^{\frac{4}{3}} - \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{1}{2} (3Pb^{-1}c^{-1})^{\frac{2}{3}} \left(T_0 + \frac{3}{8} sPb^{-1}c^{-1}R^{-1} \right) \right] \right\}^{\frac{2}{3}}. \quad (42)$$

Таким образом, формула для расчета глубины колеи в почвогрунтах в результате многократных проходов колесно-гусеничной машины принимает вид

$$h_n = \left\{ (3Rc^{-1}) \left[Pb^{-1} - \frac{1}{8} \mu v R^{-2} (3Pb^{-1}Rc^{-1})^{\frac{4}{3}} - \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{1}{2} (3Pb^{-1}c^{-1})^{\frac{2}{3}} \left(T_0 + \frac{3}{8} sPb^{-1}c^{-1}R^{-1} \right) \right] \right\}^{\frac{2}{3}} n^{\frac{1}{2}} \quad (43)$$

Полученная формула (43) показывает, что, варьируя скорость движения лесных колесно-гусеничных машин, натяжение гусениц и упругие показатели колес, можно в известной мере снижать давление на почвогрунт, что будет способствовать большей проходимости машин при освоении лесосек.

Литература

1. Базаров С.М., Барашков И.А., Никифорова А.И., Хахина А.М. Математическая модель колееобразования в почвогрунтах под воздействием лесных машин. // Известия СПбЛТА. 2011. Вып.197. С. 54-65.
2. Базаров С.М., Барашков И.А., Никифорова А.И., Хахина А.М. Теория колееобразования в почвогрунтах под воздействием гусеничных лесных машин. // Известия СПбЛТА. 2012. Вып. 198. С. 59-70.
3. Ишлинский А.Ю. Механика вязкопластических и не вполне упругих тел. М.: Наука, 1986. 360 с.

References

1. Bazarov S.M., Barashkov I.A., Nikiforova A.I., Nahina A.M. mathematical model track in ground under influence wood machines. // News FTA, 2011, № 197. With. 54-65.
2. Bazarov S.M., Barashkov I.A., Nikiforova A.I., Nahina A.M. Theor track in ground under influence of caterpillar wood machines. // News FTA, 2012, № 198. With. 59-70.
3. Ishlinsky A.Y. Mechanics viscous and plastic and not quite elastic ph. M.: the Science, 1986.360 with.