



УДК 625.711.84

А.С. Федоренчик, С.С. Макаревич, П.А. Протас

Федоренчик Александр Семенович родился в 1950 г., окончил в 1972 г. Белорусский технологический институт, кандидат технических наук, доцент кафедры лесных машин и технологии лесозаготовок, проректор по учебной работе Белорусского государственного технологического университета. Имеет около 160 печатных работ по вопросам разработки и совместимости лесной техники с окружающей средой, лесной сертификации, ресурсосберегающих технологий заготовки древесины при рубках главного пользования, совершенствования методов расчета лесоскладских потоков, лесного образования.



Макаревич Сергей Степанович родился в 1931 г., окончил в 1955 г. Белорусский лесотехнический институт, кандидат технических наук, доцент кафедры сопротивления материалов Белорусского государственного технологического университета. Имеет 120 печатных работ в области расчета слоистых конструкций, устойчивости элементов конструкций и исследования свойств композиционных материалов.



Протас Павел Александрович родился в 1977 г., окончил в 1999 г. Белорусский государственный технологический университет, магистр технических наук, аспирант кафедры лесных машин и технологии лесозаготовок БГТУ. Имеет 19 печатных работ в области воздействия лесозаготовительной техники на лесные почвы.



ДЕФОРМАЦИЯ ГРУНТОВ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТАХ ЛЕСОСЕКИ, УКРЕПЛЕННЫХ ОТХОДАМИ ЛЕСОЗАГОТОВОК

Дано математическое описание процесса деформации грунтов на технологических элементах лесосеки, укрепленных отходами лесозаготовок, с учетом вязкоупругих свойств материалов покрытия. Представлены экспериментальные данные по воздействию лесозаготовительных машин на лесные почвогрунты.

Ключевые слова: технологические элементы лесосеки, двухслойная конструкция, отходы лесозаготовок, деформация, плотность, вязкоупругие константы.

При проведении лесозаготовительных работ важным фактором улучшения несущей способности грунтов, повышения проходимости лесотранспортных машин и снижения отрицательного экологического воздействия на лесные почвы является укрепление технологических элементов лесосеки отходами лесозаготовок [5]. В Белорусском государственном техноло-

гическом университете разработана математическая модель, позволяющая описывать процесс деформации почвогрунтов на технологических элементах лесосеки, которые можно рассматривать как вязкоупругое слоистое полупространство, нагруженное осесимметричной нагрузкой от колеса или гусеницы лесотранспортной (лесозаготовительной) машины [3, 4].

Цель статьи – вывод и анализ расчетных зависимостей.

Если рассматривать трелевочный волок как вязкоупругое двухслойное полупространство (где первый слой – грунт, второй – отходы лесозаготовок), вертикальное перемещение W будет определяться формулами:

на поверхности первого слоя, т. е. в грунтовом основании,

$$W_1 = -\frac{1 + \mu_1}{\dot{A}_1 h^2} \left(\int_0^\infty (A(t) + 2(1 - \mu_1) B(t)) e^{-\alpha} \alpha^2 J_0(\rho\alpha) d\alpha + \int_0^t \int_0^\infty (A(t) + 2(1 - \mu_1) B(t)) e^{-\alpha} \alpha^2 J_0(\rho\alpha) \delta_1 e^{-\beta_1 \tau} d\alpha d\tau \right); \quad (1)$$

на нижней границе второго слоя

$$W_2 = -\frac{1 + \mu_2}{\dot{A}_2 h^2} \left(\int_0^\infty (A(t) + 2(1 - \mu_2)(B(t) + 2D_2(t))) e^{-\alpha} \alpha^2 J_0(\rho\alpha) d\alpha + \int_0^t \int_0^\infty (A(t) + 2(1 - \mu_2)(B(t) + 2D_2(t))) e^{-\alpha} \alpha^2 J_0(\rho\alpha) \delta_2 e^{-\beta_2 \tau} d\alpha d\tau \right), \quad (2)$$

где $A(t)$, $B(t)$, $D_2(t)$ – коэффициенты, являющиеся функциями времени t , нагрузки q , параметров вязкоупругости слоев δ и β и определяющиеся по формулам, полученным в работе [4].

При нагружении грунтового основания необходимо пользоваться общим модулем деформации E_0 , а следовательно, и параметрами деформации δ_0 и β_0 , определяющими ползучесть [6, 7]. Разгрузка характеризуется модулем упругости E и параметрами ползучести δ и β . Так как грунтовое основание в расчетной схеме является первым слоем, его вязкоупругие параметры обозначим: при нагрузке – $E_{1н}$, $\delta_{1н}$, $\beta_{1н}$; при разгрузке – $E_{1р}$, $\delta_{1р}$, $\beta_{1р}$.

Для второго слоя, состоящего из влажных сучьев и ветвей, вязкоупругие параметры при нагрузке и разгрузке также различны [7]: при нагрузке – $E_{2н}$, $\delta_{2н}$, $\beta_{2н}$; при разгрузке – $E_{2р}$, $\delta_{2р}$, $\beta_{2р}$.

Учитывая, что при каждом наезде колеса или гусеницы грунт уплотняется, его вязкоупругие параметры являются функцией числа наездов, т. е. числа циклов действия нагрузки:

$$E_{1н} = E_{1н}(N), \delta_{1н} = \delta_{1н}(N), \beta_{1н} = \beta_{1н}(N); \\ E_{1р} = E_{1р}(N), \delta_{1р} = \delta_{1р}(N), \beta_{1р} = \beta_{1р}(N),$$

где N – номер цикла.

Зависимость вязкоупругих параметров грунта от числа циклов можно установить опытным путем.

Как видно из условий работы дорожной конструкции, при нагружении на границе слоев $W_1 = W_2$. Опыты показывают, что разница между вязкоупругими параметрами при нагрузке и разгрузке для грунтового основа-

ния больше, чем для верхнего слоя из древесных веток, следовательно, при разгрузке древесные ветки будут висеть над колеей. При первом нагружении граница слоев переместится по вертикали на величину $W_{1i}^{(1)}$, определяемую формулой (1) с заменой E_1, δ_1, β_1 на $\hat{A}_{1i}^{(1)}, \hat{\delta}_{1i}^{(1)}, \hat{\beta}_{1i}^{(1)}$. При разгрузке верхняя граница грунтового основания переместится в обратном направлении на величину $W_{10}^{(1)}$, определяемую формулой (1) с заменой E_1, δ_1, β_1 на $\hat{A}_{10}^{(1)}, \hat{\delta}_{10}^{(1)}, \hat{\beta}_{10}^{(1)}$. Нижняя граница верхнего слоя, состоящего из порубочных остатков, переместится вверх на величину $W_{20}^{(1)}$, определяемую формулой (2) с заменой E_2, δ_2, β_2 на $\hat{A}_{20}, \hat{\delta}_{20}, \hat{\beta}_{20}$.

Таким образом, при первом цикле нагрузки – разгрузки верхняя граница грунта опустится на величину

$$W_1^{(1)} = W_{1i}^{(1)} - W_{10}^{(1)},$$

а нижняя граница слоя из веток – на

$$W_2^{(1)} = W_{1i}^{(1)} - W_{20}^{(1)}.$$

Следовательно, в колее образуется просвет между нижней границей верхнего слоя и верхней границей грунта, равный

$$W(1) = W_1^{(1)} - W_2^{(1)}.$$

Продолжительность действия нагрузки t_n на одну и ту же точку поверхности трелевочного волока

$$t_i = D/v,$$

где D – диаметр отпечатка колеса;

v – скорость движения транспортного средства.

При разгрузке время t_p определяется продолжительностью между наездами колес. Очевидно, что $t_p \gg t_n$, но, поскольку при разгрузке деформация восстанавливается, она не может быть больше той, которая получилась при нагрузке. Разгрузку следует рассматривать как нагружение отрицательной нагрузкой q с тем же временем действия. Поэтому при использовании формул (1) и (2) следует принять $t_n = t_p = t$.

Если нагрузка передается не по кругу, а по прямоугольнику шириной b и длиной ℓ , то перемещения, получаемые для круга, следует умножить на коэффициент K , зависящий от отношения ℓ/b [1]:

ℓ/b	K	ℓ/b	K
1	1,12	4	2,10
2	1,53	5	2,53
3	1,78		

В этом случае время нагрузки и разгрузки $t = \ell/v$. При повторном нагружении, т. е. при проезде следующего колеса, часть давления уйдет на ликвидацию зазора $W(1)$ между нижней границей верхнего слоя и грунтом. Учитывая то, что ветки в основном располагаются перпен-

дикулярно к оси дороги, и пренебрегая трением между ними, для определения нагрузки q_1 , идущей на ликвидацию зазора $W(1)$, выделим из верхнего слоя перпендикулярную к оси дороги полосу шириной $B = 1$ и длиной ℓ_1 , равной ширине прямоугольной нагрузки b или диаметру отпечатка колеса D . Получим балку, нагруженную равномерно распределенной нагрузкой, которая опирается на края колеи.

При такой схеме нагружения $W(1) = 5q_1\ell_1^4 / (384E_2J_x)$, откуда

$$q_1 = 384E_2J_xW(1) / (5\ell_1^4).$$

Учитывая, что $J_x = h^3/12$, окончательно можно записать

$$q_1 = 6,4E_2h^3W(1) / \ell_1^4.$$

Таким образом, при втором цикле нагрузки – разгрузки определение вертикальных перемещений ведется от нагрузки

$$q(2) = q - q_1.$$

При N -м цикле нагрузки – разгрузки расчет ведется от интенсивности нагрузки

$$q(N) = q - q_{N-1},$$

где $q_{N-1} = 6,4E_2h^3W(N-1) / \ell_1^4$; $W(N-1) = \sum_{i=1}^{N-1} (W_1^{(i)} - W_2^{(i)})$.

При N -м нагружении перемещение $W_{1f}^{(N)}$ определяется по формуле (1) с заменой E_1, δ_1, β_1 на $\hat{A}_{1f}^{(N)}, \hat{\delta}_{1f}^{(N)}, \hat{\beta}_{1f}^{(N)}$. При N -й разгрузке перемещение $W_{1\delta}^{(N)}$ определяется по формуле (1) с заменой E_1, δ_1, β_1 на $\hat{A}_{1\delta}^{(N)}, \hat{\delta}_{1\delta}^{(N)}, \hat{\beta}_{1\delta}^{(N)}$, а перемещение $W_{2\delta}^{(N)}$ по формуле (2) с заменой E_2, δ_2, β_2 на $E_{p2}, \delta_{p2}, \beta_{p2}$. При этом коэффициенты $A(t), B(t), D_2(t)$ определяются с заменой интенсивности нагрузки q на $q(N)$.

После N циклов нагрузки – разгрузки глубина колеи в грунте равна

$$W_1^{(N)} = \sum_{i=1}^N (W_{1f}^{(i)} - W_{1\delta}^{(i)}).$$

Задаваясь ограничением глубины колеи в грунте, можно определить допустимое число циклов N нагрузки – разгрузки, что является теоретическим обоснованием для расчета допустимого числа проходов машины по волоку (технологическому коридору).

Следует отметить, что вязкоупругие параметры верхнего слоя удобно определять через вязкоупругие параметры древесины веток. Если средний диаметр веток d , а толщина верхнего слоя h , то по высоте слоя расположено $n = h/d$ веток, а по ширине выделенного слоя – $m = B/d$ веток (рис. 1).

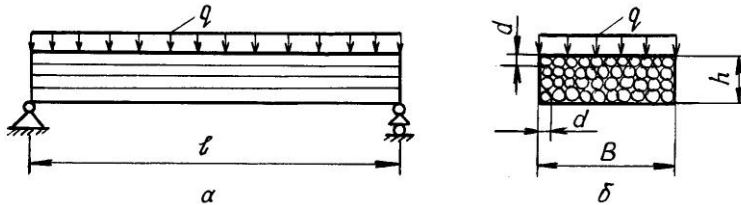


Рис. 1. Схема участка дороги в пределах диаметра колеса ℓ : a – длина участка; b – поперечное сечение; q – интенсивность внешней нагрузки; B – ширина; h – высота; d – диаметр веток

Пренебрегая трением между ветками, можно считать, что каждая из них работает на изгиб независимо от других. Нагрузка, приходящаяся на одну ветку, $q_0 = q/(mn)$. При изгибе одной ветки как балки на двух опорах, нагруженной равномерно распределенной нагрузкой интенсивности q_0 , прогиб посередине будет равен

$$W_0 = 5q_0\ell_1 / (384E_a J_0),$$

где E_d – модуль упругости древесины ветки;

J_0 – осевой момент инерции ветки, $J_0 = \pi d^4 / 64$.

Подставляя в формулу для прогиба q_0 и J_0 , выраженные через q и d , получаем

$$W_0 = \frac{320q\ell_1^4}{384\pi mnd^4 E_a}.$$

Если учесть, что $n = h/d$, а $m = B/d$, будем иметь

$$W_0 = \frac{320q\ell_1^4}{384\pi Bhd^2 E_a}. \quad (3)$$

Для верхнего слоя шириной B и высотой h прогиб посередине балки

$$W = \frac{5q\ell_1^4}{384E_2 J} = \frac{60q\ell_1^4}{384Bh^3 E_2}. \quad (4)$$

Приравняв прогибы согласно (3) и (4), получаем

$$E_2 = 0,59 \frac{d^2}{h^2} E_a.$$

Так находим модуль упругости верхнего слоя E_2 через модуль упругости древесины ветки E_d .

Аналогично определим остальные вязкоупругие константы для верхнего слоя через константы древесины веток:

$$\delta_2 = 0,59 \frac{d^2}{h^2} \delta_a; \quad \beta_2 = 0,59 \frac{d^2}{h^2} \beta_a.$$

Как показывают экспериментальные данные (рис. 2 и 3), при проведении лесозаготовок современными энергонасыщенными машинами значительно повреждаются почвогрунты и изменяются их физико-механические

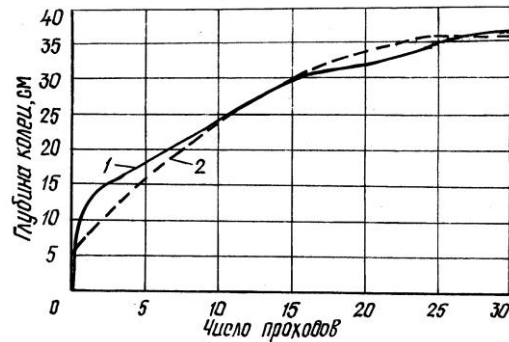


Рис. 2. Зависимость глубины колеи от числа проходов колесной трелевочной машины МЛ-126: 1 – по точкам; 2 – аппроксимация

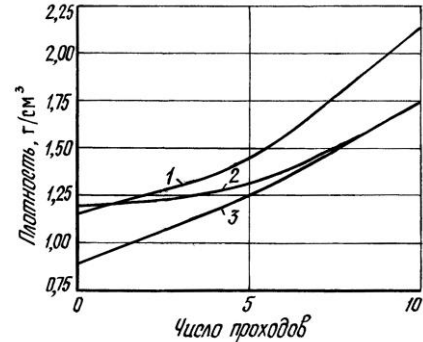


Рис. 3. Зависимость плотности почвы от числа проходов трелевочной машины МЛ-126 в трехпараллельных измерениях (1, 2, 3)

свойства, что, в свою очередь, влияет на возобновление и продуктивность лесонасаждений.

По данным исследований [2], пороговое значение плотности почвы для возобновления ели составляет 1,65...1,70, березы – 1,80 г/см³. Однако, как видно из графика на рис. 3, уже после 10 проходов трелевочной машины по волоку почва уплотняется до порогового значения, а глубина колеи достигает 25 см (рис. 2).

Таким образом, на технологических элементах лесосеки, укрепленных порубочными остатками, образование колеи после 15 ... 20 проходов уменьшается в 1,5–2,0 раза, а при 3 ... 5 проходах колея практически не образуется. Интенсивность уплотнения дерново-подзолистых почв снижается на 40...60 %. Кроме того, значительно уменьшаются повреждаемость корней растущих деревьев при выборочных рубках, выбросы отработанных газов двигателей (ввиду меньшего расхода топлива); при перегнивании порубочных остатков разуплотняется почва на волоке, повышается ее плодородие, ускоряются биологические процессы функционирования корневых систем деревьев.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабков В.Ф. Основы грунтоведения и механики грунтов / В.Ф. Бабков, В.М. Безрук. – М.: Высш. шк., 1986.
2. Котиков В.М. Воздействие лесозаготовительных машин на лесные почвы: автореф. дис. ... д-ра. техн. наук / В.М. Котиков. – М., 1995. – 37 с.
3. Федоренчик А.С. Деформация лесных почв под воздействием колесных и гусеничных движителей / А.С. Федоренчик, С.С. Макаревич, Н.П. Вырко // Лесн. журн. – 2000. – № 3. – С. 80–86. – (Изв. высш. учеб. заведений).
4. Федоренчик А.С. Аналитическое исследование колееобразования на трелевочных волоках, укрепленных отходами лесозаготовок / А.С. Федоренчик, С.С.

Макаревич, П.А. Протас // Лесн. журн. – 2002. – № 1. – С. 80–89. – (Изв. высш. учеб. заведений).

5. Федоренчик А.С. Применение отходов лесозаготовок при обустройстве трелевочных волоков / А.С. Федоренчик, П.А. Протас // Новые технологии рециклинга вторичных ресурсов: материалы МНТК. – Мн.: БГТУ, 2001. – С. 244–246.

6. Цытович Н.А. Механика грунтов / Н.А. Цытович. – М.: Высш. шк., 1973.

7. Шукле Л. Реологические проблемы механики грунтов / Л. Шукле. – М.: Стройиздат, 1976.

Белорусский государственный
технологический университет

Поступила 15.12.02

A.S. Fedorenchik, S.S. Makarevich, P.A. Protas

**Soil Deformation on Technological Elements of Logging Sites
Consolidated by Logging Wastes**

Mathematical description of soil deformation process on technological elements of the logging site consolidated by logging wastes is given taking into account viscoelastic characteristics of the cover material. Experimental data on the influence of logging machines on the forest soils are provided.
