

УДК 625.711.84

А.С. Федоренчик, доцент; С.С. Макаревич, доцент; П.А. Протас, аспирант  
**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЛУБИНЫ КОЛЕИ НА ТРЕЛЕВОЧНЫХ ВОЛОКАХ,  
 УКРЕПЛЕННЫХ ОТХОДАМИ ЛЕСОЗАГОТОВОК**

The mathematical model allowing to determine depth of a track on skidding trails layed by logging waste is developed.

Как показал практический опыт передовых зарубежных и отечественных лесозаготовительных предприятий, важным фактором для улучшения несущей способности грунтов, повышения проходимости лесотранспортных машин и снижения отрицательного экологического воздействия на лесные почвы является укрепление волоков отходами лесозаготовок [1].

Трелевочный волок, укрепленный сучьями и ветвями, можно рассматривать как двухслойное полупространство. Вертикальное перемещение в этом случае будет определяться формулами:

на поверхности 1-го слоя, т.е. грунтовым основании,

$$W_1 = -\frac{1+\mu_1}{E_1 h^2} \left( \int_0^{\infty} (A(t) + 2(1-\mu_1)B(t)) e^{-\alpha} \alpha^2 J_0(\rho\alpha) d\alpha + \int_0^t \int_0^{\infty} (A(t) + 2(1-\mu_1)B(t)) e^{-\alpha} \alpha^2 J_0(\rho\alpha) \delta_1 e^{-\beta_1 \tau} d\alpha d\tau \right); \quad (1)$$

на нижней границе второго слоя

$$W_2 = -\frac{1+\mu_2}{E_2 h^2} \left( \int_0^{\infty} (A(t) + 2(1-\mu_2)(B(t) + 2D_2(t))) e^{-\alpha} \alpha^2 J_0(\rho\alpha) d\alpha + \int_0^t \int_0^{\infty} (A(t) + 2(1-\mu_2)(B(t) + 2D_2(t))) e^{-\alpha} \alpha^2 J_0(\rho\alpha) \delta_2 e^{-\beta_2 \tau} d\alpha d\tau \right). \quad (2)$$

При этом коэффициенты  $A(t)$ ,  $B(t)$ ,  $D_2(t)$  являются функциями времени  $t$ , нагрузки  $q$ , параметров вязкоупругости слоев и определяются по формулам, полученным в работе [2].

Как показано в работах [3, 4], при нагружении грунтового основания необходимо пользоваться общим модулем деформации  $E_0$ , а следовательно, и параметрами деформации  $\delta_0$  и  $\beta_0$ , характеризующими ползучесть при нагружении. Разгрузка характеризуется модулем упругости  $E$  и параметрами ползучести  $\delta$  и  $\beta$ . Так как грунтовое основание в расчетной схеме является первым слоем, его вязкоупругие параметры будем обозначать: при нагружении –  $E_{1н}$ ,  $\delta_{1н}$ ,  $\beta_{1н}$ ; при разгрузке –  $E_{1р}$ ,  $\delta_{1р}$ ,  $\beta_{1р}$ .

Для второго слоя, состоящего из влажных веток, вязкоупругие параметры также будут разными [4] при нагружении и разгрузке: при нагружении –  $E_{2н}$ ,  $\delta_{2н}$ ,  $\beta_{2н}$ ; при разгрузке –  $E_{2р}$ ,  $\delta_{2р}$ ,  $\beta_{2р}$ .

Учитывая, что грунт при каждом наезде колеса или гусеницы 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 нагружении и разгрузке для грунтового основания больше, чем для верхнего слоя из древесных веток. Поэтому при разгрузке древесные ветки будут висеть под колесей. При первом нагружении граница слоев переместится по вертикали на величину  $W_{1н}^{(1)}$ , определяемую формулой (1) с заменой  $E_1, \delta_1, \beta_1$  на  $E_{1н}^{(1)}, \delta_{1н}^{(1)}, \beta_{1н}^{(1)}$ . При разгрузке верхняя граница грунтового основания переместится в обратном направлении на величину  $W_{1р}^{(1)}$ , определяемую формулой (1) с заменой  $E_1, \delta_1, \beta_1$  на  $E_{1р}^{(1)}, \delta_{1р}^{(1)}, \beta_{1р}^{(1)}$ . Нижняя граница верхнего слоя, состоящего из веток, переместится вверх на величину  $W_{2р}^{(1)}$ , определяемую формулой (2) с заменой  $E_2, \delta_2, \beta_2$  на  $E_{2р}, \delta_{2р}, \beta_{2р}$ .

Таким образом, при первом цикле "нагружение – разгрузка" верхняя граница грунта опустится на величину

$$W_1^{(1)} = W_{1н}^{(1)} - W_{1р}^{(1)},$$

а нижняя граница слоя из веток опустится на величину

$$W_2^{(1)} = W_{1н}^{(1)} - W_{2р}^{(1)}.$$

Следовательно, в колее образуется просвет между нижней границей верхнего слоя и верхней границей грунта, величина которого будет равна

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

При нагружении продолжительность действия нагрузки на одну и ту же точку поверхности трелевочного волокна равна

$$t_n = D/v,$$

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, учитывая тот факт, что при разгрузке деформация восстанавливается, она не может быть больше той деформации, которая получилась при нагружении. Разгрузку следует рассматривать как нагружение отрицательной нагрузкой  $q$  с тем же временем действия, что и при нагружении. 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  $\ell$ , то перемещения, получаемые для круга, следует умножить на коэффициент  $K$ , зависящий от отношения  $\ell/b$  [5].

Таблица

Значения коэффициента  $K$ 

Отношение сторон прямоугольника $\ell/b$	1	2	3	4	5
Коэффициент $K$	1,12	1,53	1,78	2,10	2,53

Время нагружения и разгрузки в этом случае будет равно  $t = \ell/v$ . При повторном нагружении, т.е. при проезде следующего колеса, часть давления уйдет на то, чтобы ликвидировать зазор  $W(1)$  между нижней границей верхнего слоя и грунтом. Учитывая то, что ветки в основном располагаются перпендикулярно 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  $B = b$  и длиной  $\ell_1$ , равной ширине прямоугольной нагрузки  $b$  или диаметру отпечатка колеса  $D$ . Получим балку, нагруженную равномерно распределенной нагрузкой, которая опирается на края колес.

При такой схеме нагружения  $W(1) = 5 \cdot q_1 \cdot \ell_1^4 / (384 \cdot E_2 \cdot J_x)$ , откуда

$$q_1 = 384 \cdot E_2 \cdot J_x W(1) / (5 \cdot \ell_1^4)$$

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

$$q_1 = 6,4 E_2 \cdot h^3 W(1) / \ell_1^4$$

Таким образом, при втором цикле "нагружение – разгрузка" определение вертикальных перемещений ведется от нагрузки

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

При  $N$ -м цикле "нагружение – разгрузка" расчет ведется от интенсивности нагрузки

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

где  $q_{N-1} = 6,4 E_2 \cdot h^3 W(N-1) / \ell_1^4$ ;  $W(N-1) = \sum_{i=1}^{N-1} (W_1^{(i)} - W_2^{(i)})$ .

При  $N$ -м нагружении перемещение  $W_{1н}^{(N)}$  определяется по формуле (1) с заменой  $E_1, \delta_1, \beta_1$  на  $E_{1н}^{(N)}, \delta_{1н}^{(N)}, \beta_{1н}^{(N)}$ . При  $N$ -й разгрузке перемещение  $W_{1р}^{(N)}$  определяется по формуле (1) с заменой  $E_1, \delta_1, \beta_1$  на  $E_{1р}^{(N)}, \delta_{1р}^{(N)}, \beta_{1р}^{(N)}$ , а перемещение  $W_{2р}^{(N)}$  по формуле (2) с заменой  $E_2, \delta_2, \beta_2$  на  $E_{2р}, \delta_{2р}, \beta_{2р}$ . При этом коэффициенты  $A(t), B(t), D_2(t)$  определяются с заменой интенсивности нагрузки  $q$  на  $q(N)$ .

После  $N$  циклов "нагружение – разгрузка" глубина колеи в грунте будет равна

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

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 укладывается  $n = h/d$  веток, а по ширине выделенного слоя  $m = B/d$  веток. Пренебрегая трением между ветками, можно считать, что каждая из них работает на изгиб независимо от других. Нагрузка, приходящаяся на одну ветку,  $q_0 = q/(m \cdot n)$ . При изгибе одной ветки как балки на двух опорах, нагруженной равномерно распределенной нагрузкой интенсивности  $q_0$ , прогиб посередине будет равен

$$W_0 = 5 \cdot q_0 \cdot \ell_1^4 / (384 E_d \cdot J_0),$$

где  $E_d$  – модуль упругости древесины ветки,  $J_0 = \pi d^4 / 64$  – осевой момент инерции ветки.

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

$$W_0 = \frac{320 \cdot q \cdot \ell_1^4}{384 \cdot \pi \cdot m \cdot n \cdot d^4 E_d}.$$

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

$$W_0 = \frac{320 \cdot q \cdot \ell_1^4}{384 \cdot \pi \cdot B \cdot h \cdot d^2 E_d}. \quad (3)$$

Для верхнего слоя шириной  $B$  и высотой  $h$  прогиб посередине балки будет равен

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

Приравнивая прогибы согласно (3) и (4), получим

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

Так определится модуль упругости верхнего слоя  $E_2$  через модуль упругости древесины ветки  $E_d$ .

Аналогично определяются остальные вязкоупругие константы для верхнего слоя через константы древесины веток, т.е.

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

## ЛИТЕРАТУРА

1. Федоренчик А.С., Протас П.А. Применение отходов лесозаготовок при обустройстве трелевочных волоков // Новые технологии рециклинга вторичных ресурсов: Материалы МНТК. Мн.: БГТУ, 2001. С. 244 – 246.
2. Федоренчик А.С., Макаревич С.С., Вырко Н.П., Протас П.А. Расчет лесных транспортных путей с учетом вязкоупругих свойств материалов // В этом же сборнике.
3. Цыгович Н.А. Механика грунтов. – М.: Высшая школа, 1973.
4. Шукле Л. Реологические проблемы механики грунтов. – М.: Стройиздат, 1976.
5. Бабков В.Ф., Безрук В.М. Основы грунтоведения и механики грунтов. – М.: Высшая школа, 1986.

УДК 630\*323

Д.В. Клоков, ассистент; А.Н. Бычек, ассистент

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОЛЕСНЫХ ТРЕЛЕВОЧНЫХ МАШИН С ПАЧКОЙ ХЛЫСТОВ И ВОЛОКОМ

Developed mathematical model of hauling process used for justification of main parameters of a new skidders.

В соответствии с концепцией развития лесозаготовительной отрасли лесного комплекса в Республике Беларусь принято решение по созданию собственного лесного машиностроения. Активное участие в решении этой проблемы принимает целый ряд машиностроительных предприятий, и в первую очередь Минский тракторный завод.

На МТЗ совместно с БГТУ разработан типаж лесных машин на базе тракторов "Беларус". В настоящее время созданы и выпускаются серийно форвардеры МЛПТ-354, МЛ-131 и трелевочные машины ТТР-401, МЛ-127 с чокерным оборудованием.

С целью обоснования параметров указанных машин в БГТУ разработан комплекс математических моделей процесса работы машин при выполнении ими технологических операций. Ниже приведена методика моделирования процесса движения трелевочных машин. Эта модель отражает сложную связь подсистем машины (двигатель, трансмиссия, ведущие мосты, движители, предмет труда). Учитываются реальные возмущающие воздействия (неровности поверхности волока, крутящий момент двигателя), а также реальные параметры машины.

Ввиду различной компоновки машин и вариантов технологического оборудования разработаны две расчетные схемы трелевщиков. Первая из которых соответствует машине типа 4К4 на базе серийного трактора с жесткой рамой (ТТР-401, 402) [1], а вторая – машинам типа 4К4 и 6К6 на базе шасси с шарнирно-сочлененной рамой (рис. 1).

Для каждой из них составлены математические модели, которые уже реализованы в процессе проектирования созданных и перспективных машин.

Рассмотрим имитационную модель процесса движения машины, показанную на рис. 1. Принятая расчетная схема наряду с уже разработанными схемами является уточненной: она учитывает упругую податливость почвогрунта. Это сделано из тех предпосылок, что при движении по трелевочным волокам прогибы покрытия и шин машины являются соизмеримыми величинами.