погрузочной машины // Весці НАНБ. Сер. фіз.-тэхн. навук. 1998. №1.-С. 25-31.

2. Жуков А. В., Гороновский А. Р., Асмоловский М. К. Обоснование параметров тандемной тележки погрузочно-транспортной машины// Тр. БГТУ. Выпуск VII. – Мн., 1999.-С. 33-38.

УДК 629.114.2

А. С. Федоренчик, доцент;
С. С. Макаревич, доцент;
Н. П. Вырко, профессор;
П. А. Протас, инженер

ДЕФОРМАЦИЯ ЛЕСНЫХ ПОЧВ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ КОЛЕСНЫХ И ГУСЕНИЧНЫХ ДВИЖИТЕЛЕЙ

The methods of calculation deformation of forest soils as a result of exploitation the logging transports on felling areas are considered.

С внедрением многооперационных и тяжелых лесотранспортных машин на лесосечных работах большую актуальность приобретает вопрос сохранения подроста и естественного лесовозобновления. Воздействуя на почвенную часть лесного биогеоценоза, уплотняя почву в колее, колесные и гусеничные движители вызывают напряженно-деформированное состояние лесных почвогрунтов, изменяют физико-механические и биологические их свойства, препятствуют и увеличивают срок естественного лесовозобновления.

Лесные почвы относятся к слабым грунтам и в сравнении с обычными грунтами имеют некоторые особенности. Для них характерны: высокая дисперсность, влажность и пористость в природном состоянии; наличие разветвленной корневой системы; наличие водно-коллоидных связей коагуляционного типа; значительное изменение механических свойств при искусственном нарушении структуры и др.

Наличие в структуре таких грунтов связей коагуляционного типа предопределяет реологический характер их поведения. При оценке механических свойств слабых грунтов первостепенное значение имеет учет фактора времени, т. е. механические свойства слабых грунтов имеют явно реологический характер. Этот фактор проявляется как в величине и характере сжатия слабого грунта, так и в его сопротивляемости сдвигу.

Как показывают исследования В.А. Флорина [1], деформируемость дисперсных грунтов во времени вполне описывается линейной теорией наследственной ползучести Больцмана-Вольтерры. Согласно данной теории, в самом общем случае связь между напряжениями и деформациями описывается выражением

$$\varepsilon(t)=\frac{1}{E}\left[\sigma(t)+\int_0^t K(t-\tau)\sigma(\tau)d\tau\right], \qquad (1)$$

где $\varepsilon(t)$ - относительная деформация; σ - напряжение; E - модуль упругости; $K(t-\tau)$ - ядро ползучести, или ядро интегрального уравнения, представляющего функцию влияния напряжений $\sigma(\tau)$ в момент времени τ на деформацию в момент времени t; t - время наблюдения; τ - время, предшествующее моменту наблюдения.

Ядро ползучести $K(t-\tau)$ имеет вид [2]

$$K(t-\tau)=\delta e^{-\beta(t-\tau)}, \qquad (2)$$

где δ и β - параметры, которые определяются по опытным кривым ползучести.

В общем случае решение интегрального уравнения (1) относительно напряжения $\sigma(\tau)$ имеет вид

$$\sigma(t)=E_0\left[\varepsilon(t)-\int_0^t R(t-\tau)\varepsilon(\tau)d\tau\right], \qquad (3)$$

где E_0 - общий модуль деформации; $R(t-\tau)$ - резольвента интегрального уравнения (1), или ядро релаксации, которое имеет вид

$$R(t-\tau)=\delta e^{-(\delta+\beta)(t-\tau)}. \qquad (4)$$

Материалы, для которых зависимость между деформациями и напряжениями записывается уравнениями (1) и (3), называют вязкоупругими.

В дальнейшем грунтовое полупространство в лесном массиве будем рассматривать как квазиоднородное вязкоупругое полупространство (рис.1).

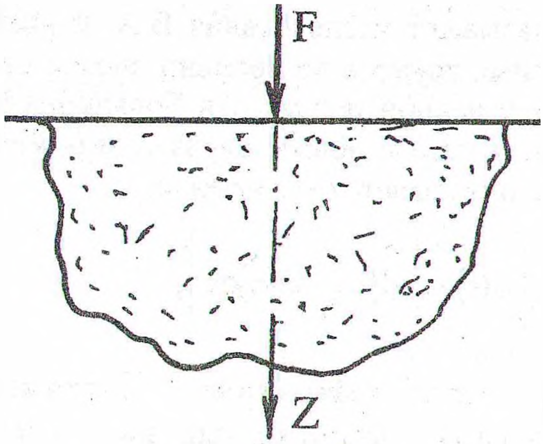

Рис.1. Расчетная схема

Определение напряжений и перемещений, возникающих в полупространстве (рис. 1) от сосредоточенной силы F, будем искать в цилиндрической системе координат (осесимметричная задача) через функцию напряжений $\varphi=\varphi\ (r,\ z)$, с которой напряжения и перемещения связаны зависимостями:

$$\sigma_r = \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu\nabla^2\varphi - \frac{\partial^2\varphi}{\partial r^2}\right),$$

$$\sigma_\theta = \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu\nabla^2\varphi - \frac{1}{r}\frac{\partial\varphi}{\partial r}\right),$$

$$\sigma_z = \frac{\partial}{\partial z}\left((2-\mu)\nabla^2\varphi - \frac{\partial^2\varphi}{\partial z^2}\right),$$

$$\tau_{rz} = \frac{\partial}{\partial z}\left((1-\mu)\nabla^2\varphi - \frac{\partial^2\varphi}{\partial z^2}\right),$$

$$U = -\frac{1+\mu}{E_0}\frac{\partial^2\varphi}{\partial r\partial z} - \frac{1+\mu}{E_0}\int_0^t \frac{\partial^2\varphi}{\partial r\partial z}K(t-\tau)d\tau, \qquad (5)$$

$$W=\frac{1+\mu}{E_0}\left(2(1-\mu)\nabla^2\varphi-\frac{\partial^2\varphi}{\partial z^2}\right)+$$
$$+\frac{1+\mu}{E_0}\int_0^t\left(2(1-\mu)\nabla^2\varphi-\frac{\partial^2\varphi}{\partial z^2}\right)K(t-\tau)d\tau \quad (6)$$

где σ_r, σ_z, σ_θ - нормальные напряжения, действующие соответственно по площадкам, перпендикулярным осям r и z и касательной к окружности радиуса r; $\tau_{r,z}$ - касательные напряжения в плоскости rz; U - горизонтальное перемещение по оси r; W - вертикальное перемещение по оси z; ∇^2 - оператор Лапласа, который в цилиндрической системе координат имеет вид

$$\nabla^2=\frac{\partial}{\partial r^2}+\frac{\partial}{\partial z^2}+\frac{1}{2}\frac{\partial}{\partial r}. \quad (7)$$

В качестве функции напряжений примем функцию, которая удовлетворяет бигармоническому уравнению $\nabla^2(\nabla^2\varphi)=0$.

$$\varphi=CR+B(z\ln(R+z)-R), \quad (8)$$

где $R=\sqrt{r^2+z^2}$; B, C - постоянные, определяемые при z = 0; R = z; $\tau_{rz}=0$.

Подставляя функцию напряжений φ в уравнения (6), получим:

$$\sigma_r=C\left(\frac{z}{R^3}-3\frac{r^2z}{R^5}\right)-2C\mu\frac{z}{R^3}+B\left(\frac{1}{R(R+z)}-\frac{z}{R^3}\right), \quad (9)$$

$$\sigma_\theta=2(1-\mu)C\frac{z}{R^3}-B\frac{1}{R(R+z)}-C\frac{z}{R^3},$$

$$\sigma_z=3C\frac{r^2z}{R^5}-2(2-\mu)C\frac{z}{R^3}+B\frac{z}{R^3},$$

$$\tau_{rz}=3C\frac{r^3}{R^5}-2C\frac{r}{R^3}-2C(1-\mu)\frac{r}{R^3}+B\frac{r}{R^3}.$$

Значения постоянных С и В определяются по формулам:

$$C = \frac{F}{2\pi}; \qquad (10)$$

$$B = \frac{F}{2\pi}(1-2\mu). \qquad (11)$$

Подставляя постоянные С и В в уравнение (9), получим

$$\sigma_r = \frac{F}{2\pi R^2}\left((1-2\mu)\frac{R}{R+z} - 3\frac{r^2 z}{R^3}\right), \qquad (12)$$

$$\sigma_\theta = \frac{F(1-2\mu)}{2\pi R^2}\left(\frac{z}{R} - \frac{R}{R+z}\right),$$

$$\sigma_z = \frac{3F}{2\pi}\frac{z^3}{R^5},$$

$$\tau_{rz} = -\frac{3F}{2\pi}\frac{rz^2}{R^5}.$$

Если подставить значения функции и постоянные С и В в два последних уравнения системы (6) и принять ядро ползучести в виде экспоненты (2), которое при постоянной нагрузке будет иметь вид

$$K(\tau) = \delta_0 e^{-\beta_0 \tau},$$

после некоторых преобразований получим:

$$U = \frac{F(1+\mu)}{2\pi E_0 R}\left(\frac{rz}{R^2} - (1-2\mu)\frac{r}{R+z}\right)\left(1 + \frac{\delta_0}{\beta_0}\left(1 - e^{-\beta_0 t}\right)\right); \qquad (13)$$

$$W = \frac{F(1+\mu)}{2\pi E_0 R}\left(\frac{z^2}{R^2} + 2(1-\mu)\right)\left(1 + \frac{\delta_0}{\beta_0}\left(1 - e^{-\beta_0 t}\right)\right), \qquad (14)$$

где δ_0, β_0 - постоянные, определяемые из опытов на ползучесть.

Перемещения на поверхности грунта при z = 0 и R = z будут равны:

$$U = -\frac{F(1+\mu)(1-2\mu)}{2\pi E_0 r}\left(1+\frac{\delta_0}{\beta_0}\left(1-e^{-\beta_0 t}\right)\right), \tag{15}$$

$$W = \frac{F\left(1-\mu^2\right)}{\pi E_0 r}\left(1+\frac{\delta_0}{\beta_0}\left(1-e^{-\beta_0 t}\right)\right). \tag{16}$$

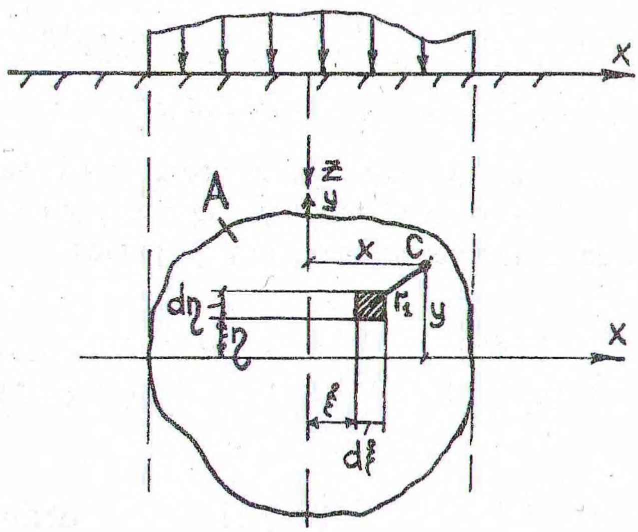

Рис. 2. Распределение нагрузки

Анализ формул (12, 15 и 16) показывает, что напряжения и перемещения в точке приложения силы F становятся бесконечно большими. Но силы, как правило, прикладываются не в точке, а передаются через какую-либо площадку. Решение в этом случае может быть получено на основании принципа суперпозиции из рассматриваемой задачи.

Учитывая то, что нагрузка от колесных и гусеничных движителей передается на грунт через площадку, рассмотрим задачу, когда на плоскость, ограничивающую полупространство, действует сплошная нагрузка, распределенная на некоторой площади A (рис. 2).

Выделим элементарную площадку $dA = d\xi d\eta$. Силу, действующую на нее, будем считать сосредоточенной и равной $dF = qdA = qd\xi d\eta$. Перемещение данной поверхности полупространства от силы dF в некоторой точке $C(x, y)$, расположенной внутри загруженной площади, можно определить по формулам (15 и 16), заменяя r на $r_1 = \sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2}$, а чтобы получить перемещение точки C (x, y) от действия сплошной нагрузки по всей площади A, необходимо проинтегрировать по площади A. Тогда получим:

$$U = -\frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{2\pi E_0}\left(1+\frac{\delta_0}{\beta_0}\left(1-e^{-\beta_0 t}\right)\right)\iint\limits_A \frac{qd\xi d\eta}{\sqrt{(x-\xi)^2+(y-\eta)^2}},$$

$$W = \frac{1-\mu^2}{\pi E_0}\left(1+\frac{\delta_0}{\beta_0}\left(1-e^{-\beta_0 t}\right)\right)\iint\limits_A \frac{qd\xi d\eta}{\sqrt{(x-\xi)^2+(y-\eta)^2}}. \qquad (17)$$

Для колесных движителей будем считать, что нагрузка q распределена равномерно по всей площади круга, равновеликого отпечатку следа колеса. Тогда перемещения будут равны:

$$U = -\frac{q(1+\mu)(1-2\mu)}{2\pi E_0}\left(1+\frac{\delta_0}{\beta_0}\left(1-e^{-\beta_0 t}\right)\right)\iint\limits_A \frac{d\xi d\eta}{\sqrt{(x-\xi)^2+(y-\eta)^2}},$$

$$W = \frac{q\left(1-\mu^2\right)}{\pi E_0}\left(1+\frac{\delta_0}{\beta_0}\left(1-e^{-\beta_0 t}\right)\right)\iint\limits_A \frac{d\xi d\eta}{\sqrt{(x-\xi)^2+(y-\eta)^2}}. \qquad (18)$$

Интегралы, входящие в формулы (18)

$$J = \iint\limits_A \frac{d\xi d\eta}{\sqrt{(x-\xi)^2+(y-\eta)^2}}, \qquad (19)$$

зависят только от геометрической формы площади A, по которой распределена нагрузка.

Если нагрузка распределена по площади круга, как для колесных движителей, то интеграл (19) не выражается через элементарные функции, а сводится к виду [3]

$$J = 4\int_{0}^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{a^{r} - r^{2}\sin^{2}\varphi}\,d\varphi, \tag{20}$$

где a - радиус круга;

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}.$$

Интеграл, входящий в (20), можно вычислить по таблицам эллиптических интегралов.

Для гусеничных движителей нагрузка распределена по площади прямоугольника шириной b и длиной l и интеграл (19) поэтому не выражается через элементарные функции. При определении перемещений его можно найти численными методами для различных отношений l/b.

Результаты вычислений [2] приведены в таблице.

Таблица

Значение отношения J/b при определении перемещений

Отношение сторон l/b	В угловых точках прямоугольника	В центре прямоугольника	Среднего значения перемещения	При загружении абсолютно жестким штампом
1	1,759	3,518	2,984	2,765
2	2,403	4,806	4,084	3,833
3	2,796	5,592	4,806	4,524
4	3,079	6,158	5,341	5,058
5	3,298	6,596	5,749	5,403
10	3,974	7,948	7,068	6,660
круг	2,000	π	2,670	2,482

Подставляя значение интеграла J из таблицы в формулы (18), получим перемещения соответствующих точек прямоугольной площадки (отпечатка гусеницы) загружения, выраженные через ее ширину b.

Так, при прямоугольной площадке загружения с соотношением сторон l / b = 10 для перемещений в центре ее получим:

$$U = -7{,}948\frac{qb(1+\mu)(1-2\mu)}{2\pi E_0}\left(1+\frac{\delta_0}{\beta_0}\left(1-e^{-\beta_0 t}\right)\right),$$

$$W = 7{,}948\frac{qb\left(1-\mu^2\right)}{\pi E_0}\left(1+\frac{\delta_0}{\beta_0}\left(1-e^{-\beta_0 t}\right)\right).$$

Таким образом, пользуясь формулами (18), можно определить полные (общие), возникающие при нагружении перемещения, которые будут включать в себя как упругие, так и остаточные деформации. Причем остаточные деформации будут в грунтах существенно больше упругих.

ЛИТЕРАТУРА

1. Флорин В.А. Основы механики грунтов. Т. I и II. - М.: Госстройиздат, 1959, 1961.
2. Цытович Н.А. Механика грунтов. - М.: Высшая школа, 1973.
3. Безухов Н.И. Основы теории упругости, пластичности и ползучести. - М.: Высшая школа, 1968.

УДК 630^{x}

Н. П. Вырко, профессор

РАЗВИТИЕ ДОРОЖНО-ТРАНСПОРТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА КАФЕДРЕ ТРАНСПОРТА ЛЕСА

In this article a looking the questions about development road-transport researches on department forestry transport.

Транспорт леса является одной из основных фаз лесозаготовительного производства. В настоящее время для вывозки леса и его продуктов используется более 113 тыс. км транспортных путей, из которых только 17,5 тыс. км круглогодового действия, или 0,257 км на 100 га покрытой лесом площади, что является недостаточным для интенсивного ведения лесного хозяйства. Для удовлетворения этих потребностей необходимо иметь 0,432 км на 100 га. Чтобы достичь такой густоты дорожной сети, по данным Минлесхоза, необходимо построить более 12 тыс. км, которая в соответствии с планом развития лесного комплекса может быть достигнута к 2015 году.