ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
№ 3 ЛЕСНОЙ ЖУРНАЛ 2000

ЛЕСОЭКСПЛУАТАЦИЯ

УДК 630*114:625.711.84

А.С. ФЕДОРЕНЧИК, С.С. МАКАРЕВИЧ, Н.П. ВЫРКО

Белорусский государственный технический университет

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 более 90 печатных работ по вопросам ресурсосберегающих и экологически чистых технологий заготовки древесины при рубках главного и промежуточного пользования, совместимости лесной техники с окружающей средой, лесного образования.

Вырко Николай Павлович родился в 1935 г., окончил в 1962 г. Белорусский технологический институт, кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой транспорта леса Белорусского государственного технологического университета. Имеет более 130 печатных работ по проблемам обеспечения круглогодовой работы лесовозного автотранспорта на вывозке заготовленного леса, совершенствования методов расчета, проектирования и способов строительства лесных автомобильных дорог.

ДЕФОРМАЦИЯ ЛЕСНЫХ ПОЧВ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ КОЛЕСНЫХ И ГУСЕНИЧНЫХ ДВИЖИТЕЛЕЙ

Приведены результаты теоретических исследований напряженно-деформированного состояния лесных почв под воздействием колесных и гусеничных движителей, как упруговязкого полупространства.

The results of theoretical studies are presented related to the strain-and-deformational state of the forest soils under the influence of wheeled and tracked skidders as elastic-and-frictional half-space.

С внедрением тяжелых лесотранспортных машин на лесосечных работах большую актуальность приобретает вопрос о совместимости лесных

машин с лесной средой. Воздействуя на лесную почву, уплотняя ее в колее, колесные и гусеничные движители вызывают изменения физико-механических и биологических свойств лесных почвогрунтов, что затрудняет естественное лесовозобновление. В связи с этим необходимо разработать методику, нормативы и требования, ограничивающие степень повреждения лесной почвы и обеспечивающие устойчивое функционирование лесов.

Лесные почвы относят к слабым грунтам. Для них характерны высокая дисперсность, влажность и пористость в природном состоянии, разветвленная корневая система, водно-коллоидные связи 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 фактор времени, который проявляется как в величине и характере сжатия грунта, так и в его сопротивляемости сдвигу.

Исследования В.А. Флорина [2] показали, что деформируемость дисперсных грунтов во времени вполне описывается линейной теорией наследственной ползучести Больцмана – Вольтерра. В самом общем случае имеем

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

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 [3]

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

где δ, 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,

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

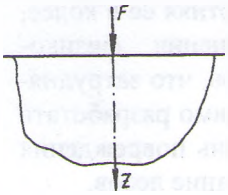

Рис.1

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)

Определение напряжений и перемещений, возникающих в полупространстве 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

$$\left.\begin{aligned}
\sigma_r &= \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu\nabla^2\varphi - \frac{\partial^2\varphi}{\partial r^2}\right);\\
\sigma_\Theta &= \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu\nabla^2\varphi - \frac{1}{r}\frac{\partial\varphi}{\partial r}\right);\\
\sigma_z &= \frac{\partial}{\partial z}\left[(2-\mu)\nabla^2\varphi - \frac{\partial^2\varphi}{\partial z^2}\right];\\
\tau_{rz} &= \frac{\partial}{\partial z}\left[(1-\mu)\nabla^2\varphi - \frac{\partial^2\varphi}{\partial z^2}\right];\\
U &= -\frac{1+\mu}{E_0}\frac{\partial^2\varphi}{\partial r\partial z} - \frac{1+\mu}{E_0}\int_0^t \frac{\partial^2\varphi}{\partial r\partial z}K(t-\tau)d\tau;\\
W &= \frac{1+\mu}{E_0}\left[2(1-\mu)\nabla^2\varphi - \frac{\partial^2\varphi}{\partial z^2}\right] + \frac{1+\mu}{E_0}\int_0^t\left[2(1-\mu)\nabla^2\varphi - \frac{\partial^2\varphi}{\partial z^2}\right]K(t-\tau)d\tau,
\end{aligned}\right\} \quad (5)$$

где σ_r, σ_z, σ_Θ – нормальные напряжения, действующие соответственно по площадкам, перпендикулярным осям r и z и касательной к окружности радиуса r;

τ_{rz} – касательные напряжения в плоскости rz;

U – горизонтальное перемещение r;

W – вертикальное перемещение по оси z;

μ – коэффициент Пуассона;

∇^2 – оператор Лапласа, который в цилиндрической системе координат имеет вид

$$\nabla^2 = \frac{\partial}{\partial r^2} + \frac{\partial}{\partial z^2} + \frac{1}{2}\frac{\partial}{\partial r}. \quad (6)$$

В качестве функции напряжений примем функцию φ, удовлетворяющую бигармоническому уравнению $\nabla^2(\nabla^2\varphi) = 0$:

$$\varphi = CR + B\,[z\ln(R+z) - R], \quad (7)$$

где $R = \sqrt{r^2 + z^2}$;

B, C – постоянные, определяемые при $z = 0$; $R = r$; $\tau_{rz} = 0$.

Подставляя функцию напряжений φ в уравнения (5), получаем

$$\left.\begin{aligned}
\sigma_r &= C\left(\frac{z}{R^3}-3\frac{r^2 z}{R^5}\right)-2C\mu\frac{z}{R^3}+B\left[\frac{1}{R(R+z)}-\frac{z}{R^3}\right];\\
\sigma_\Theta &= 2(1-\mu)C\frac{z}{R^3}-B\frac{1}{R(R+z)}-C\frac{z}{R^3};\\
\sigma_z &= 3C\frac{r^2 z}{R^5}-2(2-\mu)C\frac{z}{R^3}+B\frac{z}{R^3};\\
\tau_{rz} &= 3C\frac{r^3}{R^5}-2C\frac{z}{R^3}-2C(1-\mu)\frac{r}{R^3}+B\frac{r}{R^3}.
\end{aligned}\right\} \tag{8}$$

Значения постоянных C и B определяют по формулам

$$C=\frac{F}{2\pi}; \tag{9}$$

$$B=\frac{F}{2\pi}(1-2\mu). \tag{10}$$

Подставляя выражения для C и B в уравнения (8), находим

$$\left.\begin{aligned}
\sigma_r &= \frac{F}{2\pi R^2}\left[(1-2\mu)\frac{R}{R+z}-3\frac{r^2 z}{R^3}\right];\\
\sigma_\Theta &= \frac{F(1-2\mu)}{2\pi R^2}\left(\frac{z}{R}-\frac{R}{R+z}\right);\\
\sigma_z &= \frac{3F}{2\pi}\frac{z^3}{R^5};\\
\tau_{rz} &= -\frac{3F}{2\pi}\frac{rz^2}{R^5}.
\end{aligned}\right\} \tag{11}$$

Если значения функции и постоянные C и B подставить в два последних уравнения системы (5) и принять ядро ползучести в виде экспоненты (2), которое при постоянной нагрузке имеет вид $K(\tau) = \delta_0 e^{-\beta_0\tau}$, после некоторых преобразований получим

$$U=-\frac{F(1+\mu)}{2\pi E_0 R}\left[\frac{rz}{R^2}-(1-2\mu)\frac{r}{R+z}\right]\left[1+\frac{\delta_0}{\beta_0}\left(1-e^{-\beta_0 t}\right)\right]; \tag{12}$$

$$W=\frac{F(1+\mu)}{2\pi E_0 R}\left[\frac{z^2}{R^2}+2(1-\mu)\right]\left[1+\frac{\delta_0}{\beta_0}\left(1-e^{-\beta_0 t}\right)\right], \tag{13}$$

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

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

$$U=-\frac{F(1+\mu)(1-2\mu)}{2\pi E_0 r}\left[1+\frac{\delta_0}{\beta_0}\left(1-e^{-\beta_0 t}\right)\right]; \tag{14}$$

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

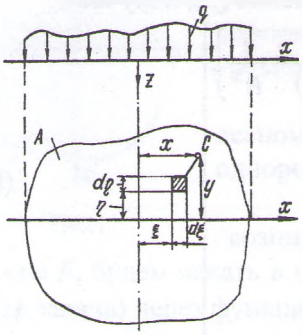

Рис. 2

Анализ формул (11), (14) и (15) 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 (14) и (15), заменяя r на $r_1 = \sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2}$. Чтобы найти перемещение точки $C(x, y)$ от действия сплошной нагрузки по всей площади A, необходимо проинтегрировать их по площади A. Тогда получим

$$\left.\begin{aligned} U &= -\frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{2\pi E_0}\left[1+\frac{\delta_0}{\beta_0}\left(1-e^{-\beta_0 t}\right)\right]\iint\limits_A \frac{q d\xi d\eta}{\sqrt{(x-\xi)^2+(y-\eta)^2}}; \\ W &= \frac{1-\mu^2}{\pi E_0}\left[1+\frac{\delta_0}{\beta_0}\left(1-e^{-\beta_0 t}\right)\right]\iint\limits_A \frac{q d\xi d\eta}{\sqrt{(x-\xi)^2+(y-\eta)^2}}. \end{aligned}\right\} \quad (16)$$

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

$$\left.\begin{aligned} U &= -\frac{q(1+\mu)(1-2\mu)}{2\pi E_0}\left[1+\frac{\delta_0}{\beta_0}\left(1-e^{-\beta_0 t}\right)\right]\iint\limits_A \frac{d\xi d\eta}{\sqrt{(x-\xi)^2+(y-\eta)^2}}; \\ W &= \frac{q\left(1-\mu^2\right)}{\pi E_0}\left[1+\frac{\delta_0}{\beta_0}\left(1-e^{-\beta_0 t}\right)\right]\iint\limits_A \frac{d\xi d\eta}{\sqrt{(x-\xi)^2+(y-\eta)^2}}. \end{aligned}\right\} \quad (17)$$

Интегралы, входящие в формулы (17):

$$I = \iint\limits_A \frac{d\xi d\eta}{\sqrt{(x-\xi)^2+(y-\eta)^2}}, \quad (18)$$

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

Отношение сторон l/b	Значение отношения I/b при определении перемещений			
	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	6,596	7,068	6,660
-	2,000	Круг π	2,670	2,482

Если нагрузка распределена по площади круга, как для колесных движителей, то интеграл (18) не выражается через элементарные функции, а сводится к виду [1]

$$I = 4\int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{a^r - r^2 \sin^2 \varphi}\ d\varphi\,, \tag{19}$$

где a – радиус круга;

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

Интеграл, входящий в уравнение (19), можно вычислить по таблицам эллиптических интегралов.

Для гусеничных движителей нагрузка распределена по площади прямоугольника шириной b и длиной l, поэтому интеграл (18) не выражается через элементарные функции. При определении перемещений его можно вычислить численными методами для различных отношений l/b. Результаты вычислений [3] приведены в таблице.

Подставляя значение интеграла I из таблицы в формулы (17), получаем 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 площадки имеем

$$\left.\begin{aligned} U &= -7{,}948\frac{qb(1+\mu)(1-2\mu)}{2\pi E_0}\left[1+\frac{\delta_0}{\beta_0}\left(1-e^{-\beta_0 l}\right)\right]; \\ W &= 7{,}948\frac{qb\left(1-\mu^2\right)}{\pi E_0}\left[1+\frac{\delta_0}{\beta_0}\left(1-e^{-\beta_0 l}\right)\right]. \end{aligned}\right\} \tag{20}$$

Таким образом, разработана модель, позволяющая описывать деформацию лесных почв с учетом их вязкоупругих свойств, а пользуясь формулами (17), можно определить полные (общие) перемещения, возникающие при нагружении. Они будут включать в себя как упругие, так и остаточные деформации, причем остаточные существенно больше упругих.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1]. Безухов Н.И. Основы теории упругости, пластичности и ползучести. - М.: Высш. шк., 1968. - 512 с. [2]. Флорин В.А. Основы механики грунтов. Т. 1 и 2. - М.: Госстройиздат, 1959, 1961. [3]. Цытович Н.А. Механика грунтов. - М.: Высш. шк., 1973. - 280 с.

Поступила 11 ноября 1998 г.

УДК 539.384:621.86.063.2

Д.Г. ШИМКОВИЧ

Московский государственный университет леса

Шимкович Дмитрий Григорьевич родился в 1952 г., окончил в 1976 г. Московское высшее техническое училище им. Н.Э. Баумана, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры теории и конструирования машин Московского государственного университета леса. Имеет около 60 печатных трудов в области механики, многокритериальной оптимизации, проектирования лесозаготовительного оборудования.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРИВОДНЫХ ГРЕЙФЕРОВ ДЛЯ КРУГЛЫХ ЛЕСОМАТЕРИАЛОВ

Изложены основные расчетные соотношения математической модели приводного грейфера для круглых лесоматериалов; дана постановка многокритериальной задачи оптимизации его параметров. Приведены некоторые результаты оптимизационных расчетов, их сравнение с экспериментальными данными и параметрами существующих грейферов.

The main estimated ratios of the mathematical model of power grapple for roundwood is presented; the multicriteria optimization task of its parameters is set forth. Some results of optimization estimations are given as well as their comparison with experimental data and parameters of current grapples.

Вопросам выбора рациональных параметров грейферных механизмов посвящено большое количество работ [1–6, 14 и др.].

Можно выделить следующие основные взаимосвязанные задачи оптимизации: формы челюстей грейфера; геометрических и кинематических параметров механизма; размещения масс конструкции грейфера. Определяющей является задача оптимизации формы челюстей.