

## ЛИТЕРАТУРА

1. Филоненко-Бородич М.М. Некоторые приближенные теории упругого основания // Ученые записки МГУ. Вып. 46. Механика. –М.: МГУ, 1940. С. 3–18.
2. Казарновский В.Д., Брантман Б.П. К расчету требуемой толщины насыпного слоя в конструкции временной дороги на слабых грунтах, включающей армирующую прослойку из СТМ // Синтетические текстильные материалы в конструкциях автомобильных дорог. Труды Союздорнии. –М., 1983. С. 25–37.
3. Синтетические текстильные материалы в транспортном строительстве / Под ред. В.Д. Казарновского.–М.: Транспорт, 1984.
4. Алексеев С.А. Основы общей теории мягких оболочек // Расчет транспортных конструкций. –М., 1966.
5. Трибунский В.М. Изолирующие прослойки лесовозных дорог. – М.: Лесная промышленность, 1986.
6. Лыщик П.А., Немцов В.Б., Гармаза А.К. Теоретические основы определения прочности дорожного геотекстиля // Труды БГТУ. Сер. лесн. и деревообр. пром-сти. 2001. Вып. IX. С. 87–95.
7. Прохоров Г.В., Леденев М.А., Колбеев В.В. Пакет символьных вычислений Maple V. –М., 2000.

УДК 625.630

Н.П. Вырко, профессор; И.И. Тумашик, ассистент; С.В. Ярмолик, ассистент

**ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ  
ПРИ РАСЧЕТЕ ПРОЧНОСТИ НЕЖЕСТКИХ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД  
ЛЕСОВОЗНЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ**

In this article considered questions on deforming the road designs and calculation of toughness of unhard road cloths of forest car roads. Presented mathematical dependences on calculation of value to remaining deformation.

При своем продольном перемещении колесо автопоезда воздействует на покрытие дорожной одежды через опорную поверхность, имеющую диаметр, равный диаметру отпечатка. Под воздействием нагрузки в слоях дорожной одежды и грунте основания возникают зоны растяжения, сжатия и сдвига. Это приводит к смещению и перераспределению грунтовых частиц друг относительно друга и последующему образованию колеи (рисунок).

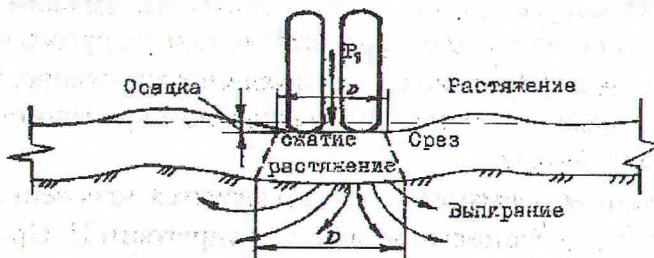


Рис. Деформация дорожной конструкции под действием нагрузки

В связи с этим возникает необходимость в исследовании распределения напряжений и образования деформаций дорожной конструкции. Чаще всего на лесовозных дорогах устраивают дорожные одежды с гравийным покрытием или покрытиями из местных укрепленных или неукрепленных материалов (грунтов). При действии внешних нагрузок в грунтах возникают значительные пластические области. В данном случае напряжение сдвига больше сопротивления грунта сдвигу, т. е. могут возникать не только упругие, но и остаточные деформации. Поэтому для грунтов в большинстве случаев не соблюдается линейная зависимость между напряжениями и деформациями, т. е. закон Гука неприменим.

Анализ исследований, проведенных в этом направлении, показывает, что наиболее общей, описывающей упруговязкие свойства материалов, является линейная теория наследственной ползучести Больцмана–Вольтерры, согласно которой связь между напряжениями и деформациями выражается следующим образом:

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

где  $\varepsilon(t)$  – относительная деформация;  $E$  – модуль упругости;  $\sigma(\tau)$  – напряжение;  $K(t-\tau)$  – ядро интегрального уравнения, которое представляет в данном случае функцию влияния напряжений  $\sigma(\tau)$  в момент времени  $\tau$  на деформацию в момент времени  $t$ ;  $t$  – время наблюдения;  $\tau$  – время, предшествующее моменту наблюдения.

Дорожные одежды, как правило, являются многослойными. Поэтому определение напряжений и деформаций вызывает трудности, в связи с чем возникает необходимость приведения многослойной вязкоупругой дорожной конструкции к двухслойной расчетной модели. Для этого может быть использована расчетная схема, предложенная Б.И. Коганом для упругой многослойной дорожной конструкции. Приведение многослойной дорожной конструкции к двухслойной производится последовательно снизу вверх, а эквивалентный модуль деформации или упругости нижнего приведенного слоя определяется по формуле

$$E_{\text{экр}(i)} = E_{i-1} + B \frac{h_i}{D} E_i, \quad (2)$$

где  $E_{i-1}$  – модуль упругости (деформации) основания;  $B$  – коэффициент, равный 0,25 – 0,30;  $h_i$  – толщина  $i$ -го слоя;  $E_i$  – модуль упругости (деформации) вышележащего  $i$ -го слоя;  $D$  – диаметр круга, равновеликого по площади отпечатку следа колеса расчетного автомобиля.

Учитывая, что большинство дорожно-строительных материалов являются вязкоупругими, то, кроме модулей деформации и упругости, должны быть известны вязкоупругие характеристики материалов. При сжатии вязкоупругого материала постоянным напряжением  $\sigma$ , кроме деформаций  $\varepsilon_0$ , возникающих мгновенно, развиваются деформации во времени, которые при достаточно длительном времени стабилизируются и достигают некоторой величины  $\varepsilon_\infty$ .

При нагружении деформация  $\varepsilon_0$  характеризуется мгновенным модулем деформации  $E$ , а деформация  $\varepsilon_\infty$  – длительным модулем упругости  $N$ . При разгрузке получается обратный процесс: деформация  $\varepsilon_0^*$  будет характеризоваться мгновенным модулем упругости  $E^*$ , а деформация  $\varepsilon_\infty^*$  – длительным модулем деформации  $N^*$ .

Определив мгновенный  $E$  и длительный модуль деформации  $H$  (упругости), найдем деформацию, соответствующую времени релаксации:

при нагружении

$$\varepsilon(t_n) = \frac{\sigma}{H} - \left( \frac{\sigma}{H} - \frac{\sigma}{E} \right) e^{-1};$$

при разгрузке

$$\varepsilon(t_n^*) = \frac{\sigma}{H^*} - \left( \frac{\sigma}{H^*} - \frac{\sigma}{E^*} \right) e^{-1}. \quad (3)$$

Время, соответствующее времени релаксации для эквивалентного слоя, можно определить как среднюю величину

$$t_{n(\text{э})} = \frac{\sum_{i=1}^k t_{n(i)}}{k}; \quad t_{n(\text{экв})}^* = \frac{\sum_{i=1}^k t_{n(i)}^*}{k}, \quad (4)$$

где  $k$  – число всех слоев, приводящихся к эквивалентному.

Время релаксации эквивалентного слоя определяется по формуле

при нагружении

$$n_{\text{экв}} = \frac{H_{\text{экв}}}{E_{\text{экв}}} \cdot t_{n(\text{экв})};$$

при разгрузке

$$n_{\text{экв}}^* = \frac{H_{\text{экв}}^*}{E_{\text{экв}}^*} \cdot t_{n(\text{экв})}^*. \quad (5)$$

Если перейти к параметрам уравнения Больцмана–Вольтерры, для эквивалентного слоя при экспоненциальном ядре ползучести будем иметь:

при нагружении

$$\delta_{\text{э}} = \frac{E_{\text{экв}} - H_{\text{экв}}}{E_{\text{экв}} \cdot n_{\text{экв}}};$$

при разгрузке

$$\delta_{\text{э}}^* = \frac{E_{\text{экв}}^* - H_{\text{экв}}^*}{E_{\text{экв}}^* \cdot n_{\text{экв}}^*}; \quad (6)$$

$$\beta_{\text{э}} = \frac{1}{t_{n(\text{экв})}};$$

$$\beta_{\text{э}}^* = \frac{1}{t_{n(\text{экв})}^*}. \quad (7)$$

Прогиб двухслойной конструкции  $W$  по центру давления колеса автомобиля при нагружении определяется по формуле

$$\begin{aligned} W = W_2 = & -\frac{1+\mu_2}{E_2 h^2} \int_0^{\infty} \{A(t) + B(t)[2(1-\mu_2) - \alpha]\} \alpha^2 d\alpha + \frac{1+\mu_2}{E_2 h^2} \int_0^t \{C_2(t) \times \\ & \times [(1+2\mu_2)\lambda_1^* - \alpha\lambda_2^*] - D_2(t)[2(1-\mu_2)\lambda_2^* - \alpha\lambda_1^*]\} \alpha^2 d\alpha - \frac{1+\mu_2}{E_2 h^2} \int_0^t \int_0^{\infty} \{A(t) + \\ & + B(t)[2(1-\mu_2) - \alpha]\} \alpha^2 \delta_2 e^{-\beta_2 t} d\alpha dt + \frac{1+\mu_2}{E_2 h^2} \int_0^t \int_0^{\infty} \{C_2(t)[(1-2\mu_2)\lambda_1^* - \alpha\lambda_2^*] - \\ & - D_2(t)[2(1-\mu_2)\lambda_2^* - \alpha\lambda_1^*]\} \alpha^2 \delta_2 e^{-\beta_2 t} d\alpha dt, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $t_1 = \frac{D}{v}$  – время, в течение которого нагрузка  $q$  находится над данной точкой;

$v$  – скорость движения автомобиля.

После того как колесо автомобиля уходит с данной точки, происходит разгрузка поверхности дороги, которая восстанавливается на величину

$$\begin{aligned}
 W^* = & -\frac{1-\mu_2}{E_2^* h^2} \int_0^\infty \{A(t)+B(t)[2(1-\mu_2)-\alpha]\} \alpha^2 d\alpha + \frac{1+\mu_2}{E_2^* h^2} \int_0^\infty \{C_2(t)[(1-2\mu_2)\lambda_1^* - \\
 & -\alpha\lambda_2^*] - D_2(t)[2(1-\mu_2)\lambda_2^* - \alpha\lambda_1^*]\} \alpha^2 d\alpha - \frac{1+\mu_2}{E_2^* h^2} \int_0^{t_2} \int_0^\infty \{A(t)+B(t)[2(1-\mu_2)-\alpha]\} \times \\
 & \times \alpha^2 \delta_2^* e^{-\beta_2^* t} d\alpha dt + \frac{1+\mu_2}{E_2^* h^2} \int_0^{t_2} \int_0^\infty \{C_2(t)[(1-2\mu_2)\lambda_1^* - \alpha\lambda_2^*] - D_2(t)[2(1-\mu_2)\lambda_2^* - \\
 & -\alpha\lambda_1^*]\} \alpha^2 \delta_2^* e^{-\beta_2^* t} d\alpha dt,
 \end{aligned} \tag{9}$$

где  $t_2$  – время, в течение которого данная точка дороги не нагружена, но не более времени  $t_1$ .

Таким образом, зная релаксационные характеристики дорожно-строительных материалов, можно определить вертикальные перемещения (прогиб)  $W$  и  $W^*$  приведенной двухслойной конструкции. Разница между  $W$  и  $W^*$  дает величину остаточной деформации  $W_e$ .

Величина мгновенного и длительного модулей упругости оказывает существенное влияние на накопление вязких деформаций. Если мгновенный модуль упругости материала имеет большое значение, то изменение его величины мало влияет на величину накопления вязких деформаций, а при малых модулях упругости даже незначительное изменение его величины очень сильно сказывается на накоплении вязких деформаций. Такая же закономерность наблюдается и при изменении длительного модуля упругости.

Время релаксации также влияет на величину деформации. С увеличением его вязкоупругие деформации значительно уменьшаются. Определив реологические параметры дорожно-строительных материалов, по вышеприведенным зависимостям можно установить прогиб дорожной одежды.