

где $\omega t = \frac{2\pi V}{L} t = \frac{2\pi}{L} x$;

$x = Vt$ — длина пути.

Принтегрировав это выражение, легко убедиться, что работа гармонически изменяющихся составляющих сопротивления движению трактора по неровной дороге равна нулю, тогда:

$$A = P_k L = G_{\text{тр}} f L + \Delta P L. \quad (16)$$

Поскольку совершаемую работу в единицу времени определяет мощность, окончательно можно записать:

$$N_k = G_{\text{тр}} f V + \Delta P V = N_f + \Delta N, \quad (17)$$

где N_k — мощность, подводимая к движителю;
 $G_{\text{тр}} f V = N_f$ — мощность, затрачиваемая на преодоление сопротивления качению трактора по ровной дороге;
 $\Delta P V = \Delta N$ — мощность, затрачиваемая на преодоление сопротивления движению от неровностей дороги.

Энергопотери могут быть также выражены в виде добавочного коэффициента сопротивления движению от неровностей дороги

$$f_d = \frac{\Delta P}{G_{\text{тр}}}. \quad (18)$$

Тогда полные энергозатраты на движение трактора по неровной дороге определяются коэффициентом

$$f_n = f + f_d. \quad (19)$$

Таким образом, в результате теоретического исследования получены аналитические зависимости, позволяющие определить дополнительный расход энергии при движении лесного трактора по неровной дороге для любых условий движения и параметров его динамической системы.

ЛИТЕРАТУРА

- [1]. Андрийчук А. Ф. Исследование влияния неровностей дороги на формирование сопротивления движению лесовозного автопоезда: Дис. ... канд. техн. наук.— Львов, 1977.— 142 с. [2]. Беккер М. Г. Введение в теорию систем местности — машина/ Пер. с англ.— М.: Машиностроение, 1973.— 520 с. [3]. Дмитриев А. А. Теория и расчет нелинейных систем поддресоривания гусеничных машин.— М.: Машиностроение, 1976.— 206 с. [4]. Забавников Н. А. Основы теории транспортных гусеничных машин.— М.: Машиностроение, 1975.— 448 с. [5]. Ковалев Ю. Л. Некоторые вопросы динамики трелевочного трактора ТДТ-60: Дис. ... канд. техн. наук.— Свердловск, 1967.— 128 с. [6]. Костокрыз С. Г. Некоторые вопросы исследования колебаний трелевочного трактора ТДТ-55: Дис. ... канд. техн. наук.— Минск, 1969.— 158 с.

Поступила 24 января 1985 г.

УДК 625.142.212.001.24

УЗКОКОЛЕЙНАЯ ШПАЛА НА УПРУГОМ ПОЛУПРОСТРАНСТВЕ

Н. Н. БУТОРИН, А. П. ЕЛИСЕЕВ

Архангельский лесотехнический институт

Применяемый ныне способ расчета железнодорожных шпал основан на гипотезе постели, согласно которой осадка шпалы в каждой точке пропорциональна интенсивности давления шпалы на основание в

этой точке. Эта гипотеза не подтверждается экспериментами и поэтому подвергается серьезной критике [3, 5].

В результате большого числа циклов нагружения шпалы при проходе поездов способность грунта основания к развитию остаточных деформаций сокращается и по своим механическим свойствам грунт в пределах упрочения приближается к упругому полупространству [5]. Расчет шпалы как балки, лежащей на упругом полупространстве, может дать существенное уточнение по сравнению с гипотезой постели.

Принимаем, что шпала нагружена двумя одинаковыми симметрично расположенными сосредоточенными силами P , передаваемыми от рельсов и лежит на поверхности упругого полупространства в системе координат ξ, η , которое характеризуется модулем упругости E_0 и коэффициентом Пуассона μ . Трением между шпалой и основанием пренебрегаем. Осадка поверхности упругого полупространства в точке с координатами x, y под действием интенсивности давления q описывается равенством [2]

$$z(x, y) = \frac{1 - \mu^2}{\pi E_0} \iint_F \frac{q(\xi, \eta) d\xi d\eta}{\sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2}}. \quad (1)$$

Двойной интеграл вычисляется по площади нижней поверхности шпалы F . Допустим, что интенсивность давления шпалы не изменяется в направлении, перпендикулярном продольной оси шпалы. Тогда

$$q(\xi, \eta) = q(\eta),$$

т. е. шпалу можно рассчитывать как балку на поперечный изгиб, а равенство (1) написать в виде:

$$z(x, y) = \frac{1 - \mu^2}{\pi E_0} \int_F \frac{q(\eta) d\xi d\eta}{\sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2}}. \quad (2)$$

Дифференциальное уравнение изгиба балки на упругом основании имеет вид

$$EI \frac{d^4 W}{dy^4} + q(y) = 0. \quad (3)$$

Здесь EI — жесткость шпалы при изгибе;
 W — прогиб продольной оси шпалы.

Если в некотором интервале значений y интенсивность давления $q(y) < 0$, то $W = z$. В противном случае считаем, что $q(y) = 0$ и $W \neq z$, т. е. шпала на соответствующем участке отрывается от поверхности упругого полупространства.

При симметричности внешней нагрузки условия статического равновесия шпаль

$$b \int_0^{a/2} q(y) dy = P, \quad (4)$$

где b — ширина нижнего основания шпалы;
 a — длина шпалы.

Начало координат располагаем в точке пересечения осей симметрии основания шпалы.

Сечениями, перпендикулярными продольной оси шпалы, разбиваем ее основание на одинаковые клетки размером $b \times h$, где h — шаг разбиения. Полагая, что интенсивность давления q в пределах одной клетки изменяется незначительно, считаем для каждой клетки $q = \text{const}$. Если заменить в каждой клетке интенсивность давления сосредоточенной силой R_j , приложенной в центре клетки, т. е. $q_i = R_j/bh$, где j — порядковый

номер клетки, считая от начала координат, и определять осадку в точках приложения усилий R_j , уравнение (2) можно представить в виде:

$$z_i = \frac{1-\mu_2}{\pi E_0 b h} \sum_{j=1}^N B_{i,j} R_j, \quad (5)$$

где N — число клеток на половине шпалы.

$$B_{i,j} = D_{j-i+1} + D_{i+j}$$

(два слагаемых учитывают две половины шпалы);

$$D_k = \iint \frac{d\xi d\eta}{\sqrt{\xi^2 + (h(k-1/2) - \eta)^2}}, \quad k = 1, 2, \dots, 2N. \quad (6)$$

Двойной интеграл берется по площади k -той клетки. Его можно вычислить, например, используя прием, показанный Н. И. Безуховым [1]:

$$D_1 = 2b \left(\ln(S + \sqrt{1+S^2}) + S \ln \frac{1 + \sqrt{1+S^2}}{S} \right),$$

где $S = h/b$;

$$D_k = b \left(\ln(m + \sqrt{1+m^2}) + m \ln \frac{1 + \sqrt{1+m^2}}{m} \right) - \\ - b \left(\ln(n + \sqrt{1+n^2}) + n \ln \frac{1 + \sqrt{1+n^2}}{n} \right), \quad (k = 2, 3, \dots, 2N),$$

где $m = \frac{2h}{b} \left(k - \frac{1}{2} \right)$; $n = \frac{2h}{b} \left(k + \frac{1}{2} \right)$.

Прогиб шпалы как балки в точках приложения сил рассчитываем методом начальных параметров [4]

$$W_i = W_0 + \frac{h^3}{EI} \left(\left(P \left(\frac{l}{h} + \frac{1}{2} \right) - \sum_{j=1}^N P_j j \right) \left(i - \frac{1}{2} \right)^2 \cdot \frac{1}{2} - \right. \\ \left. - \frac{1}{6} \sum_{j=1}^{i-1} R_j (i-j)^3 + \frac{P}{6} \left(i - \frac{l}{h} - \frac{1}{2} \right)^3 \right), \quad (7)$$

где l — расстояние от начала координат до точки приложения силы P .

Последнее слагаемое в уравнении (7) не учитываем, если $i < \frac{l}{h} + \frac{1}{2}$.

Приравнивая осадку основания (5) и прогиб шпалы (7) ($z_i = W_i$) получаем N линейных алгебраических уравнений. Из равенства (4)

$$\sum_{j=1}^N R_j = P.$$

Теперь система уравнений $N+1$ порядка имеет неизвестными N реакций основания и осадку основания W_0 в начале координат, т. е. в центре шпалы. Система имеет плохую обусловленность. При решении ее на ЭВМ можно использовать метод исключения Гаусса, но все вычисления вести с удвоенной точностью. При этом точность результатов решения получается вполне хорошей.

Если при решении этой системы оказывается, что в некоторых точках в конце шпалы $R_j < 0$, т. е. шпала в этих точках отрывается от основания, следует принять эти реакции равными нулю, убрать уравнения, соответствующие точкам, в которых $Z_i \neq W_i$, и повторить решение.

На рис. 1 представлены результаты решения задачи на ЭВМ для шпалы, нагруженной двумя сосредоточенными силами $P = 20$ кН, с ши-

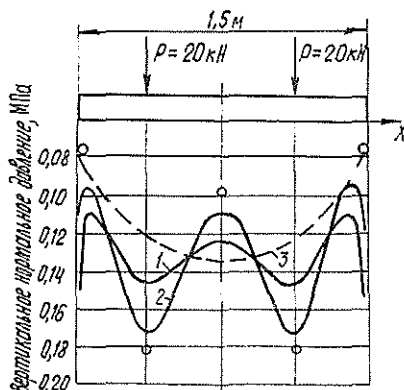


Рис. 1. Эпюры средних напряжений под шпалой.

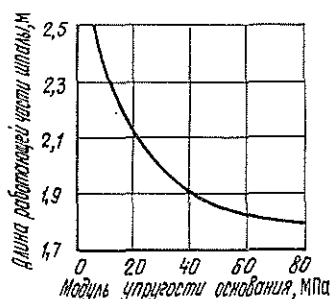


Рис. 2. Расчетная зависимость длины работающей части шпалы от модуля упругости основания.

риной нижнего основания $b = 0,2$ м и жесткостью при изгибе $EI = 0,364$ МН · м². Модуль упругости основания E_0 равен 75 МПа (кривая 1) и 175 МПа (кривая 2). Сплошная линия показывает интенсивность давления по длине шпалы, полученную решением. Для сравнения штриховой линией (кривая 3) дан результат расчета по методу постели.

Точками показаны экспериментальные данные, полученные кафедрой сухопутного транспорта леса АЛТИ на Конецгорской УЖД Архангельской области. В подошве опытной шпалы закрепляли месдозы. Шпалу укладывали на тщательно выровненное и уплотненное основание. Давление под шпалой при нагрузке измеряли после цикла предварительных нагрузок. Как видим, расчет шпалы как балки, лежащей на упругом полупространстве, существенно лучше подтверждается опытом, чем расчет по гипотезе постели.

Изложенный метод расчета был использован для определения оптимальной длины шпалы для узкоколейных железных дорог. Принимаем, что увеличение длины шпалы облегчает ее напряженное состояние, уменьшает давление, передаваемое ею на балласт, при этом увеличиваются срок службы шпалы и межремонтные периоды, что способствует уменьшению расходов на содержание пути. Тогда оптимальной длиной шпалы следует считать наибольшую ее длину, при которой концы шпалы еще не отрываются от основания при максимальной нагрузке.

На рис. 2 показана рассчитанная зависимость оптимальной длины шпалы типа II с шириной основания 0,21 м и жесткостью 0,256 МН · м² от модуля упругости основания при нагрузке от рельса 1 кН.

Предлагаемый метод расчета может служить основой для дальнейших исследований работы железнодорожных шпал в пути, а также для разработки алгоритма расчета всего рельсового пути, лежащего на поверхности упругого полупространства.

ЛИТЕРАТУРА

- [1]. Безухов Н. И. Теория упругости и пластичности.— М.: Гостехиздат, 1953.— 420 с. [2]. Галин Л. А. Контактные задачи теории упругости.— М.: Гостехиздат, 1953.— 264 с. [3]. Горбунов-Посадов М. И., Маликова Т. А., Соломин В. И. Расчет конструкций на упругом основании.— М.: Стройиздат, 1984.— 680 с. [4]. Микеладзе Ш. И. Некоторые задачи строительной механики.— М., Л.: Гостехиздат, 1948.— 268 с. [5]. Черкасов И. И. Механические свойства грунтовых оснований.— М.: Автотрансиздат, 1958.— 156 с.