

В случае, когда σ_0 и σ имеют показательное распределение, формула подбора МО диаметра \bar{d} имеет вид

$$\bar{d} = \{(32\bar{M}R)/[\pi\bar{\sigma}_0(1-R)]\}^{-1/3}. \quad (15)$$

В качестве примера выполнен подбор диаметра вала роликового лесотранспортера по значению $R = 0,975$, которому соответствует $z = 1,96$. Известна следующая информация о случайных величинах МО и СКО (среднее квадратическое отклонение): для предела прочности

$$\bar{\sigma}_0 = 470 \text{ МПа}; S_1 = 23,5 \text{ МПа};$$

для момента

$$\bar{M} = 152 \cdot 10^{-5} \text{ МН} \cdot \text{м}; S_M = 12,2 \cdot 10^{-5} \text{ МН} \cdot \text{м}; \alpha = 0,015.$$

Вычисляя коэффициенты по формулам (11)–(13), подставляем их в уравнение (10):

$$210,3 \cdot 10^{-4} \bar{d}^6 - 143,6 \bar{d}^3 + 21,3 \cdot 10^{-4} = 0. \quad (16)$$

Уравнение (16) имеет два положительных корня: $\bar{d}_1 = 35 \cdot 10^{-3}$ м и $\bar{d}_2 = 30 \cdot 10^{-3}$ м. Первый обеспечивает заданную вероятность неразрушения, равную 0,975, второй приводит к вероятности отказа, равной 0,025.

Аналогично выполняется подбор размеров и для других форм сечений и видов нагружения, а также для любых аномальных распределений исходных величин. Однако в ряде случаев решение интеграла (4) может быть произведено только численными методами. Для реализации данной методики нужно задаться видом распределения, поскольку на этапе проектирования объем статистических данных ограничен. По мере эксплуатации машин вид распределения может быть уточнен с помощью соответствующих критериев согласия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Вероятностные характеристики прочности авиационных материалов и сортамента / А. А. Кузнецов, О. М. Алифанов, В. И. Ветров и др.— М.: Машиностроение, 1970.— 568 с. [2]. Капур К., Ламберсон Л. Надежность и проектирование систем / Пер. с англ.— М.: Мир, 1980.— 604 с. [3]. Степнов М. Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний.— М.: Машиностроение, 1985.— 235 с. [4]. Чистяков В. П. Курс теории вероятностей.— М.: Наука, 1982.— 256 с.

Поступила 12 мая 1992 г.

УДК 630*377.44.001.24

МЕТОД РАСЧЕТА РЕАКТИВНОГО ДАВЛЕНИЯ ГРУНТОВОГО ОСНОВАНИЯ НА ГУСЕНИЧНЫЙ ДВИЖИТЕЛЬ ЛЕСОЗАГОТОВИТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ

М. О. СОКОЛОВ, А. П. КУЗНЕЦОВ

ЦНИИМЭ

Одним из эксплуатационных качеств лесозаготовительной машины (ЛЗМ) является ее проходимость, которая определяется совокупностью тягово-сцепных, опорно-временных, конструктивно-дорожных и других показателей. На стадии проектирования актуально и необходимо определение проходимости ЛЗМ методами аналитических исследо-

ваний, с достаточной достоверностью совпадающих с результатами натуральных испытаний. При проведении регламентированных натуральных испытаний опытных образцов ЛЗМ практически невозможно полностью определить их эксплуатационные качества, проявляющиеся в сложнейших климатических и почвенно-грунтовых условиях леса, что в конечном итоге приводит к увеличению сроков создания и серийного выпуска новых ЛЗМ, а также значительным материальным затратам.

Одним из критериев, определяющих проходимость гусеничных ЛЗМ, является реактивное давление грунта на опорную часть движителя. Оценка расчетных показателей проходимости по этому критерию вызывает значительные трудности [1, 2]. В работе [3] предложено рассматривать гусеницу как упругую балку неограниченной длины, лежащую на сплошном упругом основании. Интенсивность распределенной реакции в каждой точке по гипотезе Винклера пропорциональна прогибу. Это допущение ограничивает возможность применения аналитического метода для движителей с шарнирным соединением звеньев. Он рекомендуется для резиноленточных, пневмогусеничных продольно-полостных, пневмоторовых, пневмоволновых и т. д. гусеничных движителей.

В данной статье предлагается аналитический метод определения реактивного давления грунта на опорную часть гусеничного движителя ЛЗМ, основанный на расчете составной балки на упругом основании [4]. Он позволяет произвести качественную и количественную оценку распределения реактивного давления грунта под опорной поверхностью движителя с учетом физико-механических свойств грунта, числа звеньев в гусенице, их жесткости, распределения нагрузок между опорными катками, места приложения нагрузок по звену гусеницы, геометрических параметров движителя.

Приняты следующие допущения: гусеница является составной балкой (с заданным числом звеньев), лежащей на сплошном упругом основании; влиянием грунтозацепов и неровностей поверхности пренебрегаем; нагрузка от опорного катка на звено гусеницы сосредоточена в одной точке. Согласно этим допущениям гусеница освобождается от шарниров и представляется отдельными самостоятельными балками (звеньями), расположенными в опорной части движителя ЛЗМ, которые находятся под нагрузкой от опорных катков и под действием поперечных сил, возникающих в местах разреза взамен отброшенных частей.

Расчетная схема (рис. 1) позволяет рассматривать каждое звено гусеницы как единичную балку конечной длины, лежащую на грунтовом основании, и составить для нее дифференциальное уравнение изгиба и уравнение деформации поверхности грунта. Поперечные силы определяются по дополнительным уравнениям сопряженности.

Грунтовое основание рассматривается как сплошная упругая среда, характеризующаяся модулем деформации и коэффициентом Пуассона. Деформация грунта определяется из уравнения плоской задачи теории упругости (плоская деформация). Единичная балка рассматривается как тонкий упругий брус, деформирующийся по длине, причем упругая линия прогнувшейся балки и просевшая под ней поверхность грунта приблизительно совпадают по величине.

Составим расчетные формулы для единичной, освобожденной от шарниров, n -й балки. Реакция P_x^n грунтового основания на балку задается в виде алгебраической функции третьей степени, включающей четыре неизвестных параметра a_0^n , a_1^n , a_2^n и a_3^n . Они зависят от жесткости как рассматриваемой балки, так и других единичных балок, их длины и ширины, модулей деформации и коэффициентов Пуассона упругих оснований, а также от значений нагрузок и их расположения на рассматриваемых балках данной системы:

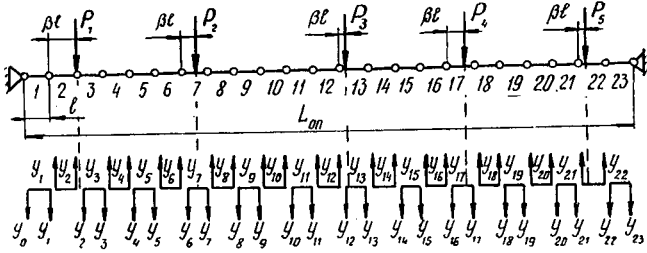


Рис. 1. Схема сил, действующих на составную балку, лежащую на сплошном упругом основании: P_1, P_2, P_3, P_4, P_5 — нагрузка от опорных катков трактора; l — длина опорных единичных балок (шаг) звеньев гусеницы; βl — расстояние от левого конца единичной балки до точки приложения нагрузки; $L_{оп}$ — длина опорной части движителя

$$P_x^n = a_0^n + \frac{2a_1^n}{L_n} \left(x_n - \frac{L_n}{2}\right) + \frac{4a_2^n}{L_n^2} \left(x_n - \frac{L_n}{2}\right)^2 + \frac{8a_3^n}{L_n^3} \left(x_n - \frac{L_n}{2}\right)^3, \quad (1)$$

где L_n — длина n -й балки;

x_n — абсцисса рассматриваемого сечения единичной n -й балки.

Полная нагрузка ψ^n на n -ю балку определяется по формуле

$$\psi^n = \Sigma \Gamma_{l^n}' P^n + \Gamma_0' Y_{n-1} + \Gamma_{L_n}' Y_n, \quad (2)$$

где

Γ — мгновенный прерыватель Герсеванова первого порядка [4] (индексы l^n — расстояние от левого конца n -й балки до точки приложения сосредоточенной силы; 0 — начало балки; L_n — ее конец);

P^n — сосредоточенная сила, приложенная на n -ю балку;

Y_{n-1}, Y_n — поперечные силы, приложенные по концам n -й балки и заменяющие действие на нее отброшенных соседних балок.

Подставляя значения P_x^n и ψ^n из формул (1) и (2) в дифференциальное уравнение изгиба балки, лежащей на упругом основании, получаем

$$E_n I_n \frac{d^4 y_n}{dx_n^4} = - \left[a_0^n + \frac{2a_1^n}{L_n} \left(x_n - \frac{L_n}{2}\right) + \frac{4a_2^n}{L_n^2} \left(x_n - \frac{L_n}{2}\right)^2 + \frac{8a_3^n}{L_n^3} \left(x_n - \frac{L_n}{2}\right)^3 \right] + \Sigma \Gamma_{l^n}' P^n + \Gamma_0' Y_{n-1} + \Gamma_{L_n}' Y_n, \quad (3)$$

где $E_n I_n$ — жесткость n -й балки;

y_n — вертикальное перемещение n -й балки.

После четырехкратного интегрирования уравнения (3) запишем

$$E_n I_n y_n = - \frac{a_0^n x_n^4}{4!} - \frac{2a_1^n}{L_n} \frac{\left(x_n - \frac{L_n}{2}\right)^5}{5!} - \frac{8a_2^n}{L_n^2} \frac{\left(x_n - \frac{L_n}{2}\right)^6}{6!} - \frac{48a_3^n}{L_n^3} \frac{\left(x_n - \frac{L_n}{2}\right)^7}{7!} + \Sigma \Gamma_{l^n}' P^n \frac{(x_n - l^n)^3}{3!} + \Gamma_0' Y_{n-1} \frac{x_n^3}{3!} + \frac{D_3^n x_n^3}{3!} + D_2^n \frac{x_n^2}{2} + D_1^n x_n + D_0^n. \quad (4)$$

В уравнение (4) входят десять неизвестных величин: четыре параметра $a_0^n, a_1^n, a_2^n, a_3^n$; четыре произвольные постоянные интегрирования $D_0^n, D_1^n, D_2^n, D_3^n$; две поперечные силы Y_{n-1} и Y_n , возникающие в шарнирах.

Для определения неизвестных используем следующие условия: равновесия — $\Sigma Y = 0$; $\Sigma M = 0$; граничные — при $x_n = 0$ и $x_n = L_n$, $y_n'' = 0$; сопряженности — деформация единичной n -й балки под нагрузкой происходит в случае ее контакта с грунтовым основанием по всей длине.

С учетом этих условий находим

$$\begin{aligned} a_0^n &= \frac{(8252 - 34\alpha_n) A_0^n - 13440 B_0^n \alpha_n}{13440 + 29\alpha_n}; \\ a_1^n &= \frac{(2C_0^n - A_0^n)(1280 - \alpha_n) - 8N_0^n \alpha_n}{2048 + \alpha_n}; \\ a_2^n &= \frac{(5188 + 63\alpha_n) A_0^n + 13440 B_0^n \alpha_n}{13440 + 29\alpha_n}; \\ a_3^n &= \frac{(2C_0^n - A_0^n)(384 + \alpha_n) + 4N_0^n \alpha_n}{2048 + \alpha_n}, \end{aligned} \tag{5}$$

где α_n — гибкость n -й балки,

$$\alpha_n = \frac{1 - \mu_n^2}{1 - \mu_{0n}^2} \frac{\pi E_{0n} L_n^3 b_n}{E_n I_n};$$

μ_n, μ_{0n} — коэффициент Пуассона соответственно балки и грунта;
 E_{0n} — модуль деформации грунта под n -й балкой;
 b_n — ширина n -й балки.

Определим вспомогательные члены уравнений (5):

$$\begin{aligned} A_0^n &= A^n + \frac{(-1)^{n+1}}{L_n} (Y_{n-1} + Y_n); \\ A^n &= \frac{\Sigma P^n}{L_n}; \\ B_0^n &= B^n; \\ B^n &= \frac{1}{L_n^5} \left(\Sigma P^n \frac{(L_n - l^n)^4}{4!} + \frac{L_n^4}{48} K^n - W^n L_n^5 \right); \\ K^n &= - \frac{\Sigma P^n (L_n - l^n)}{L_n}; \\ W^n &= \frac{1}{L_n^4} \left(\Sigma \Gamma_0^{L_n/2} P^n \frac{(L_n/2 - l^n)^3}{3!} \right); \\ C_0^n &= C^n + \frac{(-1)^{n+1}}{L_n} Y_n; \quad C^n = \frac{\Sigma P^n l^n}{L_n^2}; \\ N_0^n &= N^n; \quad N^n = \frac{1}{L_n} (\Sigma \Gamma_0^{L_n/2} P^n + K^n). \end{aligned}$$

Вспомогательные члены уравнения (2) содержат неизвестные поперечные силы Y_{n-1} и Y_n , приложенные к концам n -й балки. Их будем находить из условий сопряженности балки и грунта:

$$P_{x_{n-1}=L_{n-1}}^{n-1} = P_{x_n=0}^n = 0$$

или

$$\begin{aligned}
 & \rho_{n+1} \left\{ W_{n,1} \left[A^n + (-1)^{n+1} \frac{Y_{n-1} + Y_n}{b_n L_n} \right] + W_{n,2} B^n + \right. \\
 & \left. + W_{n,3} \left[(2C^n - A^n) + (-1)^{n+1} \frac{Y_n - Y_{n-1}}{b_n L_n} \right] + W_{n,4} N^n \right\} = \\
 & = \rho_n \left\{ W_{(n+1),1} \left[A^{n+1} - (-1)^{n+1} \frac{Y_n + Y_{n+1}}{b_{n+1} L_{n+1}} \right] + W_{(n+1),2} B^{n+1} - \right. \\
 & \left. - W_{(n+1),3} \left[(2C^{n+1} - A^{n+1}) - (-1)^{n+1} \frac{Y_{n+1} - Y_n}{b_{n+1} L_{n+1}} \right] - \right. \\
 & \left. - W_{(n+1),4} N^{n+1} \right\}, \tag{6}
 \end{aligned}$$

где

$$\rho_{n+1} = \rho_n = (13,44 + 0,029\alpha_n)(2,048 + 0,001\alpha_n);$$

$$W_{n,1} = (23,816 + 0,155\alpha_n)(2,048 + 0,001\alpha_n);$$

$$W_{n,2} = (55,05024 + 0,02688\alpha_n) \alpha_n;$$

$$W_{n,3} = (7,68 + 0,007\alpha_n)(13,44 + 0,029\alpha_n);$$

$$W_{n,4} = 0,016 (13,44 + 0,029\alpha_n) \alpha_n.$$

Преобразуя уравнение (6) в систему линейных уравнений, получаем

$$\left. \begin{aligned}
 & Q_{1,1} Y_0 + Q_{1,2} Y_1 + Q_{1,3} Y_2 = \Phi_1; \\
 & - (Q_{2,1} Y_1 + Q_{2,2} Y_2 + Q_{2,3} Y_3 = \Phi_2; \\
 & \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\
 & Q_{n,1} Y_{n-1} + Q_{n,2} Y_n + Q_{n,3} Y_{n+1} = (-1)^{n+1} \Phi_n.
 \end{aligned} \right\} \tag{7}$$

Поскольку левый край первого и правый край последнего звеньев выходят из контакта с грунтовым основанием, то на указанные места накладываются условия $P^1_{x=0} = 0$ и $P^n_{x=L_n} = 0$. Выполняя их, получаем два дополнительных уравнения к системе уравнений (7):

$$\begin{aligned}
 (W_{1,1} + W_{1,3}) Y_0 + (W_{1,1} - W_{1,3}) Y_1 = -b_1 L_1 [W_{1,1} A^1 + \\
 + W_{1,2} B^1 - W_{1,3} (2C^1 - A^1) - W_{1,4} N^1];
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \{ [W_{(n+1),1} - W_{(n+1),3}] Y_n + [W_{(n+1),1} + W_{(n+1),3}] Y_{n+1} \} (-1)^{n+1} = \\
 & = b_{n+1} L_{n+1} [W_{(n+1),1} A^{n+1} + W_{(n+1),2} B^{n+1} + \\
 & + W_{(n+1),3} (2C^{n+1} - A^{n+1}) + W_{(n+1),4} N^{n+1}],
 \end{aligned}$$

где

$$Q_{n,1} = W_{n,1} - W_{n,3};$$

$$Q_{1,2} = (W_{n,1} + W_{n,3}) + \eta_1 (W_{(n+1),1} + W_{(n+1),3});$$

$$Q_{n,3} = \eta_n (W_{(n+1),1} - W_{(n+1),3});$$

$$\Phi_n = \eta_n b_{n+1} L_{n+1} [W_{(n+1),1} A^{n+1} + W_{(n+1),2} B^{n+1} -$$

$$-W_{(n+1),3}(2C^{n+1} - A^{n+1}) - W_{(n+1),4}N^{n+1}] - b_n L_n [W_{n,1}A^n + \\ + W_{n,2}B^n + W_{n,3}(2C^n - A^n) + W_{n,4}N^n];$$

$$\eta_n = \frac{b_n L_n}{b_{n+1} L_{n+1}} \frac{\rho_n}{\rho_{n+1}}.$$

Таким образом, для определения сил $Y_0, Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_n$ необходимо знать: $W_{n,1}, W_{n,2}, W_{n,3}, W_{n,4}; Q_{n,1}, Q_{n,2}, Q_{n,3}; \rho_n; \Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \dots, \Phi_n$. Величины $W_{n,1}, W_{n,2}, W_{n,3}, W_{n,4}; Q_{n,1}, Q_{n,2}, Q_{n,3}; \rho_n$ зависят только от показателей гибкости $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n, \Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \dots, \Phi_n$ также и от нагрузок, действующих на рассматриваемых единичных балках.

По данной методике расчета составлена программа на ПЭВМ типа IBM PC AT-286. Результаты расчета по данной методике (рис. 2) по-

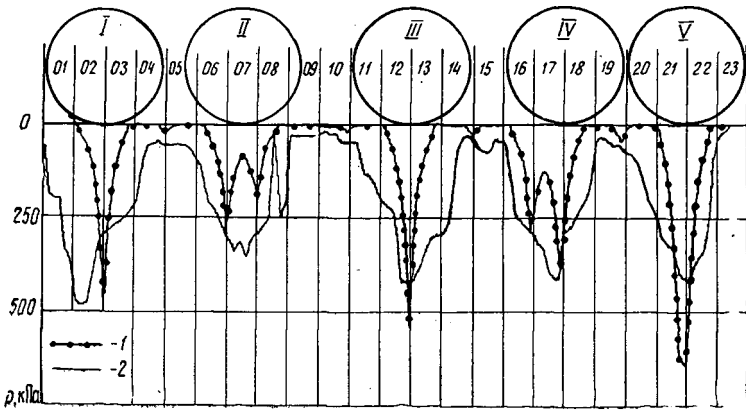


Рис. 2. Эпюры реактивного давления p грунтового основания на гусеничный движитель трелевочного трактора ТТ-4: 1 — экспериментальная; 2 — расчетная; I—V — опорные катки

зволяют проследить за изменением формы и величины эпюр реактивных давлений грунта на опорную часть гусеничного движителя ЛЗМ при перемещении нагрузок от опорных катков по соответствующим звеньям гусеницы, а также определить влияние шага и ширины гусеничной цепи на значения средних реактивных давлений грунта на гусеницу ЛЗМ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Антонов А. С. Теория гусеничного движителя. — М.: Машгиз, 1949. — 216 с.
 [2]. Беккер М. Г. Введение в теорию систем местность — машина. — М.: Машиностроение, 1973. — 520 с. [3]. Костогрыз С. Г. Метод расчета давления гусеничной лесотранспортной машины на грунт // Лесн. журн. — 1976. — № 1. — С. 48—52. — (Изв. высш. учеб. заведений). [4]. Симвулиди И. А. Составные балки на упругом основании. — М.: Высш. шк., 1961. — 204 с.

Поступила 27 апреля 1992 г.