

$$\frac{dm}{dt} = \frac{4 \pi \lambda r}{C_p} \ln \left\{ 1 + \frac{1}{q_0} \left[C_p (T_\infty - T_a) + \frac{q_0 Y_{0,\infty}}{\mu_0 v_0} + \Phi(I) - \sigma T^4 \right] \right\}.$$

Как видно из данной формулы скорость горения зависит от характеристик излучателя $\Phi(I)$ коэффициентов поглощения среды и размеров частиц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Букатый В.И., Соголаков А.М. Горение углеродных частиц в мощном, оптическом поле. - Физика горения и взрыва, 1979, т.15, №6. - С.46-50.
2. Вильямс Ф.А. Теория горения. - М.: Наука, 1971. - 615с.
3. Лавров Н.В., Розенфельд Э.И., Хаустович Г.П. Процессы горения топлива и защита окружающей среды. - М.: Металлургия, 1981. - 240с.
4. Шумриков В.В. Межфазный перенос при сублимации угля под действием лазерного излучения. Автореферат. - канд. физ.-мат. наук. ОГУ, 1988г.

УДК 625.1+622.6

В.В.Говоруха

НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ МЕТОДА РАСЧЕТА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ШПАЛ И СТРЕЛОЧНЫХ БРУСЬЕВ С ПЕРЕМЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ МОМЕНТОВ ИНЕРЦИИ, ШИРИНЫ ПЛОЩАДИ ОПИРАНИЯ И УПРУГОСТИ ОСНОВАНИЯ ПРИМЕНительно К РЕЛЬСОВОМУ ТРАНСПОРТУ.

Викладені наукові основи напруження і згинання залізобетонних шпал і стрілочних брусів під дією залізничного, промислового і підземного рейкового транспорту з врахуванням перемінних властивостей по їх довжині, таких як: пружність балласту і земляного полотна, змінні характеристики ширини площі опору і поперечного перерізу, а також діючі навантаження. Іл. 1. Бібліогр. : - 5 найм.

Применение железобетонной продукции на железнодорожном, промышленном и подземном рельсовом транспорте вызвано их повышенными технико-экономическими показателями по сравнению с

деревянными шпалами. К этим показателям относятся, прежде всего, увеличение их службы в 5-7 раз, снижение стоимости в 2-3 раза, повышение устойчивости пути, улучшение стабильности ширины колеи и повышение безопасности движения поездов. Кроме этого применение железобетонных шпал и брусьев стрелочных переводов для путевого хозяйства "Укрзалізниця" вызвано отсутствием высококачественной древесины в больших объемах на Украине.

Однако, применение железобетонной продукции на железнодорожном транспорте связано с увеличением динамических нагрузок от воздействия ходовой части подвижного состава. В связи с этим на железобетонные шпалы и брусья действует динамическая нагрузка, превышающая статическую величину в 1.5-2.0 раза. При этом возможно возникновение трещинообразования в конструкции как в средней, так и в подрельсовой частях шпал или напряженных сечениях брусьев.

На напряженно-деформированное состояние шпал и брусьев влияют также условия опирания их на основание, которое имеет переменные свойства упругости как по длине так и по глубине основания. В процессе эксплуатации упругие свойства основания изменяются в результате уплотнения балласта, а также реологических изменений и потери устойчивости частиц от воздействия сдвигающих и сжимающих напряжений в основании [1-5].

На напряженно-деформированное состояние шпал и брусьев оказывает влияние переменная ширина площади опирания, и переменные моменты инерции по длине шпал и брусьев.

Все эти и другие факторы необходимо учитывать при расчете железобетонных шпал и брусьев от воздействия подвижного состава.

В данной статье представлена одна из нескольких частей комплекса расчетов железобетонных шпал и брусьев. При этом нагрузки от воздействия подвижного состава на эти конструкции опубликованы в других работах. В настоящей работе представлены только научные основы метода расчета железобетонных шпал и брусьев с переменными характеристиками, а также переменными свойствами упругости основания по их длине с наибольшим приближением к реальным конструкциям. Кроме этого, представленный метод может использоваться для рационального поиска параметров конструкций в зависимости от сложного воздействия вертикальных односторонних, симметричных и поперечных

нагрузок в рельсовом пути и двойных перекрестных стрелочных переводах или съездах.

Рассмотрим железобетонные шпалы или брусья в общем виде как свободную балку конечной длины с переменными по длине моментами инерции и шириной площади опирания, лежащую на двухслойном основании, где переменные упругие свойства верхнего слоя соответствуют гипотезе пропорциональности, а нижний слой рассматривается как упругое полупространство.

Для получения интегрального уравнения изгиба шпал или брусьев (балки) рассмотрим их бесконечно малый элемент с переменными по длине параметрами, лежащий на упругом основании с переменными свойствами и нагруженный по длине внешними нагрузками, как показано на рис. 1.

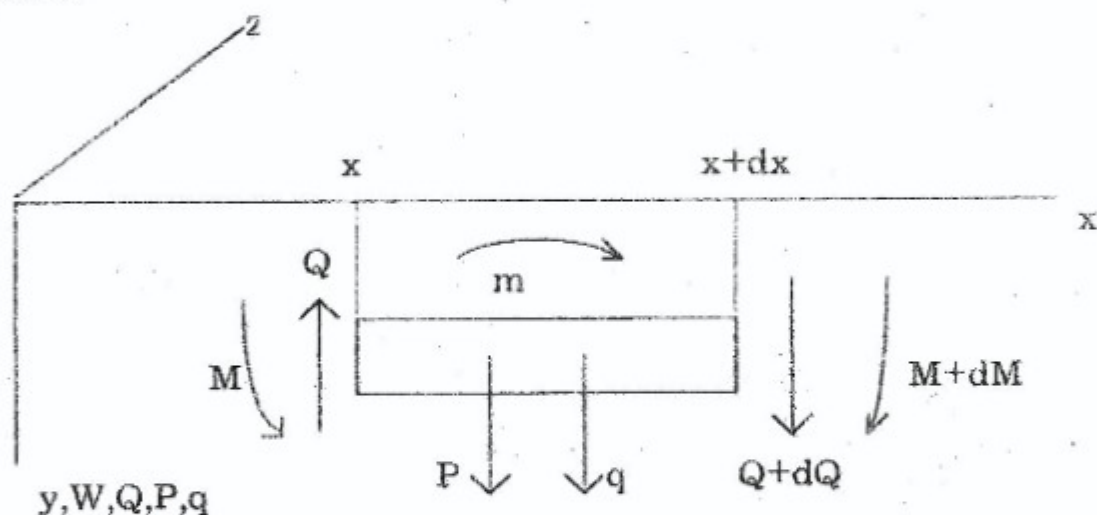


Рис. 1

Примем, что продольная ось балки совпадает с осью X системы координат, сечение и нагрузки симметричны относительно плоскости $Z=0$, а продольные составляющие нагрузок отсутствуют. При этом деформация балки сводится к изгибу в плоскости $Z=0$. Уравнение изгиба получим из уравнений равновесия бесконечно малого элемента балки и соотношения упругости, связывающего изгибающий момент и кривизну пропорциональной зависимостью:

$$\frac{dQ}{dx} + p + q = 0; \quad \frac{dM}{dx} + Q + m = 0; \quad \frac{d\varphi}{dx} = \frac{M}{EJ}; \quad \frac{dw}{dx} = \varphi, \quad (1)$$

где Q - поперечная сила; M - изгибающий момент; q - внешняя распределенная вертикальная нагрузка; m - внешняя распределенная

моментная нагрузка; p - реакция основания; E - модуль упругости материала балки; J - один из главных моментов инерции сечения балки в расчетной плоскости; w - прогиб балки; φ - угол поворота поперечного сечения балки.

Внешние распределенные нагрузки m и q представлены в обобщенном виде, включая в них и сосредоточенные нагрузки в виде слагаемых из произведения величины нагрузки на дельта-функцию Дирака $\delta(x)$.

Для получения деформаций балки, лежащей на упругом основании, проинтегрируем последовательно уравнения (1) по длине балки от начального ($x = 0$) до конечного ($x = l$) сечения балки и, принимая $x = 0$, $Q = 0$ и $M = 0$, получим:

$$Q(x) = -\int_0^x \psi_1(\xi) d\xi; \quad M(x) = -\int_0^x \psi_2(\xi) d\xi + x \int_0^x \psi_1(\xi) d\xi;$$

$$\varphi(x) = \varphi_0 + \int_0^x \psi_3(\xi) d\xi - \alpha_1(x) \int_0^x \psi_2(\xi) d\xi + \alpha_2(x) \int_0^x \psi_1(\xi) d\xi; \quad (2)$$

$$w(x) = w_0 + x\varphi_0 - \int_0^x \psi_4(\xi) d\xi + x \int_0^x \psi_3(\xi) d\xi - \beta_1(x) \int_0^x \psi_2(\xi) d\xi + \beta_2(x) \int_0^x \psi_1(\xi) d\xi.$$

При этом в выражениях (2) использованы следующие обозначения:

$$\begin{aligned} \psi_1(x) &= q(x) + p(x); \quad \psi_2(x) = m(x) + x\psi_1(x); \quad \psi_3(x) = \alpha_1(x)\psi_2(x) - \alpha_2(x)\psi_1(x); \\ \psi_4(x) &= x\psi_3(x) - \beta_1(x)\psi_2(x) + \beta_2(x)\psi_1(x). \end{aligned} \quad (3)$$

$$\alpha_1(x) = \int_0^x \frac{d\xi}{EJ(\xi)}; \quad \alpha_2(x) = \int_0^x \frac{\xi d\xi}{EJ(\xi)}; \quad \beta_1(x) = \int_0^x \alpha_1(\xi) d\xi; \quad \beta_2(x) = \int_0^x \alpha_2(\xi) d\xi. \quad (4)$$

Для "вычленения" реакции основания $p(x)$ в явном виде дополнительно к выражениям (3) введем обозначения:

$$\begin{aligned} \omega_1(x) &= q(x); \quad \omega_2(x) = m(x) + x\omega_1(x); \quad \omega_3(x) = \alpha_1(x)\omega_2(x) - \alpha_2(x)\omega_1(x); \\ \omega_4(x) &= x\omega_3(x) - \beta_1(x)\omega_2(x) + \beta_2(x)\omega_1(x) \end{aligned} \quad (5)$$

и запишем связь между функциями $\psi_i(x)$ и $\omega_i(x)$, $i = 1, \dots, 4$, с "вычлененной" реакцией $p(x)$:

$$\begin{aligned} \psi_1(x) &= \omega_1(x) + p(x); \quad \psi_2(x) = \omega_2(x) + xp(x); \\ \psi_3(x) &= \omega_3(x) + \gamma_1(x)p(x); \quad \psi_4(x) = \omega_4(x) + \gamma_2(x)p(x), \end{aligned} \quad (6)$$

$$\text{где: } \gamma_1(x) = x\alpha_1(x) - \alpha_2(x); \quad \gamma_2(x) = x\gamma_1(x) - x\beta_1(x) + \beta_2(x). \quad (7)$$

Принимая в выражениях (2) условия равенства нулю Q и M в конечном сечении балки $x = l$, определим константы интегрирования w_0 и

φ_0 , а также прогибы $w(x)$. Запишем их с "вычлененной" реакцией основания:

$$0 = Q(l) = -\int_0^l p(\xi) d\xi - \int_0^l \omega_1(\xi) d\xi; \quad (8)$$

$$0 = M(l) = \int_0^l (1-\xi) p(\xi) d\xi - \int_0^l [\omega_2(\xi) - l\omega_1(\xi)] d\xi; \quad (9)$$

$$w(x) = w_0 + x\varphi_0 - \int_0^x \gamma_2(\xi) p(\xi) d\xi + x \int_0^x \gamma_1(\xi) p(\xi) d\xi - \beta_1(x) \int_0^x \xi p(\xi) d\xi + \\ + \beta_2(x) \int_0^x p(\xi) d\xi - \int_0^x \omega_4(\xi) d\xi + x \int_0^x \omega_3(\xi) d\xi - \beta_1(x) \int_0^x \omega_2(\xi) d\xi + \beta_2(x) \int_0^x \omega_1(\xi) d\xi. \quad (10)$$

Выделим из обобщенных распределенных нагрузок $q(x)$ и $m(x)$ сосредоточенные нагрузки в явном виде с учетом дельта-функции Дирака $\delta(x)$, основное свойство которой выражается равенством:

$$\int_{x_0}^{x_1} f(\xi) \delta(\xi - x_*) d\xi = \begin{cases} f(x_*), & x_* \in [x_0, x_1] \\ 0, & x_* \notin [x_0, x_1] \end{cases} \quad (11)$$

Запишем обобщенные распределенные нагрузки в виде суммы собственно распределенных и сосредоточенных:

$$q(x) = q(x) + \sum_{i=1}^{N_p} P_i \delta(x - x_{pi}); \quad m(x) = m(x) + \sum_{i=1}^{N_M} M_i \delta(x - x_{Mi}), \quad (12)$$

где N_p - количество сосредоточенных поперечных сил, а P_i и x_{pi} - величина и координата приложения i -ой силы; N_M - количество сосредоточенных моментов, а M_i и x_{Mi} - величина и координата приложения i -го момента.

$$\text{Учтем, что } \int_0^x \delta(\xi - x_*) d\xi = H(x - x_*), \quad (13)$$

$$\text{где } H(x) - \text{функция Хевисайда } H(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ 1, & x \geq 0 \end{cases} \quad (14)$$

Основываясь на соотношениях (5), введем очередные вспомогательные функции $\Omega_i(x)$, $i = 1, \dots, 4$. Не ограничивая общности примем для упрощения вида выражений, что $N_M = N_p$ и $x_{Mi} = x_{pi}$. Обозначим:

$$\Omega_{1i} = P_i; \quad \Omega_{2i} = M_i + x_{pi} \Omega_{1i}; \quad \Omega_{3i} = \alpha_1(x_{pi}) \Omega_{2i} - \alpha_2(x_{pi}) \Omega_{1i}; \\ \Omega_{4i} = x_{pi} \Omega_{3i} - \beta_1(x_{pi}) \Omega_{2i} + \beta_2(x_{pi}) \Omega_{1i} \quad (15)$$

$$\begin{aligned}\Omega_1(x) &= \sum_{i=1}^{N_p} \Omega_{1i} H(x - x_{pi}); & \Omega_2(x) &= \sum_{i=1}^{N_p} \Omega_{2i} H(x - x_{pi}); \\ \Omega_3(x) &= \sum_{i=1}^{N_p} \Omega_{3i} H(x - x_{pi}); & \Omega_4(x) &= \sum_{i=1}^{N_p} \Omega_{4i} H(x - x_{pi}).\end{aligned}\quad (16)$$

Теперь соотношения (2) и (10) можно записать с явным разделением распределенных и сосредоточенных нагрузок:

$$\begin{aligned}Q(x) &= -\int_0^x \psi_1(\xi) d\xi - \Omega_1(x); & M(x) &= -\int_0^x \psi_2(\xi) d\xi + x \int_0^x \psi_1(\xi) d\xi - \Omega_2(x) + x\Omega_1(x); \\ \varphi(x) &= \varphi_0 + \int_0^x \psi_3(\xi) d\xi - \alpha_1(x) \int_0^x \psi_2(\xi) d\xi + \alpha_2(x) \int_0^x \psi_1(\xi) d\xi + \Omega_3(x) - \\ &\quad - \alpha_1(x)\Omega_2(x) + \alpha_2(x)\Omega_1(x); \\ w(x) &= w_0 + x\varphi_0 - \int_0^x \psi_4(\xi) d\xi + x \int_0^x \psi_3(\xi) d\xi - \beta_1(x) \int_0^x \psi_2(\xi) d\xi + \beta_2(x) \int_0^x \psi_1(\xi) d\xi - \\ &\quad - \Omega_4(x) + x\Omega_3(x) - \beta_1(x)\Omega_2(x) + \beta_2(x)\Omega_1(x).\end{aligned}\quad (17)$$

Разрешающая система уравнений (8)-(10) будет иметь вид:

$$0 = Q(l) = -\int_0^l p(\xi) d\xi - \int_0^l \omega_1(\xi) d\xi - \Omega_1(l). \quad (18)$$

$$0 = M(l) = \int_0^l (l - \xi) p(\xi) d\xi - \int_0^l [\omega_2(\xi) - l\omega_1(\xi)] d\xi - \Omega_2(l) + l\Omega_1(l). \quad (19)$$

$$\begin{aligned}w(x) &= w_0 + x\varphi_0 - \int_0^x \gamma_2(\xi) p(\xi) d\xi + x \int_0^x \gamma_1(\xi) p(\xi) d\xi - \beta_1(x) \int_0^x \xi p(\xi) d\xi + \\ &\quad + \beta_2(x) \int_0^x p(\xi) d\xi - \int_0^x \omega_4(\xi) d\xi + x \int_0^x \omega_3(\xi) d\xi - \beta_1(x) \int_0^x \omega_2(\xi) d\xi + \\ &\quad + \beta_2(x) \int_0^x \omega_1(\xi) d\xi - \Omega_4(x) + x\Omega_3(x) - \beta_1(x)\Omega_2(x) + \beta_2(x)\Omega_1(x)\end{aligned}\quad (20)$$

Для применения численных методов решения приведем разрешающую систему уравнений к безразмерной форме с помощью констант: h_* , b_* - характерные высота и ширина поперечного сечения балки; E_* , J_* - характерные модуль упругости и момент инерции сечения балки.

Безразмерные величины определяются согласно следующим выражениям:

$$\begin{aligned}\bar{x} &= \frac{x}{l}; \quad \bar{w} = \frac{w}{h_*}; \quad \bar{\varphi} = \frac{\varphi l}{h_*}; \quad \bar{M} = \frac{M l^2}{E_* J_* h_*}; \quad \bar{Q} = \frac{Q l^3}{E_* J_* h_*}; \\ (\bar{EJ}) &= \frac{EJ}{E_* J_*}; \quad \bar{m} = \frac{m l^3}{E_* J_* h_*}; \quad \bar{q} = \frac{q l^4}{E_* J_* h_*}; \quad \bar{p} = \frac{p l^4}{E_* J_* h_*}.\end{aligned}\quad (21)$$

Обезразмеривание (21) выбрано так, что форма уравнений (1) и все выведенные из этой системы уравнений соотношения при переходе к безразмерным величинам не меняются. Необходимо только учесть, что $\bar{l} = 1$.

При выделении из обобщенных распределенных нагрузок сосредоточенных в связи с обезразмериванием, следует иметь в виду соотношение $\delta(x) = \frac{1}{l} \delta(\bar{x})$, вследствие которого:

$$\bar{P}_i = \frac{P_i l^3}{E_* J_* h_*}; \quad \bar{M}_i = \frac{M_i l^2}{E_* J_* h_*} \quad (22)$$

Примем, что балка лежит на упругом основании, состоящем из верхнего упругого слоя конечной глубины и упругого полупространства. Со стороны балки на упругое основание действует распределенная вдоль линии контакта нагрузка $(-p(x))$, которая вызывает прогиб верхней границы основания. Этот прогиб состоит из смещения, вызванного деформацией упругого слоя w_l , и смещения, вызванного деформацией упругого полупространства w_f . При этом общий прогиб верхней границы основания равен:

$$w(x) = w_l(x) + w_f(x). \quad (23)$$

Выразим w_l и w_f через реакцию $p(x)$ и, подставив эти выражения в левую часть уравнений (20), завершим формирование разрешающей системы интегральных уравнений.

В данном методе не накладывались ограничения на способ изменения по длине распределенных характеристик, описывающих свойства и параметры балок, упругого слоя и погонных нагрузок. Это могут быть любые функции, в том числе и функции, имеющие конечные разрывы в конечном числе точек.

Для учета упругого основания примем, что балка лежит на упругом основании, состоящем из верхнего упругого слоя конечной глубины и упругого полупространства. Со стороны балки на упругое основание действует распределенная вдоль линии контакта нагрузка $(-p(x))$, которая

вызывает прогиб верхней границы основания. Этот прогиб состоит из смещения, вызванного деформацией упругого слоя w_l , и смещения, вызванного деформацией упругого полупространства w_f . При этом общий прогиб верхней границы основания равен:

$$w(x) = w_l(x) + w_f(x). \quad (24)$$

Выразим w_l и w_f через реакцию $p(x)$ и, подставив эти выражения в левую часть уравнений (20), завершим формирование разрешающей системы интегральных уравнений.

Для упругого слоя предположим, что реакция $p(x)$ в данной точке x линии контакта зависит только от деформации элементарного столбика слоя. Закон Гука для этого элемента будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{E_l} [\sigma_x - \nu_l(\sigma_y + \sigma_z)]; & \varepsilon_y &= \frac{1}{E_l} [\sigma_y - \nu_l(\sigma_x + \sigma_z)]; \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E_l} [\sigma_z - \nu_l(\sigma_x + \sigma_y)]. \end{aligned} \quad (25)$$

Принимая допущение, что деформация в поперечных направлениях равна нулю, то есть:

$$\varepsilon_x = 0, \varepsilon_z = 0, \quad (26)$$

из выражения (25) получим:

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E_l} \cdot \frac{(1 + \nu_l)(1 - 2\nu_l)}{(1 - \nu_l)} \cdot \sigma_y. \quad (27)$$

Считая деформацию элементарного столбика однородной по глубине слоя, окончательно получим:

$$w_l(x) = -k_l^{-1} \cdot p(x), \quad (28)$$

где

$$k_l^{-1} = \frac{h_l}{b_l \cdot E_l} \cdot \frac{(1 + \nu_l)(1 - 2\nu_l)}{(1 - \nu_l)}. \quad (29)$$

В формулах (25)-(29) обозначено: k_l - коэффициент постели; h_l, E_l, ν_l - глубина, модуль упругости и коэффициент Пуассона слоя; b_l - ширина нижнего основания сечения балки.

Используя формулы обезразмеривания (21) запишем выражения (28) и (29) в следующем виде:

$$\bar{w}_l = -\bar{k}_l^{-1} \cdot \bar{p}, \quad (30)$$

где

$$\bar{k}_l^{-1} = \frac{E_* J_* h_l}{E_l \cdot l^4 \cdot b_l} \cdot \frac{(1 + \nu_l)(1 - 2\nu_l)}{(1 - \nu_l)} \quad (31)$$

Для рассмотрения деформации упругого полупространства $w(x, z)$ под действием силы P , приложенной перпендикулярно к его граничной плоскости, используем основные формулы Бусинеска и Фламана:

$$w(x, z) = \frac{(1 - \nu_f^2)}{\pi E_f r} \cdot P, \quad r = \sqrt{(x - x_p)^2 + (z - z_p)^2}, \quad (32)$$

где E_f и ν_f - модуль упругости и коэффициент Пуассона для полупространства, а x_p и z_p - координаты точки приложения силы.

Обозначив поверхностную плотность нагрузки, передаваемой на полупространство со стороны упругого слоя, через $\rho(x, z)$ и воспользовавшись выражением (32), запишем формулу для перемещения границы полупространства для нашей задачи:

$$w(x, z) = \frac{(1 - \nu_f^2)}{\pi E_f} \cdot \int_0^l d\xi \int_{-h(\xi)/2}^{h(\xi)/2} \frac{\rho(\xi, \zeta)}{\sqrt{(x - \xi)^2 + (z - \zeta)^2}} d\zeta. \quad (33)$$

Принимаем, что составляющая прогиба балки $w_f(x)$, вызванная податливостью полупространства, равна среднему по ширине нижнего основания сечения балки прогибу граничной плоскости:

$$w_f(x) = \frac{1}{b(x)} \int_{-h(x)/2}^{h(x)/2} w(x, z) dz, \quad (34)$$

где b - ширина нижнего основания сечения балки.

Для упрощенных задач возможно допущение, что реакция основания равна:

$$P(x) = - \int_{-h(x)/2}^{h(x)/2} \rho(x, z) dz \quad (35)$$

и равномерно распределена по ширине:

$$\rho(x, z) = \rho(x) = - \frac{P(x)}{b(x)}. \quad (36)$$

С учетом вышеизложенного выражение (33) можно преобразовать к виду:

$$w_f(x) = - \frac{(1 - \nu_f^2)}{\pi E_f} \cdot \frac{1}{b(x)} \cdot \int_0^l \frac{P(\xi)}{b(\xi)} d\xi \int_{-h(\xi)/2}^{h(\xi)/2} d\zeta \int_{-h(x)/2}^{h(x)/2} \frac{dz}{\sqrt{(x - \xi)^2 + (z - \zeta)^2}}. \quad (37)$$

Для удобства изложения введем обозначения:

$$r_{x\xi} = x - \xi, \quad r_{z\zeta} = z - \zeta, \quad r_{pp} = \frac{b(x)}{2} - \frac{b(\xi)}{2}, \quad r_{pm} = \frac{b(x)}{2} + \frac{b(\xi)}{2}. \quad (38)$$

После интегрирования выражение (37) будет иметь вид:

$$\begin{aligned} w_f(x) = & \frac{2(1-\nu_f^2)}{\pi E_f b(x)} \cdot \int_0^l P(\xi) \cdot \ln|r_{x\xi}| d\xi + \\ & + \frac{2(1-\nu_f^2)}{\pi E_f} \cdot \int_0^l \frac{P(\xi)}{b(x)b(\xi)} \cdot \left[r_{pp} \cdot \ln(\sqrt{r_{x\xi}^2 + r_{pp}^2} + r_{pp}) - \right. \\ & \left. - r_{pm} \cdot \ln(\sqrt{r_{x\xi}^2 + r_{pm}^2} + r_{pm}) + \frac{b(x)b(\xi)}{\sqrt{r_{x\xi}^2 + r_{pp}^2} + \sqrt{r_{x\xi}^2 + r_{pm}^2}} \right] d\xi. \end{aligned} \quad (39)$$

Формула (39) завершает формирование разрешающих интегральных уравнений задачи. Затем $w(x)$ в левой части уравнения (20) выражаем через $w_l(x)$ и $w_f(x)$ по формуле (24), а их, в свою очередь, заменим соответствующими выражениями (30) и (39).

Для решения системы интегральных уравнений (24-27) воспользуемся методом каллокаций. При этом интервал изменения независимой переменной (x) разбивается узловыми точками на последовательный ряд подинтервалов и система интегральных уравнений записывается для каждой узловой точки. Далее получившуюся систему линейных алгебраических уравнений относительно значений искомой функции в узловых точках решаем методом Гаусса. Для получения решения во внутренних точках применялись интерполяционные формулы.

В нашей задаче не накладывались ограничения на способ изменения по длине распределенных характеристик, описывающих свойства и параметры балок, упругого слоя и погонных нагрузок. Это могут быть любые функции, в том числе и функции, имеющие конечные разрывы в конечном числе точек. Для обеспечения одинаковой точности решения по всей длине балки производится разбивка больших подинтервалов на несколько более мелких так, чтобы ни один подинтервал по своей длине не превышал заданного порогового значения.

Для каждой узловой точки принято условие совместности для деформаций для слоя:

$$w_h^{(-)} = -\frac{p_i^{(-)}}{k_{hi}^{(-)}} = -\frac{p_i^{(+)}}{k_{hi}^{(+)}} = w_h^{(+)} \quad (40)$$

где i - индекс по номеру узловой точки; $(\pm)$ - значки показывают положение величины относительно этой точки (справа или слева), удваиваем количество уравнений.

Для всех интервалов на подинтервалах воспользуемся квадратурной формулой трапеции:

$$\int_{x_0}^{x_1} f(\xi) d\xi = k_0 \cdot f_0^{(+)} + k_1 \cdot f_1^{(-)} \quad (41)$$

где

$$k_0 = \frac{1}{2}(x_1 - x_0), \quad f_0^{(+)} = f(x_0 + 0), \quad k_1 = \frac{1}{2}(x_1 - x_0), \quad f_1^{(-)} = f(x_1 - 0).$$

Особым случаем является сингулярный интеграл с логарифмической особенностью в формуле (39). Для него воспользуемся квадратурной формулой 1-го порядка для логарифмической весовой функции:

$$\int_{x_0}^{x_1} f(\xi) \cdot \ln|x - \xi| d\xi = k_0 \cdot f_0^{(+)} + k_1 \cdot f_1^{(-)}. \quad (42)$$

Для получения коэффициентов k_0 и k_1 произведем аппроксимацию $f(\xi)$ линейным полиномом на интервале $[x_0, x_1]$:

$$f(\xi) = f_0^{(+)} \cdot \frac{x_1 - \xi}{x_1 - x_0} + f_1^{(-)} \cdot \frac{\xi - x_0}{x_1 - x_0}. \quad (43)$$

Подставляя выражение (43) в левую часть равенства (42) и проинтегрировав в явном виде, получим следующие уравнения:

$$\begin{aligned} k_0 &= \frac{x_1 s_0 - s_1}{x_1 - x_0}, \quad k_1 = \frac{s_1 - x_0 s_0}{x_1 - x_0}, \\ s_0 &= (x_0 - x_1) - (x_0 - x) \cdot \ln|x_0 - x| + (x_1 - x) \cdot \ln|x_1 - x|, \\ s_1 &= -\frac{x_1^2 - x_0^2}{4} - \frac{x}{2}(x_1 - x_0) + \frac{1}{2}(x_1^2 - x^2) \cdot \ln|x_1 - x| - \\ &\quad - \frac{1}{2}(x_0^2 - x^2) \cdot \ln|x_0 - x|. \end{aligned} \quad (44)$$

Представленный метод расчета позволяет составить математическую модель для расчета элементов путевой структуры, рассматриваемых как свободные балки конечной длины с переменными по длине моментами инерции и шириной площади опирания, лежащими на двухслойном основании, где переменные упругие свойства верхнего слоя соответствуют

гипотезе пропорциональности, а нижний слой рассматривается как упругое полупространство.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фришман М.А., Говоруха В.В. Стабильность подшпального основания при железобетонных шпалах. - М. : Транспорт. Журнал "Вестник ВНИИЖТ", N7, 1968. - с.12-16.

2. Говоруха В.В. Теоретические и экспериментальные исследования работы железобетонных шпал типов С 56-У, С-62, С-64-2 и напряжений в подшпальном основании.//Исследование взаимодействия пути и подвижного состава.-1967.-вып. 69-с.56-73.

3. Фришман М.А., Говоруха В.В. Пути улучшения железобетонных шпал. - М.:Транспорт. Журнал "Путь и путевое хозяйство" N11, 1966-с.12-14.

4.Фришман М.А., Леванков И.С., Говоруха В.В. Влияние эюры укладки железобетонных шпал на работу элементов пути.// Вопросы путевого хозяйства и проектирования железных дорог. -1966.-Вып.57-с.21-28.

5.Говоруха В.В. Физико - технические основы создания элементов рельсового транспорта шахт и карьеров. - Киев: Наукова думка, 1992.-200с.

УДК 622.02:543.226

В.В. Шумриков, В.Я. Осенний

ТОПОТАКСИЧЕСКИЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЭНЕРГИИ ВОЗДУШНОЙ ПЛАЗМЫ

Досліджено термічними і рентгеноструктурними методами хлорито-аспідні сланці під дією плазмених потоків. Визначено основні закономірності трансформації кристалічних решіток домішних систем. Бібліогр. : - 5 найм.

Установление параметров термических процессов разрушения горных пород под действием концентрированных тепловых потоков