

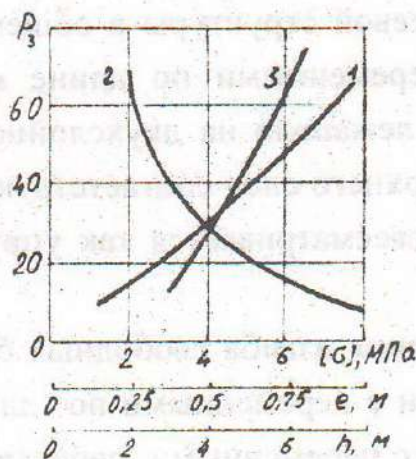


Рисунок 2

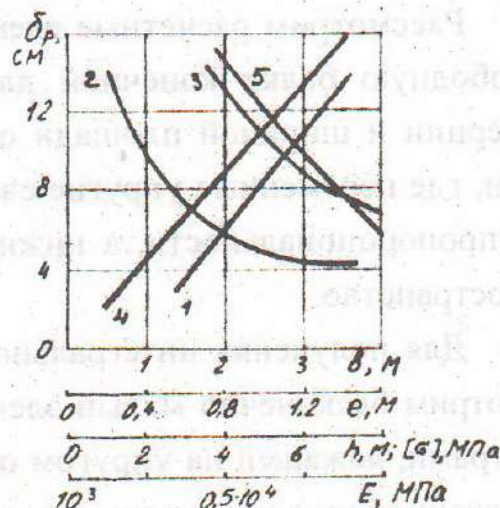


Рисунок 3

поведения системы “массив пород - крепь”, что свидетельствует об их достоверности.

Следует отметить, что для обеспечения устойчивости вспомогательных выработок нет необходимости стремиться к достижению огромных величин отпора крепи. В приведенных расчетах максимальные его значения находятся в пределах 700-1000 кН/м². Но при этом они должны обладать достаточной жесткостью с осадкой 14-20 см/м².

Таким образом, соответствующим выбором крепи с необходимыми отпорами и осадкой можно обеспечить устойчивость вспомогательных выработок и, следовательно, стабильные показатели работы добычного участка, а также как результат, эффективную работу (при обеспечении общих звеньев) шахты. Полученные зависимости позволяют получить исходные данные для такого выбора.

УДК 625.1+622.6

В.В.Говоруха

МЕТОД РАСЧЕТА ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПУТЕВОЙ СТРУКТУРЫ ПРИ ПЕРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРАХ КОНСТРУКЦИИ И ОСНОВАНИЯ

Часть 1. Интегральные уравнения изгиба балок с переменными параметрами

Рассмотрим расчетные элементы путевой структуры 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 свободных балок рассмотрим бесконечно малый элемент балки с переменными по длине параметрами, лежащей на упругом основании с переменными свойствами и нагруженной по длине внешними нагрузками, как показано на рисунке.

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 ($x=1$) 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:

$$\psi_1(x) = q(x) + p(x); \quad \psi_2(x) = m(x) + x\psi_1(x); \quad \psi_3(x) = \alpha_1(x)\psi_2(x) - \alpha_2(x)\psi_1(x);$$

$$\psi_4(x) = x\psi_3(x) - \beta_1(x)\psi_2(x) + \beta_2(x)\psi_1(x). \quad (3)$$

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

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

$$\omega_1(x) = q(x); \quad \omega_2(x) = m(x) + x\omega_1(x); \quad \omega_3(x) = \alpha_1(x)\omega_2(x) - \alpha_2(x)\omega_1(x);$$

$$\omega_4(x) = x\omega_3(x) - \beta_1(x)\omega_2(x) + \beta_2(x)\omega_1(x) \quad (5)$$

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

$$\psi_1(x) = \omega_1(x) + p(x); \quad \psi_2(x) = \omega_2(x) + xp(x);$$

$$\psi_3(x) = \omega_3(x) + \gamma_1(x)p(x); \quad \psi_4(x) = \omega_4(x) + \gamma_2(x)p(x), \quad (6)$$

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 концевом 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.

Учтем, что

$$\int_0^x \delta(\xi - x_*) d\xi = H(x - x_*), \quad (13)$$

где $H(x)$ - 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:

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

$$\Omega_1(x) = \sum_{i=1}^{N_p} \Omega_{1i} H(x - x_{pi}); \quad \Omega_2(x) = \sum_{i=1}^{N_p} \Omega_{2i} H(x - x_{pi}); \quad (16)$$

$$\Omega_3(x) = \sum_{i=1}^{N_p} \Omega_{3i} H(x - x_{pi}); \quad \Omega_4(x) = \sum_{i=1}^{N_p} \Omega_{4i} H(x - x_{pi}).$$

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

$$Q(x) = - \int_0^x \psi_1(\xi) d\xi - \Omega_1(x); \quad M(x) = - \int_0^x \psi_2(\xi) d\xi + x \int_0^x \psi_1(\xi) d\xi - \Omega_2(x) + x \Omega_1(x);$$

$$\begin{aligned} \varphi(x) &= \varphi_0 + \int_0^x \psi_3(\xi) d\xi - \alpha_1(x) \int_0^x \psi_2(\xi) d\xi + \alpha_2(x) \int_0^x \psi_1(\xi) d\xi + \Omega_3(x) - \\ &\quad - \alpha_1(x) \Omega_2(x) + \alpha_2(x) \Omega_1(x); \end{aligned}$$

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

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

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

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

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

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:

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

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

$$\delta(x) = \frac{1}{l} \delta(\bar{x}), \text{ вследствие которого:}$$

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

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.

Рассмотренная математическая модель представляет первую часть метода расчета основных элементов путевой структуры. В следующей статье будет дано продолжение этого метода с учетом деформации и устойчивости основания.

УДК 625.1+622.6

А.В. Говоруха, А.В. Соценко, Э.И. Даниленко, М.И. Уманов

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЧНОСТИ И РАБОТОСПОСОБНОСТИ ОПЫТНЫХ ОБРАЗЦОВ СТРЕЛОЧНЫХ ПЕРЕВОДОВ НОВОЙ КОНСТРУКЦИИ

В существующих конструкциях стрелочных переводов типов Р50 и Р65 железнодорожного, промышленного и подземного рельсового транспорта в стрелочной части крепление рамных рельсов с внутренней части пути обеспечивается с помощью подкладок-подушек, имеющих заклепочные соединения подкладок и подушек. Для обеспечения годовой программы стрелочных переводов АО "Днепро-петровский стрелочный завод" требуется выполнить около 1,5 миллиона заклепочных соединений, технология изготовления которых является энергоемкой в связи с нагревом заклепок до высокой температуры и сложной в механической обработке при сверлении отверстий в соединительных деталях. В настоящее время такие энергоемкие и трудоемкие процессы отрицательно влияют на стоимость продукции и неэкономичны для народного хозяйства. Вместе с тем, такое крепление не обладало достаточной прочностью, что способствовало отрыву подушек от подкладок на некоторых переводах.

Учитывая тенденцию увеличения скорости движения поездов при обеспечении безопасности движения, а также необходимость улучшения технико-экономических показателей производства, появилась необходимость разработки новой конструкции узлов крепления, их испытания и внедрения в производство.

Для решения этой задачи в 1997 г. Институтом геотехнической механики НАН Украины совместно с АО "Днепропетровский стрелочный завод" и