

УДК 622.674.22

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЖЕСТКОСТИ ТРЕХПРОВОДНИКОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ АРМИРОВОК ШАХТНЫХ СТВОЛОВ

Храмов Ал.А., канд. тех. наук., доц.,

Донецкий государственный технический университет,

Храмов Ан.А., инженер, Донецкое наладочное управление  
треста "Донецкуглеавтоматика"

*Составлены уравнения деформированного состояния трехпроводниковой упругой системы, позволяющие определять жесткости конструкций армировок стволов с двусторонним лобовым расположением проводников.*

*The deformed condition three guide elastic system equations are compiled which give the possibility to calculate the hardness of the shaft equipment having doublesided frontal disposition of guides.*

В практике шахтного строительства применяют жесткие армировки с различными конструкциями яруса, образованного расстрельными балками. В клетевых стволах, как правило, применяют конструкции жестких армировок с двусторонним и односторонним боковым (по отношению к подъемному сосуду) расположением проводников (рис. 1а, б). Конструкции армировок согласно рис. 1а представляют однопроводниковую систему, в которой на расстреле 1 укреплена одинарная 2 или парная 3 нитка проводников. Конструкции армировок согласно рис. 1б, в представляют двухпроводниковую систему, в которой на расстреле 1 укреплены две нитки парных 3 (рис. 1б) или одинарных 2 (рис. 1в) проводников. Такие конструкции обладают рядом существенных недостатков, о которых подробно изложено в работе [1]. Поэтому в проектах новых шахт все чаще применяют конструкции жестких армировок с двусторонним лобовым расположением проводников (рис. 1г). Обладая значительными преимуществами, по сравнению с конструкциями одностороннего или двустороннего бокового расположения проводников (рис. 1а, б, в), такие армировки давно и широко применяются на рудниках в европейских странах (Германия, Голландия, Польша) [2-4].

Конструкции армировок с одной или двумя нитками проводников на расстреле (рис. 1а, б, в) достаточно хорошо исследованы и их расчет доведен до инженерной формы [5]. Что касается конструкций

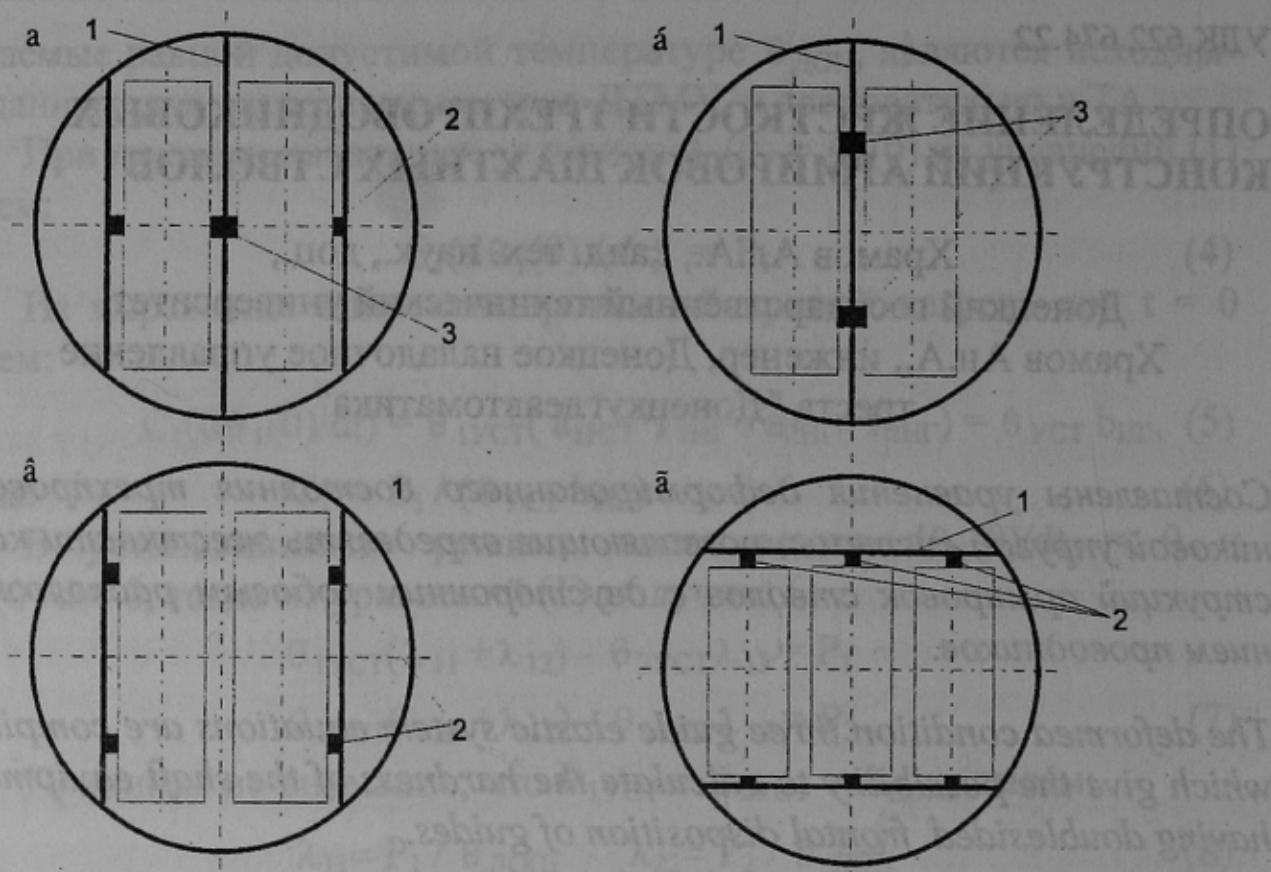


Рисунок 1 – Конструкции жестких армировок шахтных стволов

жестких армировок с двусторонним лобовым расположением проводников (рис. 1г), то определение их жесткостных характеристик достаточно сложно и вызывает значительные затруднения при выполнении проверочных расчетов динамической системы “сосуд-армировка” на устойчивость движения.

Конструкция жесткой армировки (рис 1г) представляет трехпроводниковую систему, на расстреле 1 которой на достаточно близком расстоянии друг от друга укреплены три нитки проводников 2.

С целью выяснения степени взаимного влияния параллельных ниток проводников на их жесткости рассмотрена задача определения в трехпроводниковой системе важнейших силовых и деформационных факторов. При этом принято, что крутильные деформации малы, а крутильная жесткость расстрельных балок  $K_0 = \text{const}$ . Опорная жесткость  $C_0$  расстрельных балок на проседание в точках крепления проводника, к которому приложена сила  $F$ , определяется местом установки проводника на расстреле и его изгибными свойствами и на всех ярусах  $C_0 = \text{const}$ .

Так как число расстрелов по глубине ствола достаточно велико, поэтому можно считать, что проводники имеют бесконечную длину.



Расстояние между проводниками и их изгибные жесткости  $EI$  постоянны по всей длине.

Приняв основную систему согласно рис. 2а и воспользовавшись методом перемещений, можно записать уравнения деформированного состояния проводников армировки. При этом все опоры проводников закрепляются от перемещений и поворотов (рис. 2б). На одном из пролетов (между двумя смежными ярусами с шагом  $h$ ) прикладывается внешняя нагрузка  $F = \text{const}$ . Поочередно каждой из опор дается перемещение и поворот. В соответствии с основной системой на всех опорах находятся перерезывающие силы и моменты основной системы под действием внешней нагрузки  $F$ . При повороте опор реакции на опорах соседнего проводника не возникают в связи с предположением о малости кручения расстрела, а при перемещении в опорах возникают только перерезывающие силы.

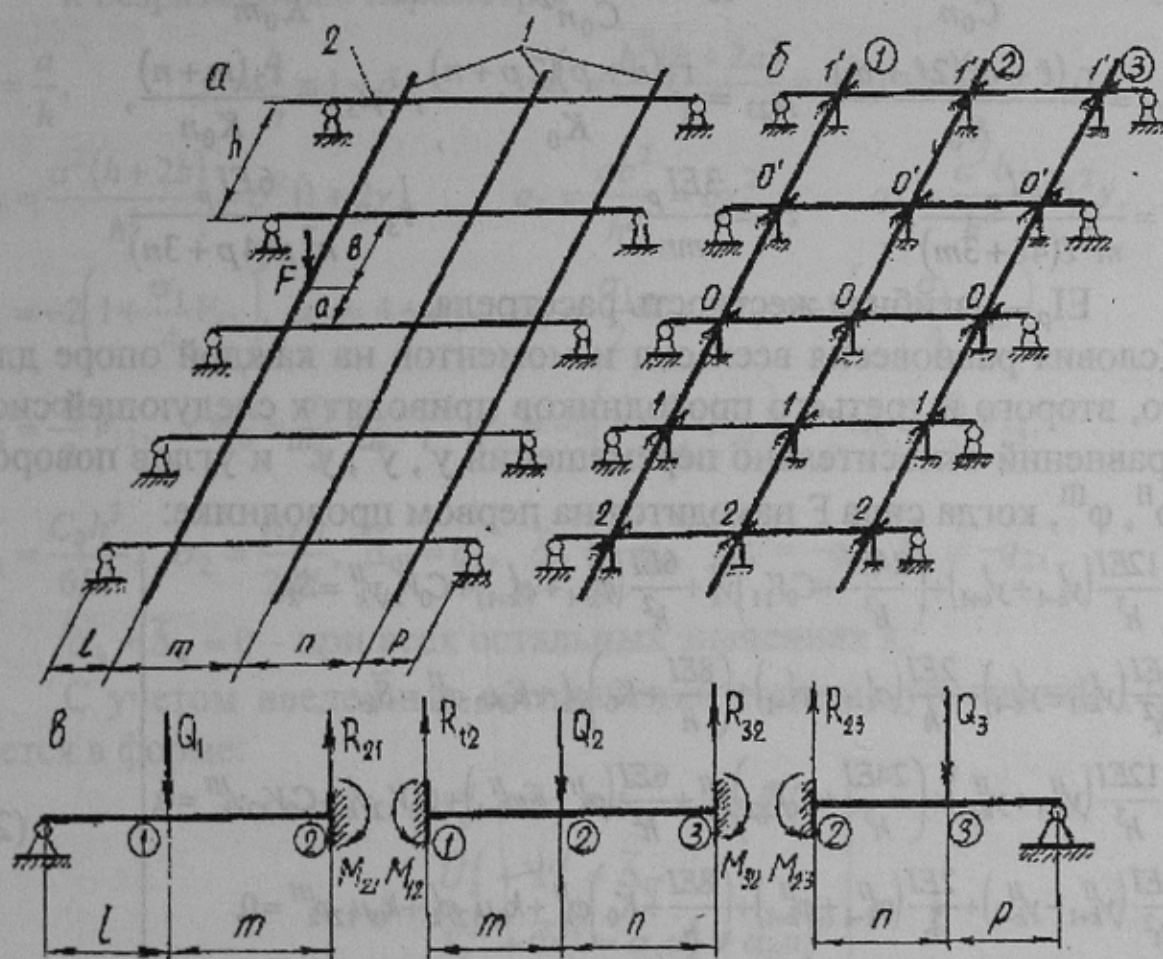


Рисунок 2 – Расчетные схемы трехпроводниковой упругой системы

Связь величин перемещений опор соответственно первого ( $y^I$ ), второго ( $y^{II}$ ) и третьего ( $y^{III}$ ) проводников с реакциями определяются зависимостями:

$$\begin{aligned} Q_1 &= C_0 V_{11} y^I, & Q_2 &= C_0 V_{22} y^{II}, & Q_3 &= C_0 V_{33} y^{III}, \\ R_{21} &= C_0 V_{21} y^I, & R_{12} &= C_0 V_{12} y^{II}, & R_{32} &= C_0 V_{32} y^{II}, \\ R_{23} &= C_0 V_{23} y^{III}, & M_{21} &= K_0 \mu_{21} y^I, & M_{12} &= K_0 \mu_{12} y^{II}, \\ M_{32} &= K_0 \mu_{32} y^{III}, & M_{23} &= K_0 \mu_{23} y^{III}, \end{aligned} \quad (1)$$

где коэффициенты влияния

$$\begin{aligned} V_{11} &= \frac{2\tau_1(\ell+m)^3}{C_0 m \ell}, & V_{22} &= \frac{\tau_2(m+n)^3}{C_0 m^2 n^2}, & V_{33} &= \frac{2\tau_3(n+p)^3}{C_0 n p}, \\ V_{12} &= \frac{\tau_2(3m+n)}{C_0 m^2}, & V_{21} &= \frac{\tau_1[3(\ell+m)^2 - \ell^2]}{C_0 m}, \\ V_{23} &= \frac{\tau_3[3(n+p)^2 - p^2]}{C_0 n}, & V_{32} &= \frac{\tau_2(m+3n)}{C_0 n^2}, & \mu_{12} &= \frac{\tau_2(m+n)}{K_0 m}, \\ \mu_{21} &= \frac{\tau_1(\ell+m)(2\ell+m)}{K_0}, & \mu_{23} &= \frac{\tau_3(n+p)(2p+n)}{K_0}, & \mu_{32} &= \frac{\tau_2(m+n)}{K_0 n}, \\ \tau_1 &= \frac{6EI_p}{m^2 \ell(4\ell+3m)}, & \tau_2 &= \frac{3EI_p}{mn}, & \tau_3 &= \frac{6EI_p}{n^2 p(4p+3n)}, \end{aligned}$$

$EI_p$  – изгибная жесткость расстрела.

Условия равновесия всех сил и моментов на каждой опоре для первого, второго и третьего проводников приводят к следующей системе уравнений относительно перемещений  $y^I$ ,  $y^{II}$ ,  $y^{III}$  и углов поворота  $\phi^I$ ,  $\phi^{II}$ ,  $\phi^{III}$ , когда сила  $F$  находится на первом проводнике:

$$\left. \begin{aligned} -\frac{12EI}{h^3}(y'_{k-1} + y'_{k+1}) + \left(\frac{24EI}{h^3} + C_0 V_{11}\right)y'_k + \frac{6EI}{h^2}(\phi'_{k-1} + \phi'_{k+1}) + C_0 V_{21} y''_k &= S_k, \\ \frac{6EI}{h^2}(y'_{k+1} - y'_{k-1}) + \frac{2EI}{h}(\phi'_{k-1} + \phi'_{k+1}) + \left(\frac{8EI}{h} + K_0\right)\phi'_k + k_0 \mu_{21} \phi''_k &= \tilde{S}_k, \\ -\frac{12EI}{h^3}(y''_{k-1} + y''_{k+1}) + \left(\frac{24EI}{h^3} + C_0 V_{22}\right)y''_k + \frac{6EI}{h^2}(\phi''_{k-1} + \phi''_{k+1}) + C_0 V_{12} y'_k + C_0 V_{32} y'''_k &= 0, \\ \frac{6EI}{h^2}(y''_{k+1} - y''_{k-1}) + \frac{2EI}{h}(\phi''_{k-1} + \phi''_{k+1}) + \left(\frac{8EI}{h} + K_0\right)\phi''_k + k_0 \mu_{12} \phi'_k + k_0 \mu_{23} \phi'''_k &= 0, \\ -\frac{12EI}{h^3}(y'''_{k-1} + y'''_{k+1}) + \left(\frac{24EI}{h^3} + C_0 V_{33}\right)y'''_k + \frac{6EI}{h^2}(\phi'''_{k-1} + \phi'''_{k+1}) + C_0 V_{23} y''_k &= 0, \\ \frac{6EI}{h^2}(y'''_{k+1} - y'''_{k-1}) + \frac{2EI}{h}(\phi'''_{k-1} + \phi'''_{k+1}) + \left(\frac{8EI}{h} + K_0\right)\phi'''_k + k_0 \mu_{32} \phi''_k &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$



где  $k = \dots 2', 1', 0', 0, 1, 2, \dots$  - номер опоры,

$$S_k = \begin{cases} \frac{b^2(h+2a)}{h^3} F & \text{при } k = 0', \\ \frac{a^2(h+2b)}{h^3} F & \text{при } k = 0, \end{cases} \quad \tilde{S}_k = \begin{cases} \frac{ab^2}{h^2} F & \text{при } k = 0', \\ \frac{a^2b}{h^2} F & \text{при } k = 0, \end{cases}$$

$S = \tilde{S}_k = 0$  при всех остальных значениях  $k$ ,

$EI$  - изгибная жесткость проводника,

$h$  - шаг армировки.

Для дальнейших преобразований введены безразмерные переменные

$$u_k^I = \frac{12EI}{Fh^3} y_k^I, \quad u_k^{II} = \frac{12EI}{Fh^3} y_k^{II}, \quad u_k^{III} = \frac{12EI}{Fh^3} y_k^{III},$$

$$\psi_k^I = \frac{2EI}{Fh^2} \varphi_k^I, \quad \psi_k^{II} = \frac{2EI}{Fh^2} \varphi_k^{II}, \quad \psi_k^{III} = \frac{2EI}{Fh^2} \varphi_k^{III},$$

и безразмерные параметры

$$\delta = \frac{a}{h}, \quad \gamma = \frac{b}{h} = 1 - \delta, \quad q_1 = \frac{b^2(h+2a)}{h^3} = \gamma^2(1+2\delta),$$

$$q_2 = \frac{a^2(h+2b)}{h^3} = \delta^2(1+2\gamma), \quad q_3 = \frac{ab^2}{h^2} = \delta\gamma^2, \quad q_4 = \frac{a^2b}{h^2} = \delta^2\gamma,$$

$$\alpha_1 = -2\left(1 + \frac{\sigma_1}{4} V_{11}\right), \quad \alpha_2 = 4 + \sigma_2, \quad \alpha_3 = \frac{\sigma_1}{2} V_{21}, \quad \alpha_4 = -2\left(1 + \frac{\sigma_1}{4} V_{22}\right),$$

$$\alpha_5 = \frac{\sigma_1}{2} V_{12}, \quad \alpha_6 = \frac{\sigma_1}{2} V_{32}, \quad \alpha_7 = -2\left(1 + \frac{\sigma_1}{4} V_{33}\right), \quad \alpha_8 = \frac{\sigma_1}{2} V_{23},$$

$$\sigma_1 = \frac{C_0 h^3}{6EI}, \quad \sigma_2 = \frac{K_0 h}{2EI}, \quad \tilde{\Delta}_{0'} = q_3, \quad \tilde{\Delta}_0 = -q_4, \quad \Delta_{0'} = -q_1, \quad \Delta_0 = -q_2,$$

$\Delta_k = \tilde{\Delta}_k = 0$  - при всех остальных значениях  $k$ .

С учетом введенных обозначений система уравнений (2) запишется в форме:

$$\left. \begin{aligned} Y_k^I + \tilde{\Phi}_k^I &= \Delta_{0'} + \alpha_3 u_k^{II} \\ \tilde{U}_k^I + \Psi_k^I &= \tilde{\Delta}_{0'} \\ Y_k^{II} + \tilde{\Phi}_k^{II} &= \alpha_5 u_k^I + \alpha_6 u_k^{III} \\ U_k^{II} + \Psi_k^{II} &= 0 \\ Y_k^{III} + \tilde{\Phi}_k^{III} &= \alpha_8 u_k^{II} \\ \tilde{U}_k^{III} + \Psi_k^{III} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где для компактности записи приняты следующие обозначения

$$\begin{aligned}
 Y_k^I &= u_{k+1}^I + \alpha_1 u_k^I + u_{k-1}^I, & \tilde{\Phi}_k^I &= 3(\psi_{k+1}^I - \psi_{k-1}^I), \\
 \tilde{U}_k^I &= \frac{1}{2}(u_{k+1}^I - u_{k-1}^I), & \Psi_k^I &= \psi_{k+1}^I + \alpha_2 \psi_k^I + \psi_{k-1}^I, \\
 Y_k^{II} &= u_{k+1}^{II} + \alpha_4 u_k^{II} + u_{k-1}^{II}, & \tilde{\Phi}_k^{II} &= 3(\psi_{k+1}^{II} - \psi_{k-1}^{II}), \\
 \tilde{U}_k^{II} &= \frac{1}{2}(u_{k+1}^{II} - u_{k-1}^{II}), & \Psi_k^{II} &= \psi_{k+1}^{II} + \alpha_2 \psi_k^{II} + \psi_{k-1}^{II}, \\
 Y_k^{III} &= u_{k+1}^{III} + \alpha_7 u_k^{III} + u_{k-1}^{III}, & \tilde{\Phi}_k^{III} &= 3(\psi_{k+1}^{III} - \psi_{k-1}^{III}), \\
 \tilde{U}_k^{III} &= \frac{1}{2}(u_{k+1}^{III} - u_{k-1}^{III}), & \Psi_k^{III} &= \psi_{k+1}^{III} + \alpha_2 \psi_k^{III} + \psi_{k-1}^{III}.
 \end{aligned}$$

Системы уравнений, подобные (3), могут быть записаны при положении силы  $F$  на втором и третьем проводниках.

Структура системы уравнений (3) допускает путем несложных, но громоздких алгебраических преобразований произвести ее разделение относительно неизвестных  $u_{k+1}, u_k, u_{k-1}, \psi_{k+1}, \psi_k, \psi_{k-1}$ .

Например, при положении силы  $F$  на первом проводнике для этого же проводника система уравнений (3) в безразмерной форме записи приобретает вид:

$$\begin{aligned}
 & u_{k+4}^I + \alpha^I u_{k+3}^I + \beta^I u_{k+2}^I + \alpha^I u_{k+1}^I + u_k^I = \\
 & \quad = -2 \cdot (\alpha_3 u_{k+3}^{II} + \alpha_2 \alpha_3 u_{k+2}^{II} + \alpha_3 u_{k+1}^{II}) \\
 & u_{k+3}^I + \alpha^I u_{k+2}^I + \beta^I u_{k+1}^I + \alpha^I u_k^I + u_{k-1}^I = \\
 & \quad = -2 \cdot (\alpha_3 u_{k+2}^{II} + \alpha_2 \alpha_3 u_{k+1}^{II} + \alpha_3 u_k^{II} + 3q_3 - q_2) \\
 & u_{k+2}^I + \alpha^I u_{k+1}^I + \beta^I u_k^I + \alpha^I u_{k-1}^I + u_{k-2}^I = \\
 & \quad = -2 \cdot (\alpha_3 u_{k+1}^{II} + \alpha_2 q_1 + \alpha_2 \alpha_3 u_k^{II} + \alpha_3 u_{k-1}^{II} - 3q_4 - q_2) \\
 & u_{k+1}^I + \alpha^I u_k^I + \beta^I u_{k-1}^I + \alpha^I u_{k-2}^I + u_{k-3}^I = \\
 & \quad = -2 \cdot (\alpha_3 u_k^{II} + \alpha_2 q_2 + \alpha_2 \alpha_3 u_{k-1}^{II} + \alpha_3 u_{k-2}^{II} - 3q_5 - q_1) \\
 & u_k^I + \alpha^I u_{k-1}^I + \beta^I u_{k-2}^I + \alpha^I u_{k-3}^I + u_{k-4}^I = \\
 & \quad = -2 \cdot (\alpha_3 u_{k-1}^{II} + \alpha_2 \alpha_3 u_{k-2}^{II} + \alpha_3 u_{k-3}^{II} + 3q_4 - q_2) \\
 & u_{k-1}^I + \alpha^I u_{k-2}^I + \beta^I u_{k-3}^I + \alpha^I u_{k-4}^I + u_{k-5}^I = -2 \cdot (\alpha_3 u_{k-2}^{II} + \alpha_2 \alpha_3 u_{k-3}^{II} + \alpha_3 u_{k-4}^{II})
 \end{aligned} \tag{4}$$



$$\left. \begin{aligned} \psi'_{k+4} + \alpha' \psi'_{k+3} + \beta' \psi'_{k+2} + \alpha' \psi'_{k+1} + \psi'_k &= -2 \cdot \left( -\frac{1}{2} \alpha_3 u''_{k+3} + \frac{1}{2} \alpha_3 u''_{k+1} \right) \\ \psi'_{k+3} + \alpha' \psi'_{k+2} + \beta' \psi'_{k+1} + \alpha' \psi'_k + \psi'_{k-1} &= -2 \cdot \left( -\frac{1}{2} \alpha_3 u''_{k+2} + \frac{1}{2} \alpha_3 u''_k - \frac{1}{2} q_1 + q_3 \right) \\ \psi'_{k+2} + \alpha' \psi'_{k+1} + \beta' \psi'_k + \alpha' \psi'_{k-1} + \psi'_{k-2} &= -2 \cdot \left( -\frac{1}{2} \alpha_3 u''_{k+1} + \alpha_1 q_3 + \frac{1}{2} \alpha_3 u''_{k-1} - \frac{1}{2} q_2 - q_4 \right) \\ \psi'_{k+1} + \alpha' \psi'_k + \beta' \psi'_{k-1} + \alpha' \psi'_{k-2} + \psi'_{k-3} &= -2 \cdot \left( -\frac{1}{2} \alpha_3 u''_k - \alpha_1 q_4 + \frac{1}{2} \alpha_3 u''_{k-2} + \frac{1}{2} q_1 + q_3 \right) \\ \psi'_k + \alpha' \psi'_{k-1} + \beta' \psi'_{k-2} + \alpha' \psi'_{k-3} + \psi'_{k-4} &= -2 \cdot \left( -\frac{1}{2} \alpha_3 u''_{k-1} + \frac{1}{2} \alpha_3 u''_{k-3} + \frac{1}{2} q_2 - q_4 \right) \\ \psi'_{k-1} + \alpha' \psi'_{k-2} + \beta' \psi'_{k-3} + \alpha' \psi'_{k-4} + \psi'_{k-5} &= -2 \cdot \left( -\frac{1}{2} \alpha_3 u''_{k-2} + \frac{1}{2} \alpha_3 u''_{k-4} \right) \end{aligned} \right\} (5)$$

где введены обозначения

$$\alpha' = -2(\alpha_1 + \alpha_2) = \sigma_1 V_{11} - 2\sigma_2 - 4,$$

$$\beta' = -2(\alpha_1 \alpha_2 + 5) = 6 + \sigma_1 \sigma_2 V_{11} + 4(\sigma_1 V_{11} + \sigma_2).$$

Аналогично (4), (5) могут быть записаны системы уравнений с разделёнными переменными для второго и третьего проводников при положении силы  $F$  на первом проводнике. Для определения жесткости конструкции армировки при положении силы на втором и третьем проводниках необходимо записать подобные системы уравнений.

Решение каждой из систем уравнений, полученных при положении силы  $F$  на первом, втором или третьем проводниках, выполненное методом конечных разностей, дает значение соответствующих неизвестных  $u_{k+1}$ ,  $u_k$ ,  $u_{k-1}$ ,  $\psi_{k+1}$ ,  $\psi_k$ ,  $\psi_{k-1}$ , которые позволяют найти прогиб проводника под силой и, соответственно, жесткость конструкции в этом месте с учетом влияния присоединенных проводников и расстрельных балок.

Список источников.

1. Гаркуша Н.Г., Храмов А.А. Обзор мирового опыта проектирования жестких армировок вертикальных стволов шахт. Обзор ЦНИЭИуголь, ЦБНТИ Минуглепрома УССР. - М., 1982. - 52 с.
2. Ries A. Umbauverfahren für Tagesschächte. "Glückauf", 1973, I.34, 1973, №4.
3. Slonina W. Führungseinrichtungen in Schächten aus der Sicht der neuen BVOS vom 20. Jul 1977. "Bergbau", 1978, I.29, №8.
4. Glercq H.L. Der Stand der Förtechnik in der Niederlanden. "Geologie en Mijnbokuw", 1962, t.41, № 5.
5. Гаркуша Н.Г., Дворников В.И., Храмов А.А., Шилинговский Н.И. Расчет жесткости армировок шахтных стволов. "Шахтное строительство", №9, 1970.