

УДК 622.868.42:[001.891.54:5]

*В.Г. Агеев, канд. техн. наук***МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ШАХТНОЙ ВЗРЫВОУСТОЙЧИВОЙ МОНОЛИТНОЙ ПЕРЕМЫЧКИ**

Приведен вариационный метод исследований напряженно-деформированного состояния шахтной взрывоустойчивой монолитной перемычки для локализации взрывов метана, угольной пыли и пожаров. Рассмотрена наиболее обобщенная расчетная схема перемычки в виде трехмерной плиты с двумя отверстиями под действием нагрузок от ударной волны и пород, находящихся в зоне неупругих деформаций. Разработанный метод позволит определить минимальную толщину перемычки, обеспечивающую безопасное ведение работ горноспасателями при ликвидации последствий взрывов.

*Ключевые слова:* горная выработка, взрыв, перемычка, расчетная схема, перемещения, деформации, напряжения, вариационный метод.

*V. Ageyev, Cand. of Sc. (Eng.)***THE MATHEMATICAL MODEL OF THE STRAINED AND DEFORMED STATE OF A MINE EXPLOSION-STABLE MONOLITHIC STOPPING**

The variational method of investigations of the strained and deformed state of the mine explosion-stable solid stopping to localize the methane, coal dust explosions and fires is adduced. The most generalized analytical model of the stopping in the form of the three-dimensional plate with two openings is considered under the influence of the loads from the shock wave and rocks being in the zone of plastic deformations. The method worked out will allow determining the minimum thickness of the stopping ensuring the safe carrying-out of the operations by the mine rescuers by elimination of the explosions.

*Keywords:* excavation, explosion, bridge, design scheme, displacement, strain, stress, variational method.

Среди опасностей горного производства наиболее тяжелыми по своим последствиям по-прежнему остаются аварии, связанные с воспламенением метана и угольной пыли, которые в большинстве случаев носят характер катастроф. Поэтому целью локализации взрывов метана и угольной пыли в подземных горных выработках является максимально возможное ограничение области распространения фронта пламени и ударно-воздушной волны.

Исследованиям по определению параметров воздушных ударных волн (УВ) при взрывах газов и пыли в горных выработках посвящено большое количество работ, на основании результатов которых определено безопасное давление во фронте УВ, обеспечивающее применение установок для возведения перемычек.

Изоляция пожаров в шахтах, опасных по взрывам газа и угольной пыли, производится, как правило, взрывоустойчивыми перемычками из гипсовых вяжущих материалов методом литья с проемными трубами для проветривания аварийной выработки.

Однако до настоящего времени отсутствует научно обоснованное определение основной технической характеристики гипсовой перемычки – толщины, от которой зависит трудоемкость возведения перемычки и безопасность горноспасателей при ликвидации аварий.

В работе [1] приведен расчет несущей способности монолитных перемычек при воздействии динамических нагрузок. Здесь перемычка рассматривается как круглая плита, защемленная по контуру. Отмечено, что перемычки с соотношением толщины к

приведенному диаметру больше 0,4 рассматриваются как толстые плиты из условий достижения в материале предельных срезающих напряжений, а для перемычек с соотношением менее 0,4 расчет несущей способности производится с учетом сил распора, возникающих при действии как статических, так и динамических нагрузок, когда при достижении в материале напряжений текучести в перемычке возникают, так называемые «шарниры пластичности».

В расчетной схеме авторы принимают, что участки перемычки между «шарнирами пластичности» ведут себя как жесткие диски и их перемещения происходят только за счет поворотов. На основании решения уравнения движения Лагранжа плиты и определены ее перемещения в центре в упругой и пластической стадиях, а также предельный угол поворота и время раскрытия трещины.

Недостатки работы [1] следующие. Авторы рассматривают круглую в плане перемычку, причем отмечают, что она является толстой плитой. Однако в настоящее время выработки имеют форму, в основном, в виде параболы или полуокружности, рассматривается плоская, а не трехмерная система. Задача решена в перемещениях, которые не являются критерием прочности перемычки, а также отсутствуют результаты теоретических и данные экспериментальных исследований. Поэтому приведенные данные о толщине перемычки в зависимости от сечения выработки являются научно не обоснованными.

Цель работы – раскрытие закономерностей напряженно-деформированного состояния взрывоустойчивой перемычки, на основании которых разработать математическую модель для определения ее толщины, обеспечивающую ее прочность при ликвидации аварии горноспасателями.

Основные задачи – разработка наиболее адекватной к реальной расчетной схеме и математической модели напряженно-деформированного состояния перемычки.

Рассмотрим наиболее обобщенную расчетную схему перемычки с проемными трубами в виде толстой пластины (плиты) с радиусом кривизны, меняющимся по параболическому закону, с заземленными краями по основному контуру и свободным краем в верхней части под действием нормальной нагрузки  $q_z$  и нагрузки  $q_x$  от веса пород, находящихся в зоне неупругих деформаций (рисунок 1).

Обозначим через  $u$ ,  $v$  и  $w$  перемещения точек срединной поверхности в направлениях  $x$ ,  $y$ ,  $z$ .

В связи со сложностью решения задачи в общей постановке, т.е. с учетом проемных труб, разобьем ее на две части: в первой – рассмотрим монолитную перемычку, во второй – перемычку с проемными трубами с учетом предыдущего решения и коэффициента динамичности воздействия нагрузки  $q_z$ . При этом напряжения с индексом «с» будем обозначать для монолитной перемычки, а «о» – для перемычки с проемными трубами.

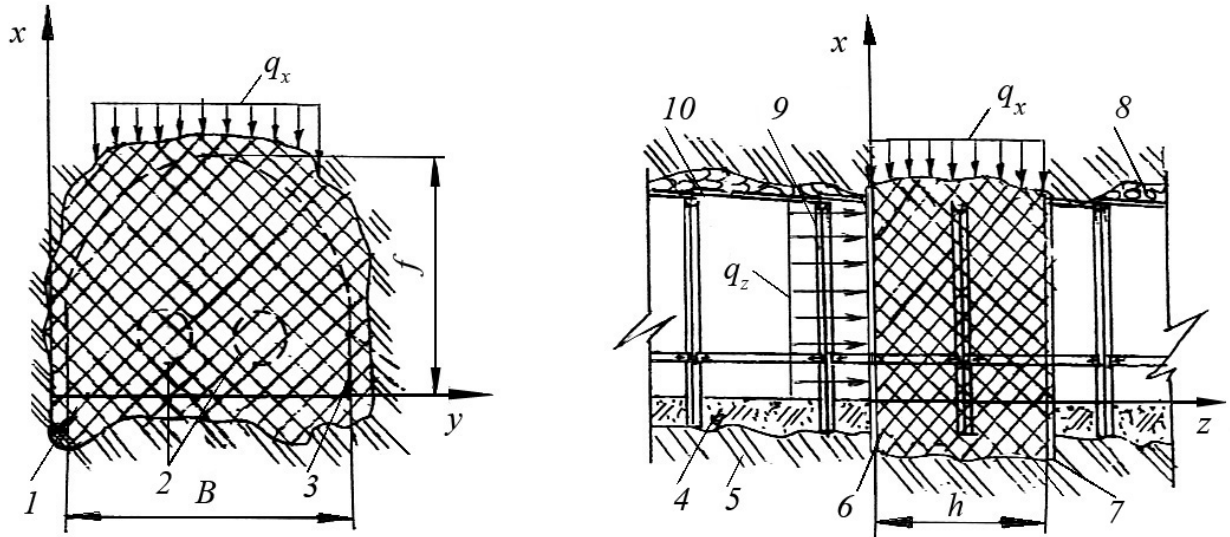


Рисунок 1 – Расчетная схема взрывоустойчивой перемычки

1 – наливная гипсовая перемычка, 2 – проемная труба, 3 – контур крепи в свету, 4 – подсыпка почвы выработки, 5 – монолитная порода, 6 – опалубка, 7 – контур вруба в зоне перемычки, 8 – закладка породой, 9 – металлическая арочная крепь, 10 – затяжка.

Для решения задачи на первом этапе используем прием, состоящий в представлении полного прогиба  $w$  в виде суммы двух составляющих – за счет изгиба  $w_0$  и сдвига  $w_1$

$$w = w_0 + w_1. \quad (1)$$

Деформации от изгиба и сдвига в любой точке плиты в предположении гипотезы прямых нормалей имеет вид [2]

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \varepsilon_1 + z\chi_1, \quad \varepsilon_y = \varepsilon_2 + z\chi_2, \\ \varepsilon_{xy} &= \varepsilon_{12} + 2z\tau, \quad \varepsilon_{xz} = \frac{\partial w_1}{\partial y}, \quad \varepsilon_{yz} = \frac{\partial w_1}{\partial x}. \end{aligned} \quad (2)$$

Параметры изменения кривизны в пределах точности технической теории

$$\chi_1 = -\frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 w_1}{\partial x^2}, \quad \chi_2 = -\frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 w_1}{\partial y^2}, \quad \tau = -\frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} - \frac{\partial^2 w_1}{\partial x \partial y}. \quad (3)$$

Деформации в срединной поверхности

$$\varepsilon_1 = \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{w_0}{R}, \quad \varepsilon_2 = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \varepsilon_{12} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}, \quad R = \frac{4fy}{B^2} (B - y), \quad (4)$$

где  $R$  – радиус кривизны перемычки, м.  
Поперечные силы имеют вид

$$Q_{13} = G_{13} h \varepsilon_{xz}, \quad Q_{23} = G_{23} h \varepsilon_{yz}, \quad (5)$$

где  $G_{13}, G_{23}$  – модули сдвига в направлениях  $xz$  и  $yz$ , МПа.

Изгибающий и крутящий моменты запишем в виде

$$M_1 = D_{11}\chi_1 + D_{12}\chi_2, \quad M_2 = D_{12}\chi_1 + D_{22}\chi_2, \quad M_{12} = 2D_{12}^*\tau. \quad (6)$$

Компоненты тензора напряжений имеют вид

$$\begin{aligned} \sigma_x^c &= B_{11}\varepsilon_1 + B_{12}\varepsilon_2 + z(B_{11}\chi_1 + B_{12}\chi_2), \\ \sigma_y^c &= B_{12}\varepsilon_1 + B_{22}\varepsilon_2 + z(B_{12}\chi_1 + B_{22}\chi_2), \\ \tau_{xy}^c &= B_{66}\varepsilon_{12} + 2zB_{66}\tau, \\ \tau_{xz}^c &= G_{13}\varepsilon_{xz}, \\ \tau_{yz}^c &= G_{23}\varepsilon_{yz}. \end{aligned} \quad (7)$$

Напряжениями  $\sigma_z^c$  пренебрегаем, в виду их малости.

В случае неучета жесткости металлической крепи, входящей в состав перемычки, т.е. считая ее изотропным телом, параметры в уравнениях (5)-(7) определяем по зависимостям

$$\begin{aligned} B_{11} = B_{22} &= \frac{E}{\Delta}, \quad B_{12} = \frac{\nu E}{\Delta}, \quad B_{66} = G, \quad \Delta = 1 - \nu^2, \\ D_{11} = D_{22} &= \frac{Eh^3}{12\Delta}, \quad D_{12} = \nu D_{11}, \quad D_{12}^* = G \frac{h^3}{12}, \quad G = \frac{E}{2(1 + \nu)}, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $\nu$  – коэффициент Пуассона;  
 $E$  – модуль упругости, МПа;  
 $G$  – модуль сдвига, МПа.

Внутренние усилия в срединной поверхности имеют вид

$$T_1 = C_{11}\varepsilon_1 + C_{12}\varepsilon_2, \quad T_2 = C_{12}\varepsilon_1 + C_{22}\varepsilon_2, \quad T_{12} = C_{12}^*\varepsilon_{12}, \quad (9)$$

где 
$$C_{11} = C_{22} = \frac{Eh}{\Delta}; \quad C_{12} = \nu C_{11}; \quad C_{12}^* = Gh. \quad (10)$$

Решая (9) относительно деформаций, имеем

$$\varepsilon_1 = A_{11}T_1 + A_{12}T_2, \quad \varepsilon_2 = A_{12}T_1 + A_{22}T_2, \quad \varepsilon_{12} = A_{12}^*T_{12}, \quad (11)$$

где 
$$A_{11} = \frac{C_{22}}{\Delta_1}, \quad A_{22} = \frac{C_{11}}{\Delta_1}, \quad A_{12} = -\frac{C_{12}}{\Delta_1}, \quad A_{12}^* = \frac{1}{C_{12}^*}, \quad \Delta_1 = C_{11}C_{22} - C_{12}^2. \quad (12)$$

В соответствии с принципом возможных перемещений вариация полной энергии деформированной оболочки равна нулю в состоянии равновесия

$$\delta\mathcal{E} = 0. \quad (13)$$

Вариацию полной энергии представим в виде

$$\delta\mathcal{E} = \delta U + \delta V, \quad (14)$$

где  $\delta U, \delta V$  – вариации потенциальной энергии пластины и потенциала внешних сил соответственно.

Вариацию потенциальной энергии от внешней нагрузки запишем в виде

$$\delta V = -\delta \iint q_z w \, ds - \delta \iint q_x u \, ds_1 . \quad (15)$$

Интегралы в этом выражении вычисляются в пределах:

$$\begin{aligned} 0 \leq x \leq R = \frac{4fy}{B^2}(B-y), 0 \leq y \leq 2R, 0 \leq z_1 \leq h, \\ 0 \leq y_1 \leq 2R, ds = dx dy, ds_1 = dz_1 dy_1, \end{aligned} \quad (16)$$

где  $s_1$  – площадь перемычки, на которую воздействует нагрузка  $q_x$ , м<sup>2</sup>.

Вариация потенциальной энергии оболочки может быть представлена как сумма вариаций энергии деформации изгиба  $\delta U_u$ , деформации срединной поверхности  $\delta U_c$  и деформации сдвига  $\delta U_{cd}$ :

$$\delta U = \delta U_u + \delta U_c + \delta U_{cd} , \quad (17)$$

где

$$\delta U_c = \iint (T_1 \delta \varepsilon_1 + T_2 \delta \varepsilon_2 + T_{12} \delta \varepsilon_{12}) \, ds , \quad (18)$$

$$\delta U_u = \iint (M_1 \delta \chi_1 + M_2 \delta \chi_2 + M_{12} \delta \tau) \, ds , \quad (19)$$

$$\delta U_{cd} = \iint (Q_{13} \delta \varepsilon_{xz} + Q_{23} \delta \varepsilon_{yz}) \, ds . \quad (20)$$

Преобразуя выражение (19) с учетом соотношения (6) и (20) – (5), получим

$$\delta U_u = \frac{1}{2} \delta \iint (D_{11} \chi_1^2 + 2D_{12} \chi_1 \chi_2 + D_{22} \chi_2^2 + 4D_{12}^* \tau^2) \, ds , \quad (21)$$

$$\delta U_{cd} = \frac{1}{2} h \delta \iint (G_{13} \varepsilon_{xz}^2 + G_{23} \varepsilon_{yz}^2) \, ds . \quad (22)$$

Выражение (18) представляем в виде

$$\delta U_c = \delta \iint (T_1 \varepsilon_1 + T_2 \varepsilon_2 + T_{12} \varepsilon_{12}) \, ds - \iint (\varepsilon_1 \delta T_1 + \varepsilon_2 \delta T_2 + \varepsilon_{12} \delta T_{12}) \, ds . \quad (23)$$

Подставляя деформации в срединной поверхности по формулам (11) и интегрируя по частям, преобразуем выражение

$$\begin{aligned} \delta I_1 = \delta \iint (T_1 \varepsilon_1 + T_2 \varepsilon_2 + T_{12} \varepsilon_{12}) \, ds - \delta \iint q_x u \, ds_1 = -\delta \iint \left( \frac{\partial}{\partial x} T_2 + \frac{\partial}{\partial y} T_{12} + q_x \right) u \, ds - \\ - \delta \iint \left( \frac{\partial}{\partial y} T_1 + \frac{\partial}{\partial x} T_{12} \right) v \, ds + \delta \iint \frac{1}{R} T_1 w \, ds . \end{aligned} \quad (24)$$

Введем функцию усилий  $\Phi$  в срединной поверхности с помощью соотношений:

$$T_1 = \Phi''_{xx} + U^*, T_2 = \Phi''_{yy}, T_{12} = -\Phi''_{xy}, \quad (25)$$

Здесь  $U^*$  – потенциал силы  $q_x$  в срединной поверхности, удовлетворяющей соотношению

$$q_x = -\frac{dU^*}{dx} . \quad (26)$$

Подставим выражения (25) в (24). Тогда первый и второй интегралы будут тождественно равны нулю и выражение (24) примет вид

$$\delta I_1 = \frac{1}{R} \delta \left[ - \iint \frac{\partial w_0}{\partial x} \frac{\partial \Phi}{\partial x} ds + \iint U^* w_0 ds \right] = \frac{1}{R} \delta \left[ \iint L(w_0, \Phi) ds + \iint U^* w_0 ds \right]. \quad (27)$$

Второй интеграл (23) с учетом зависимости (11) примет вид

$$\begin{aligned} \delta I_2 &= \iint (\varepsilon_1 \delta T_1 + \varepsilon_2 \delta T_2 + \varepsilon_{12} \delta T_{12}) ds = \\ &= \frac{1}{2} \delta \iint (A_{11} T_1^2 + 2A_{12} T_1 T_2 + A_{22} T_2^2 + A_{12}^* T_{12}^2) ds. \end{aligned} \quad (28)$$

Учитывая соотношения (21)-(24), (27), (28) и заменяя усилия в срединной поверхности их выражениями через функцию усилий  $\Phi$  по формулам (25), а изменения кривизны функциями прогибов  $w_0, w_1$  по формулам (3) для вариации полной энергии пластины получим

$$\delta \mathcal{E} = \delta \iint \left( \frac{1}{2} L_1(w_0, w_1) + \frac{1}{2} h L_2(w) + \frac{1}{2} L_3(\Phi) + \frac{1}{R} L(w_0, \Phi) + \left( \frac{U^*}{R} - q_z \right) w_0 \right) ds. \quad (29)$$

Здесь введены следующие обозначения

$$\begin{aligned} L_1(w_0, w_1) &= D_{11}((w_0)''_{xx} + (w_1)''_{xx})^2 + 2D_{12}((w_0)''_{xx} + (w_1)''_{xx})((w_0)''_{yy} + (w_1)''_{yy}) + \\ &\quad + D_{22}((w_0)''_{yy} + (w_1)''_{yy})^2 + 4D_{66}((w_0)''_{xy} + (w_1)''_{xy})^2, \\ L_2(w_1) &= G_{13}((w_1)'_x)^2 + G_{23}((w_1)'_y)^2, \\ L_3(\Phi) &= A_{11}(\Phi''_{xx} + U^*)^2 + 2A_{12}\Phi''_{yy}(\Phi''_{xx} + U^*) + A_{22}(\Phi''_{yy})^2 + A_{12}^*(\Phi''_{xy})^2, \\ L(w_0, \Phi) &= -(w_0)'_x \Phi'_x. \end{aligned} \quad (30)$$

Неизвестные функции  $w_0(x, y), w_1(x, y), \Phi(x, y)$  будем искать в виде:

$$w_0 = \sum_{j=1}^n a_j f_j(x) g_j(y), \quad (31)$$

$$w_1 = \sum_{j=1}^n c_j u_j(x) v_j(y), \quad (32)$$

$$\Phi = \sum_{i=1}^m b_i p_i(x) q_i(y). \quad (33)$$

Подставляя выражения (31)-(33) в (29) и приравнявая нулю производные от интеграла по параметрам  $a_l, c_l, b_k$ , получим  $m + 2n$  алгебраических уравнений относительно  $a_l, c_l (l = \overline{1, n})$  и  $b_k (k = \overline{1, m})$ .

Вводя безразмерные величины и константы по формулам

$$\begin{aligned} x &= f \bar{x}; y = B \bar{y}; z = h \bar{z}; t = \frac{f}{B}; s = \frac{h}{B}; w_0 = f \bar{w}_0; w_1 = f \bar{w}_1; U^* = U_0 \bar{U}^*; q_z = q_0 \bar{q}_z; q_x = \\ &= q_{0x} \bar{q}_x; \Phi = E h f^2 \bar{\Phi}; d_1 = \frac{D_{12}^*}{D_{11}}; h_1 = \frac{h f^2 G}{D_{11}}; h_2 = E h; r_0 = \frac{q_0 \bar{q}_z - \frac{U_0 \bar{U}^*}{R}}{D_{11}} f^3; r_1 = \frac{h_2 t^2 f^3}{R D_{11}}; r_2 = \\ &= \frac{f}{R}; R = \frac{B}{8t} (1 + 16t^2 (1 - \bar{x}))^2, \end{aligned} \quad (34)$$

получим следующую систему линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n a_j \iint \sum_{r=1}^{10} F_r G_r ds = \iint r_0 f_l g_l ds + \sum_{i=1}^m b_i \iint r_1 f_l' g_l' p_i' q_i ds; \\ \sum_{j=1}^n (c_j \iint \sum_{r=1}^7 U_r V_r ds + a_j \iint \sum_{r=1}^5 Y_r Z_r ds) = 0 \\ \sum_{i=1}^m b_i \iint \sum_{r=1}^7 P_r Q_r ds = \sum_{j=1}^n a_j \iint r_2 p_k' q_k f_j' g_j ds \end{cases} \quad (35)$$

где

$$\begin{aligned} F_1 = f_l'' f_j''; F_2 = f_l'' u_j''; F_3 = f_l'' f_j'; F_4 = f_l'' u_j'; F_5 = f_l f_j''; F_6 = f_l u_j''; F_7 = f_l f_j'; F_8 = f_l u_j'; F_9 = \\ f_l' f_j'; F_{10} = f_l' u_j'; G_1 = g_l g_j; G_2 = g_l v_j; G_3 = t^2 g_l g_j''; G_4 = t^2 v g_l v_j''; G_5 = t^2 v g_l' g_j'; G_6 = \\ t^2 v g_l'' v_j'; G_7 = t^4 g_l'' g_j''; G_8 = t^4 g_l'' v_j''; G_9 = 4t^2 d_1 g_l' g_j'; G_{10} = 4t^2 d_1 g_l' v_j'; U_1 = u_l'' u_j''; U_2 = \\ u_l'' u_j'; U_3 = u_l u_j''; U_4 = u_l u_j'; U_5 = u_l' u_j'; U_6 = u_l' u_j'; U_7 = u_l u_j'; Y_1 = u_l' f_j''; Y_2 = u_l' f_j'; Y_3 = \\ u_l f_j''; Y_4 = u_l f_j'; Y_5 = u_l' f_j'; V_1 = v_l v_j; V_2 = t^2 v v_l v_j''; V_3 = t^2 v v_l' v_j'; V_4 = t^4 v_l'' v_j''; V_5 = \\ 4t^2 d_1 v_l' v_j'; V_6 = h_1 v_l v_j; V_7 = h_1 v_l' v_j'; Z_1 = v_l g_j; Z_2 = t^2 v v_l g_j''; Z_3 = t^2 v v_l' g_j'; Z_4 = t^4 v_l'' g_j''; Z_5 = \\ 4t^2 d_1 v_l' g_j'; P_1 = p_k'' p_i''; P_2 = p_k p_i''; P_3 = p_k'' p_i'; P_4 = p_k p_i'; P_5 = p_k' p_i'; P_6 = p_k \bar{U}^*; P_7 = \\ p_k'' \bar{U}^*; Q_1 = q_k q_i; Q_2 = -t^2 v q_k'' q_i; Q_3 = -t^2 v q_k' q_i'; Q_4 = t^4 q_k'' q_i''; Q_5 = \frac{1}{2(1+v)} t^2 q_k' q_i'; Q_6 = \\ -t^2 v \frac{U_0}{h_2} q_k''; Q_7 = \frac{U_0}{h_2} q_k. \end{aligned} \quad (36)$$

Интегралы в уравнениях (35) вычисляются в пределах  $0 \leq \bar{x} \leq 4t\bar{y}(1 - \bar{y}); 0 \leq \bar{y} \leq 1$ .

Подставляя выражения (31)-(33) в (7), и учитывая (33), (3), (9), получим выражения для напряжений:

$$\begin{aligned} \sigma_x^c &= E \sum_{i=1}^m b_i p_i'' q_i + \frac{1}{h} U_0 \bar{U}^* - \frac{sE}{t\Delta} \bar{z} \sum_{j=1}^n (a_j f_j'' g_j + c_j u_j'' v_j + t^2 v (a_j f_j g_j'' + c_j u_j v_j'')), \\ \sigma_y^c &= \frac{E}{4} \sum_{i=1}^m b_i p_i q_i'' - \frac{sE}{t\Delta} \bar{z} \sum_{j=1}^n (v (a_j f_j'' g_j + c_j u_j'' v_j) + t^2 (a_j f_j g_j'' + c_j u_j v_j'')), \\ \tau_{xy}^c &= -tE \sum_{i=1}^m b_i p_i' q_i' - 2s\bar{z}G \sum_{j=1}^n (a_j f_j' g_j' + c_j u_j' v_j'), \\ \tau_{xz}^c &= G \sum_{j=1}^n c_j u_j' v_j, \\ \tau_{yz}^c &= tG \sum_{j=1}^n c_j u_j v_j'. \end{aligned} \quad (37)$$

Нагрузка на перемычку от пород, находящихся в зоне неупругих деформаций, зависит от их состояния в этой зоне. Заведомо несколько завышая нагрузку, будем считать, что породы в зоне неупругих деформаций потеряли связь с массивом и представляют собой сыпучую среду. Тогда перемычка будет испытывать давление от веса пород, заключенных в области, ограниченной квадратной параболой, т.е. давление на 1 м<sup>2</sup> поверхности перемычки будет равно:

$$q_x = \frac{2}{3} \gamma R \left[ 1 + \frac{b}{R} - \frac{\pi}{4} \right], b = 5,7R \left( \frac{\gamma H}{\sigma_{сж}} - 0,21 \right), \quad (38)$$

где  $\gamma$  - удельный вес пород ( $\gamma = 0,025 \frac{MH}{м^3}$ );

$b$  - размер зоны неупругих деформаций, м

$\sigma_{сж}$  - напряжение на сжатие пород ( $\sigma_{сж} = 30$  МПа);

$H$  - глубина расположения выработки, м

Тогда выражение для нагрузки примет вид

$$q_x = \frac{2}{3} \gamma \left[ 1 - \frac{\pi}{4} + 5,7 \left( \frac{\gamma H}{\sigma_{сж}} - 0,21 \right) \right] R, \quad (39)$$

$$a \quad \begin{aligned} q_{x0} &= \frac{2}{3} \gamma \left[ 1 - \frac{\pi}{4} + 5,7 \left( \frac{\gamma^H}{\sigma_{сж}} - 0,21 \right) \right] \\ \bar{q}_x &= R \end{aligned} \quad (40)$$

Используя зависимость (26), выражение для потенциала внешней нагрузки примет вид

$$U^* = \frac{q_{x0} b}{320 t^3} (1 + 16 t^2 (1 - \bar{x}))^{\frac{5}{2}}, \quad (41)$$

где

$$U_0 = \frac{q_{x0} b}{320 t^3}, \bar{U}^* = (1 + 16 t^2 (1 - \bar{x}))^{\frac{5}{2}}.$$

В качестве координатной системы можно выбрать функции, удовлетворяющие геометрическим граничным условиям (относительно функции и ее производной) по методу Ритца или всем условиям – Бубнову-Галеркину [3]. В данном случае приведем координатные функции в виде степенных рядов, удовлетворяющие второму условию, где в зависимостях (31)-(33)  $j = 1$ .

$$\begin{aligned} f_1 &= (x^4 - 4x^3 + 6x^2)/24, \quad g_1 = (y^4 - 2y^3 + y^2)/24; \quad u_1 = (x^2 - 2x)/2, \\ v_1 &= (y^2 - y)/2; \quad p_1 = (x^3 - 3x^2 + 5x - 1)/3, \quad q_1 = (y^2 - y + 1)/2. \end{aligned} \quad (42)$$

Таким образом, вышеприведенные зависимости (34), (35), (37), (41), (42) позволяют исследовать напряженное состояние монолитной гипсовой взрывоустойчивой перемычки, на основании результатов которых можно определить ее толщину.

**Выводы.** Рассмотрена наиболее адекватная к реальной расчетная схема взрывоустойчивой гипсовой перемычки. Разработана математическая модель напряженно-деформированного состояния монолитной перемычки, как основной части решения задачи, позволяющая определить ее толщину. Используя полученные результаты (напряжения), в дальнейшем необходимо исследовать напряженно-деформированное состояние взрывоустойчивой перемычки с учетом проемных труб и коэффициента динамичности воздействия нагрузки от ударной волны.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Расчет несущей способности монолитных перемычек при воздействии динамических нагрузок / [Н.В. Каледин, А.С. Омельченко, В.К. Крикуненко, Е.В. Курбацкий] // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. НИИГД.– Донецк, 2000.– С. 17-26.
2. Амбарцумян С.А. Теория анизотропных оболочек / С.А. Амбарцумян.– М.: Физматлит, 1961.– 384 с.
3. Михлин С.Г. Вариационные методы в математической физике / С.Г. Михлин.– М.: Гостехиздат, 1957.– 422 с.

