

УДК [622.868.42: 624.046]:[001.891.57:51]

В.Г. Агеев, канд. техн. наук, директор, И.Ф. Марийчук, канд. техн. наук, заваспирантурой НИИГД «Респиратор», Донецк

ПАРАМЕТРЫ ШАХТНОЙ ВЗРЫВОУСТОЙЧИВОЙ ПЕРЕМЫЧКИ

V.G. Ageyev, Cand. Sci. (Tech.), director, I.Ph. Mariychuk, Cand. Sci. (Tech.), postgraduate course head (NIIGD “Respirator”, Donetsk)

PARAMETERS OF A MINE EXPLOSION-PROOF STOPPING

Цель. Определение основной технической характеристики шахтной взрывоустойчивой перемычки с проемными трубами – толщины в зависимости от площади сечения и глубины расположения выработки, механических характеристик материала, внешних нагрузок от взрывной ударной волны и массы разрушенных горных пород кровли.

Методика. Теоретический метод исследования напряженно-деформированного состояния шахтной взрывоустойчивой перемычки, возводимой горноспасателями из строительного и высокопрочного пластифицированного гипсов, с использованием вариационного метода решения краевых задач теории упругости.

Результаты. Разработана математическая модель напряженно-деформированного состояния шахтной взрывоустойчивой перемычки с проемными трубами, представленной в виде толстой пластины с радиусом кривизны, который меняется по параболической зависимости, под действием нормальной и сжимающей нагрузок, три края которой жестко закреплены, четвертый – свободный; определено распределение максимальных напряжений в перемычке по относительным координатам в зависимости от ее толщины, механических характеристик гипса, действующих нагрузок, площади сечения и глубины расположения выработки; построены номограммы для определения толщин перемычек, значения которых, полученные при использовании математической модели, в среднем в 1,3 раза меньше, чем приведенные в нормативных документах.

Выводы. Результаты исследований позволили научно обосновать основную техническую характеристику взрывоустойчивой перемычки – толщину в зависимости от механических характеристик материала, условий нагружения, площади сечения и глубины расположения выработки, что обеспечит безопасную работу горноспасателей и снижение затрат при возведении перемычек во время ликвидации аварий при взрывах в угольных шахтах.

Ключевые слова: горная выработка, взрыв, перемычка, толщина, проемные трубы, гипс, механические характеристики, вариационный метод, напряжения, математическая модель.

Введение. Ежегодно в Украине горноспасатели возводят в среднем 26 перемычек, наиболее сложные из которых – взрывоустойчивые с проемными трубами, предназначенными для вентиляции пожарного участка горной выработки. В практике при сооружении или закрывании изолирующих перемычек были случаи разрушительных взрывов метана и других горных газов, в результате чего пострадали горноспасатели.

В нормативных документах приведены значения толщины взрывоустойчивой перемычки (далее – перемычки) в зависимости от площади сечения горной выработки и предельных значений напряжений на сжатие строительного и высокопрочного гипса, которые научно не обоснованы, так как получены на основании данных экспериментальных исследований для перемычки круглой формы и без проемных труб.

В работах [1–3] приведены математические модели напряженно-деформированного состояния соответственно: монолитной перемычки, которая не учитывает влияния проемных труб; перемычки с проемными трубами, однако с защемленными краями, т.е. без учета внешней нагрузки от разрушенных горных пород кровли; перемычки с учетом влияния проемных труб и нагрузки от разрушенных горных пород кровли, без получения зависимости толщины перемычки от площади сечения, глубины расположения выработки и механических характеристик гипсов.

Формулирование цели работы и постановка задач. Цель работы – определение основной технической характеристики шахтной взрывоустойчивой перемычки с проемными трубами – толщины в зависимости от площади сечения и глубины расположения выработки, механических характеристик материала, внешних нагрузок от воздушной ударной волны и разрушенных горных пород кровли.

Основные задачи – разработка математической модели напряженно-деформированного состояния перемычки и определение зависимости ее толщины от площади, глубины расположения выработки и механических характеристик гипсов.

Методы. Рассмотрим наиболее обобщенную расчетную схему перемычки с проемными трубами в виде толстой пластины (плиты) с радиусом кривизны, меняющимся по параболической зависимости, с защемленными краями по основному контуру и свободным краем в верхней части, находящейся под действием нормальной нагрузки q_z от воздушной ударной волны и сжимающей – q_x от разрушенных горных пород. Геометрические размеры перемычки: ширина B , максимальная высота f , толщина h , а при выводе основных уравнений будем исходить из допущений и зависимостей, приведенных в работе [3].

Представим полные компоненты напряжений σ и τ , МПа, в виде суммы напряжений (без указания нижних индексов):

$$\sigma = \sigma^c + \sigma^o ; \tau = \tau^c + \tau^o, \quad (1)$$

где индекс «с» указывает на отношение к монолитной перемычке, «о» – к перемычке с отверстиями.

Используя прием, состоящий в представлении полного прогиба пластины w в виде суммы двух составляющих – за счет изгиба w_0 и сдвига w_1 [3], а также основные соотношения для деформаций, параметров кривизны, поперечных сил, изгибающих и крутящего момента, вариацию полной энергии деформированной пластины опишем формулой

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

где введены обозначения, приведенные в работе [3].

Неизвестные функции $w_0(x, y)$, $w_1(x, y)$, $\Phi(x, y)$ будем искать по зависимостям

$$w_0 = \sum_{j=1}^n a_j f_j(x) g_j(y); \quad (3)$$

$$w_1 = \sum_{j=1}^n c_j u_j(x) v_j(y); \quad (4)$$

$$\Phi = \sum_{i=1}^m b_i p_i(x) q_i(y). \quad (5)$$

Подставляя выражения (3)-(5) в (2) 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

$$\left. \begin{aligned} x = f\bar{x}; y = B\bar{y}; z = h\bar{z}; t = \frac{f}{B}; s = \frac{h}{B}; w_0 = f\bar{w}_0; w_1 = f\bar{w}_1; U^* = U_0\bar{U}^*; \\ q_z = q_0\bar{q}_z; q_x = q_{0x}\bar{q}_x; \Phi = Ehf^2\bar{\Phi}; d_1 = \frac{D_{12}^*}{D_{11}}; h_1 = \frac{hf^2G}{D_{11}}; h_2 = Eh; \\ r_0 = \frac{q_0\bar{q}_z - \frac{U_0\bar{U}^*}{R}}{D_{11}} f^3; r_1 = \frac{h_2 t^2 f^3}{RD_{11}}; r_2 = \frac{f}{R}; R = \frac{B}{8t} (1 + 16t^2(1 - \bar{x}))^{\frac{3}{2}}, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

получим следующую систему линейных алгебраических уравнений:

$$\left\{ \begin{aligned} \sum_{j=1}^n a_j \iint \sum_{r=1}^{10} F_r G_r ds = \iint r_0 f_l g_l ds + \sum_{i=1}^m b_i \iint r_1 f'_i g_l p'_i q_i ds; \\ \sum_{j=1}^n (c_j \iint \sum_{r=1}^7 U_r V_r ds + a_j \iint \sum_{r=1}^5 Y_r Z_r ds) = 0; \\ \sum_{i=1}^m b_i \iint \sum_{r=1}^7 P_r Q_r ds = \sum_{j=1}^n a_j \iint r_2 p'_k q_k f'_j g_j ds, \end{aligned} \right. \quad (7)$$

где

$$\left. \begin{aligned} F_7 = f_l f_j; F_8 = f_l u_j; F_9 = f'_l f'_j; F_{10} = f'_l u'_j; \\ G_1 = g_l g_j; G_2 = g_l v_j; G_3 = t^2 g_l g'_j; G_4 = t^2 v g_l v'_j; G_5 = t^2 v g'_l g_j; G_6 = t^2 v g'_l v_j; \\ G_7 = t^4 g'_l g'_j; G_8 = t^4 g'_l v'_j; G_9 = 4t^2 d_1 g'_l g'_j; G_{10} = 4t^2 d_1 g'_l v'_j; \\ U_1 = u'_l u'_j; U_2 = u'_l u_j; U_3 = u_l u'_j; U_4 = u_l u_j; U_5 = u'_l u'_j; U_6 = u'_l u_j; U_7 = u_l u_j; \\ Y_1 = u'_l f'_j; Y_2 = u'_l f_j; Y_3 = u_l f'_j; Y_4 = u_l f_j; Y_5 = u'_l f'_j; \\ V_1 = v_l v_j; V_2 = t^2 v v_l v'_j; V_3 = t^2 v v'_l v_j; V_4 = t^4 v'_l v'_j; V_5 = 4t^2 d_1 v'_l v'_j; \\ V_6 = h_1 v_l v_j; V_7 = h_1 v'_l v'_j; \\ Z_1 = v_l g_j; Z_2 = t^2 v v_l g'_j; Z_3 = t^2 v v'_l g_j; Z_4 = t^4 v'_l g'_j; Z_5 = 4t^2 d_1 v'_l g'_j; \\ P_1 = p'_k p'_i; P_2 = p_k p'_i; P_3 = p'_k p_i; P_4 = p_k p_i; P_5 = p'_k p'_i; P_6 = p_k \bar{U}^*; P_7 = p'_k \bar{U}^*; \\ Q_1 = q_k q_i; Q_2 = -t^2 v q'_k q_i; Q_3 = -t^2 v q_k q'_i; Q_4 = t^4 q'_k q'_i; \\ Q_5 = \frac{1}{2(1+v)} t^2 q'_k q'_i; Q_6 = -t^2 v \frac{U_0}{h_2} q'_k; Q_7 = \frac{U_0}{h_2} q_k. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Интегралы в уравнениях (7) вычисляются в пределах $0 \leq \bar{x} \leq 4t\bar{y}(1 - \bar{y})$; $0 \leq \bar{y} \leq 1$, а штрихами обозначены краткие производные.

Выражения для напряжений имеют следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x^c &= E \sum_{i=1}^m b_i p_i'' q_i + \frac{1}{h} U_0 \bar{U}^* - \frac{sE}{t\Delta} \bar{z} \sum_{j=1}^n [a_j f_j'' g_j + c_j u_j'' v_j + t^2 v (a_j f_j g_j'' + c_j u_j v_j'')]] ; \\ \sigma_y^c &= \frac{E}{4} \sum_{i=1}^m b_i p_i q_i'' - \frac{sE}{t\Delta} \bar{z} \sum_{j=1}^n [v (a_j f_j'' g_j + c_j u_j'' v_j) + t^2 (a_j f_j g_j'' + c_j u_j v_j'')] ; \\ \tau_{xy}^c &= -tE \sum_{i=1}^m b_i p_i' q_i' - 2s\bar{z}G \sum_{j=1}^n (a_j f_j' g_j' + c_j u_j' v_j'), \left(-\frac{1}{2} \leq \bar{z} \leq \frac{1}{2}\right); \\ \tau_{xz}^c &= G \sum_{j=1}^n c_j u_j' v_j ; \\ \tau_{yz}^c &= tG \sum_{j=1}^n c_j u_j v_j'. \end{aligned} \right\} (9)$$

Напряжениями σ_z пренебрегаем ввиду их малости при $\varepsilon_z = 0$.

Нагрузку на перемычку от разрушенных горных пород кровли представим в виде

$$q_{0x} = \frac{2}{3} \gamma \left[1 - \frac{\pi}{4} + 5,7 \left(\frac{\gamma H}{\sigma_{сж}} - 0,21 \right) \right]; \quad \bar{q}_x = R, \quad (10)$$

где γ – удельный вес пород, МН/м³; $\gamma = 0,025$ МН/м³;

$\sigma_{сж}$ – напряжение на сжатие пород; $\sigma_{сж} = 30$ МПа;

H – глубина расположения выработки, м.

Выражение для потенциала внешней нагрузки имеет вид

$$U^* = \frac{q_{x0} b}{320t^3} (1 + 16t^2(1 - \bar{x}))^{\frac{5}{2}}; \quad U_0 = \frac{q_{x0} b}{320t^3}; \quad \bar{U}^* = (1 + 16t^2(1 - \bar{x}))^{\frac{5}{2}}. \quad (11)$$

В качестве координатной системы примем координатные функции в виде степенных рядов, точно удовлетворяющие всем условиям на контуре, где в зависимостях (3)-(5) $j = 1$ и учет влияния проемных труб на напряженное состояние перемычки примем аналогично работе [3].

Разработана структурная схема алгоритма решения задачи, позволяющая выносить на печать распределение максимальных напряжений в относительных координатах (0,1) в двумерном изображении.

В качестве максимальной нагрузки q_z принимаем ее значение, равное 2,8 МПа [2], а условием прочности – максимальные напряжения не должны превышать соответствующих предельных их значений. В конечном счете, определим основную техническую характеристику перемычки – толщину в зависимости от диапазона изменения механических характеристик гипса, сечения выработки с учетом ее максимальной глубины расположения с помощью номограмм и сравним ее значения с приведенными в нормативных документах.

Результаты. Используя алгоритм и программу решения задачи, получили результаты исследований максимальных напряжений в зависимости от вышеприведенных факторов и параметров, в частности, приведенные на рис. 1-3.

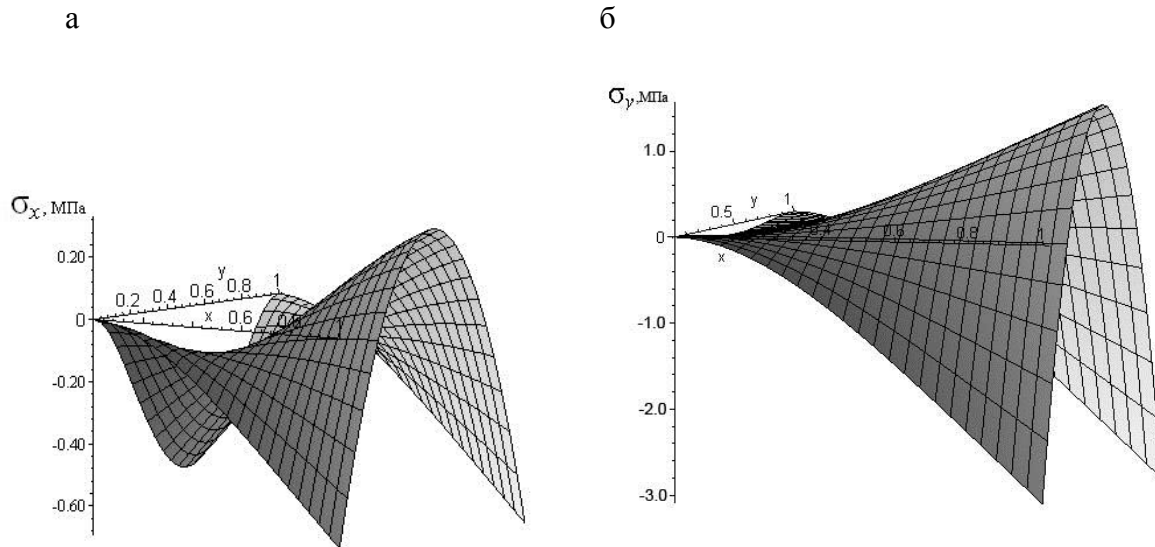


Рис. 1. Распределение нормальных напряжений в перемычке с заземленными краями по основному контуру, свободному краю в верхней ее части с нагрузкой q_z и механическими характеристиками для строительного гипса:

а – σ_x ; б – σ_y ; $S = 4 \text{ м}^2$; $q_z = 2,8 \text{ МПа}$; $h = 1,6 \text{ м}$; с учетом двух проемных труб с $R_0 = 0,8 \text{ м}$; $H = 1500 \text{ м}$

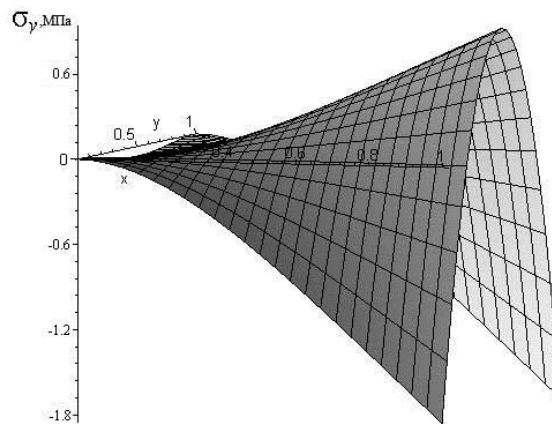


Рис. 2. Распределение максимальных напряжений σ_y в перемычке с заземленными краями по основному контуру, свободному краю в верхней ее части с нагрузкой q_z :

$S = 8 \text{ м}^2$; $q_z = 2,8 \text{ МПа}$; $h = 2,2 \text{ м}$; с учетом двух проемных труб с $R_0 = 0,8 \text{ м}$; $H = 1500 \text{ м}$ и механических характеристик для строительного гипса

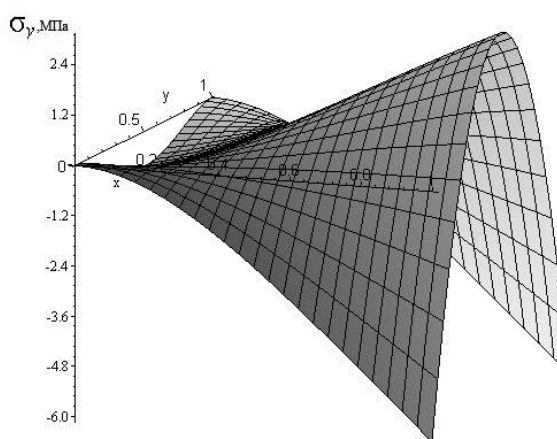


Рис. 3. Распределение максимальных напряжений σ_y в перемычке с заземленными краями по основному контуру, свободному краю в верхней ее части с нагрузкой q_z :

$S = 30 \text{ м}^2$; $q_z = 2,8 \text{ МПа}$; $h = 4,5 \text{ м}$; с учетом двух проемных труб с $R_0 = 0,8 \text{ м}$; $H = 1500 \text{ м}$ и механических характеристик для высокопрочного пластифицированного гипса

На основании результатов, приведенных на рис. 1, следует, что максимальными напряжениями являются сжимающие σ_y , возникающие в заземленных угловых точках верхней части перемычки, причем условие ее прочности не выполняется, так как предельное значение $\sigma_{\text{псж}} = 3,0 \text{ МПа}$. Выполняется это условие для перемычки при площади сечения выработки 8 м^2 и больше, расположенной на максимальной глубине 1500 м (см. рис. 2).

Для перемычки с предельными значениями на сжатие гипса свыше $3,0$ и $9,0 \text{ МПа}$ сжимающие напряжения также не превышают своих значений. В частности, для перемычки, расположенной на глубине 1500 м и выполненной из высокопрочного пластифицированного гипса со следующими механическими характеристиками: модуль упругости $E = 6,77 \cdot 10^3 \text{ МПа}$, коэффициент Пуассона $\nu = 0,28$ с предельным напряжением на сжатия $\sigma_{\text{псж}} = 12,2 \text{ МПа}$, условия прочности также выполняются (см. рис. 3).

Результаты исследований показывают, что при возведении перемычек в выработках с площадью сечения от 4 до 8 м^2 можно использовать одну проемную трубу диаметром $0,8 \text{ м}$, а с большим сечением – две трубы, причем запас прочности составляет от $1,7$ до $2,0$.

Полученные результаты исследований прочности перемычек позволили разработать номограммы для определения основной их технической характеристики – толщины (рис. 4, 5).

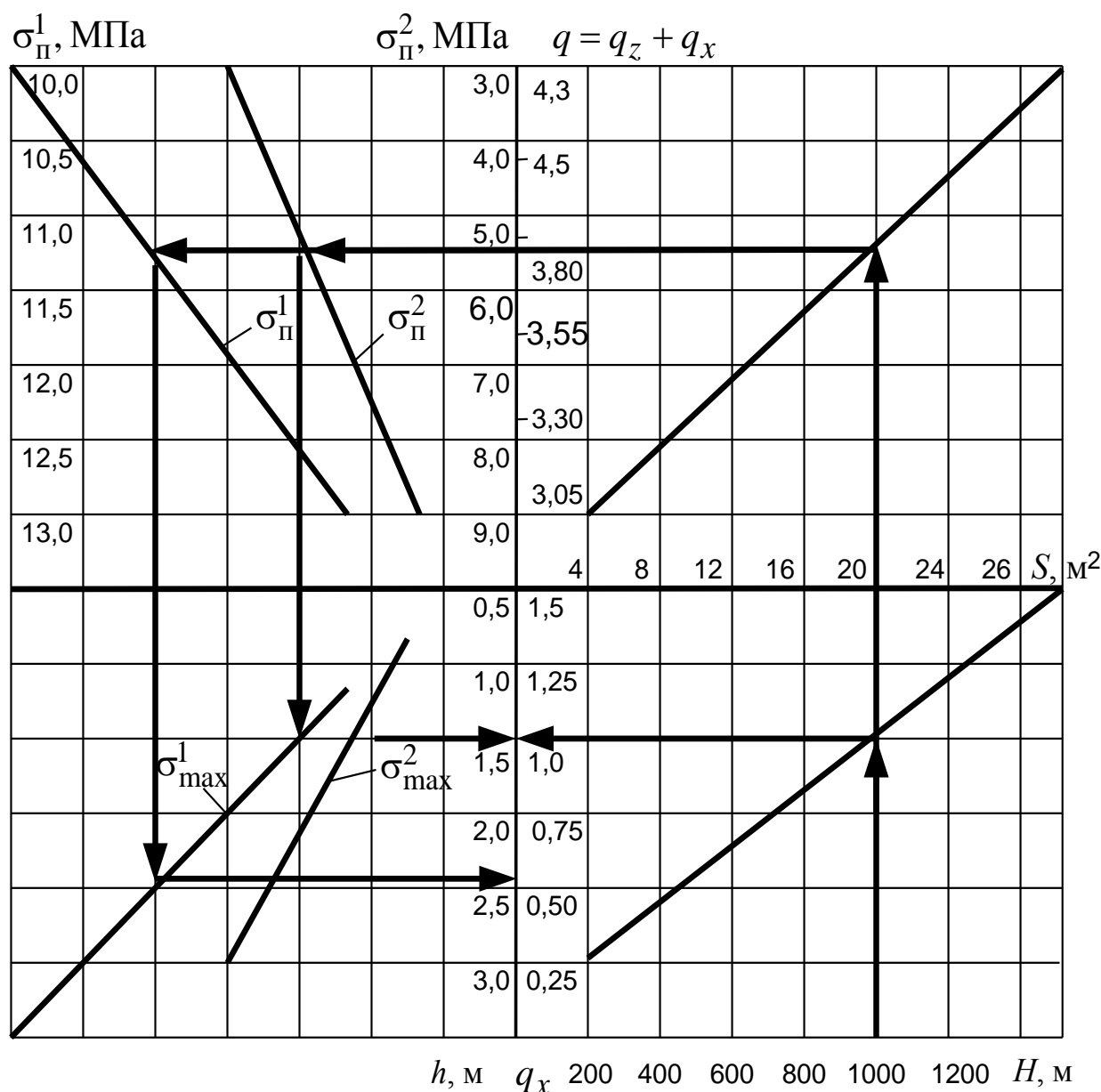


Рис. 4. Номограмма для определения толщины взрывоустойчивой перегородки h в зависимости от глубины возведения H , площади сечения выработки S , нагрузки q , предельного напряжения на прочность материала σ_n , максимального напряжения σ_{\max} :

q_z – нагрузка от ударной взрывной волны ($q_z = 2,8$ МПа); q_x – нагрузка от разрушенных горных пород кровли; $\sigma_n^1, \sigma_{\max}^1$ – напряжения для перегородки, выполненной из строительного гипса; $\sigma_n^2, \sigma_{\max}^2$ – напряжения для перегородки, выполненной из высокопрочного пластифицированного гипса; $\sigma_{\max} = \sigma_n^1/2$

Примечание: в выработке с площадью сечения от 4 до 8 м² необходимо применять одну проемную трубу диаметром 0,8 м.

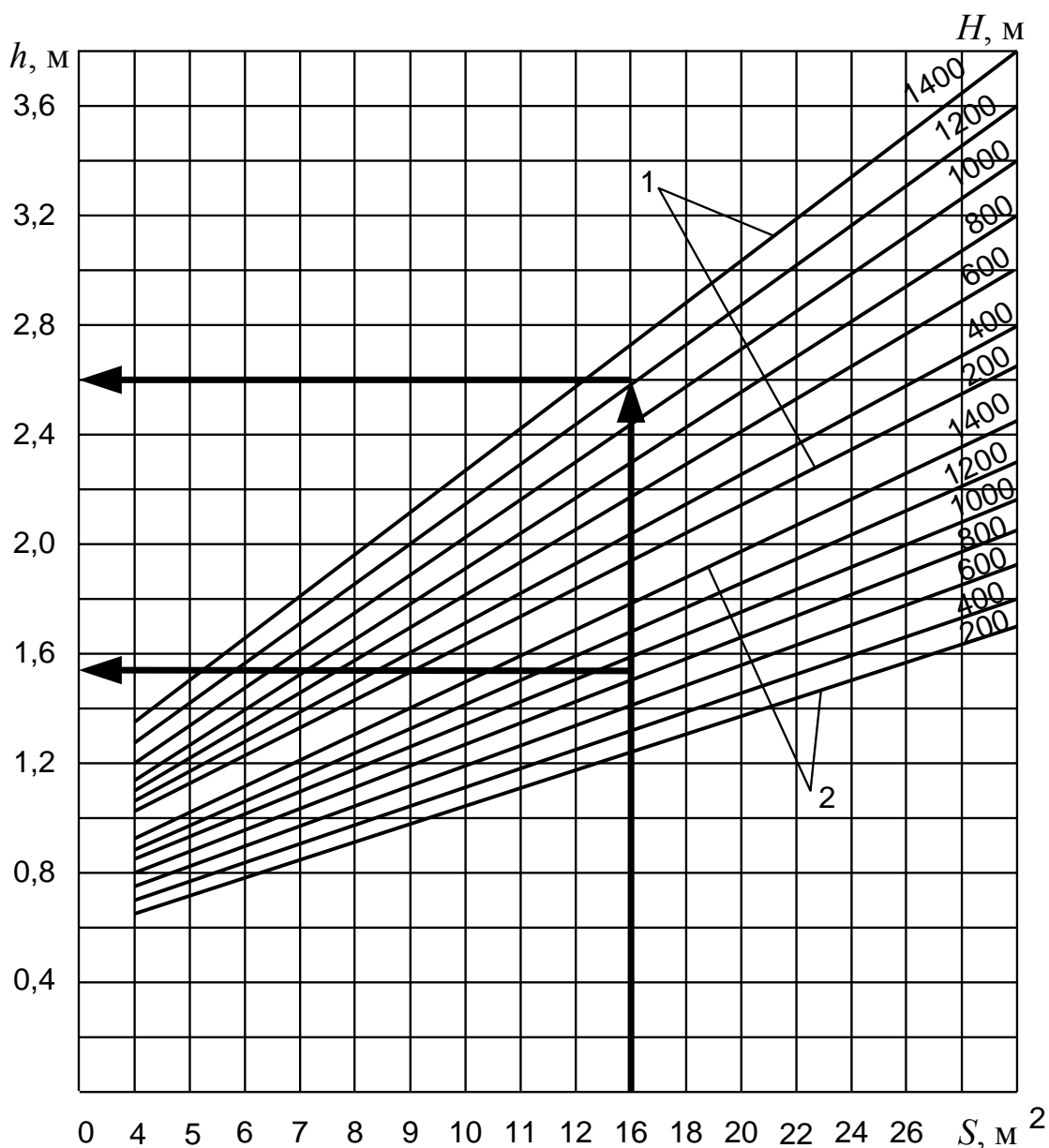


Рис. 5. Номограмма для определения толщины взрывоустойчивой перемычки h в зависимости от площади сечения выработки S , глубины возведения H , предельного напряжения на прочность материала σ_n :
 1 – $3,0 \leq \sigma_n \leq 9,0$ МПа (строительный гипс); 2 – $\sigma_n > 9,0$ МПа (высокопрочный пластифицированный гипс)

Выводы и рекомендации. На основании математической модели напряженно-деформированного состояния взрывоустойчивой перемычки получены значения максимальных напряжений, которые позволили разработать номограммы для определения основной технической характеристики перемычки – толщины в зависимости от площади сечения и глубины расположения выработки, механических характеристик гипсов. Значение

толщины перемычки в среднем в 1,3 раза меньше по сравнению с теми, которые приведены в нормативных документах, что дает возможность сократить материальные расходы при ведении горноспасателями аварийных работ, обеспечивая их безопасность при взрывах в угольных шахтах; учитывая значительную длительность использования перемычек, в дальнейшем необходимо учесть зависимость их прочности от ползучести материала (гипсов), т. е. когда его деформации зависят от времени.

Список литературы / References

1. Агеев В.Г. Математическая модель напряженно-деформированного состояния шахтной взрывоустойчивой монолитной перемычки / В.Г. Агеев. – Науковий вісник УкрНДІПБ. – 2012. – № 1. – С. 103 – 109.

Ageyev, V.G. (2012), *Matematicheskaia model napriazhenno-deformirovannogo sostoianiia shakhtnoi vzryvoustoichivoi monolitnoi peremychki* [The mathematical model of the deflected mode of the mine explosion-proof monolithic stopping], UkrNDIPB, Ukraine.

2. Агеев В.Г. Динамическое напряженно-деформированное состояние взрывоустойчивой перемычки / В.Г. Агеев, И.Ф. Марийчук // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – 2013. – Вып.50. – С. 7 – 15.

Ageyev, V.G. and Mariychuk, I.Ph. (2013), *Dinamicheskoe napriazhenno-deformirovannoe sostoianie vzryvoustoichivoi peremychki* [Dynamic deflected mode of the mine explosion-proof stopping], NIIGD «Respirator», Donetsk, Ukraine.

3. Агеев В.Г. Математическое моделирование напряженного состояния шахтной взрывоустойчивой перемычки / В.Г. Агеев, И.Ф. Марийчук // ВІТР, vol.31, iss. 3, 2013, pp. 33-39, Poland.

Ageyev, V.G. and Mariychuk, I.Ph. (2013), *Matematicheskoe modelirovanie napriazhenno-deformirovannogo sostoianiia shakhtnoi vzryvoustoichivoi peremychki* [The mathematical modeling of the deflected mode of the mine explosion-proof stopping], ВІТР, vol.31, iss. 3, 2013, pp. 33-39, Poland.

Мета. Визначення основної технічної характеристики шахтної вибухостійкої перемички з прорізними трубами – товщини залежно від площі перерізу і глибини розташування виробки, механічних характеристик матеріалу, зовнішніх навантажень від вибухової ударної хвилі і маси зруйнованих гірничих порід покрівлі.

Методика. Теоретичний метод досліджень напружено-деформованого стану шахтної вибухостійкої перемички, що зводиться гірничорятувальниками з будівельного і високоміцного пластифікованого гіпсу, з використанням варіаційного метода рішення крайових задач теорії пружності.

Результати. Розроблена математична модель напружено-деформованого стану шахтної вибухостійкої перемички з прорізними трубами, представленої у вигляді товстої пластини з радіусом кривизни, що міняється по параболічній залежності, під дією нормального і стискаючого навантаження, три краї якої жорстко закріплені, четвертий – вільний; визначені розподіли максимальної напруги в перемичці по відносних координатах залежно від її товщини, механічних характеристик гіпсу, діючих навантажень, площі перерізу і глибини розташування виробки; побудовані номограми для визначення товщини перемичок, значення яких, отримані при використанні розробленої математичної моделі, в середньому в 1,3 разу менші, ніж приведені в нормативних документах.

Висновки. Результати досліджень дозволили науково обґрунтувати основну технічну характеристику вибухостійкої перемички – товщину залежно від механічних характеристик матеріалу, умов вантаження, площі перерізу і глибини розташування виробки, що забезпечить безпечну роботу гірничорятувальників і зниження витрат при зведенні перемичок в результаті ліквідації аварій при вибухах у вугільних шахтах.

Ключові слова: гірничя виробка, вибух, перемичка, товщина, прорізні труби, гіпс.

Purpose. Determination of the basic technical characteristic of the mine explosion-proof stopping with opening pipes, i.e. thickness, depending on area of section and depth of disposition of a mine working, mechanical characteristics of a material, external loads associated with the explosion shock wave and mass of the broken rocks of the roof.

Methodology. The theoretical method of investigation of the deflected mode of the mine explosion-proof stopping being erected by the mine rescuers from the building and high-strength plasticized gypsums with the use of the variation method of solution of the boundary problems of the theory of elasticity.

Results. The mathematical model of the deflected mode of the mine explosion-proof stopping with the opening pipes presented in the form of a thick plate with the radius of curvature that changes according to the parabolic dependence under the influence of the normal and compression loads has been developed (three ends of this plate are fixed rigidly, and the fourth one is free); the distribution of the maximum tensions in the stopping is determined depending on its thickness, mechanical characteristics of gypsum, acting loads, area of section and depth of disposition of the mine working by the differential co-ordinates; the nomograms to determine the thicknesses of the stoppings which values received by the use of the mathematical model are on the average 1.3 times less than the values adduced in the normative documents are plotted down.

Findings. The results of the investigations permitted us to scientifically substantiate the basic technical characteristic of the mine explosion-proof stopping, i.e. thickness, depending on mechanical characteristics of the material, conditions of the loading, area of section and depth of disposition of the mine working, what will guarantee the safe work of the mine rescuers and reduction in expenditure by erection of the stoppings during accident elimination by explosions in the coal mines.

Keywords: mine working, explosion, stopping, thickness, opening pipes, gypsum, mechanical characteristics, variation method, tensions, mathematical model.