

УДК 622.831

Определение параметров металлической призабойной крепи на концевых участках лав

Соловьев Г. И., Толкачев А. Ф., Паниотов Ю. Н., Формос В. Ф.

Донецкий национальный технический университет, Донецк, Украина

Аннотация

Обеспечение устойчивости подготовительных выработок в зоне интенсивного влияния очистных работ является важным условием эффективного использования современных механизированных комплексов. Поставлена и решена задача расчета балки-стенки на упругих опорах методом конечных разностей. Полученное решение позволяет выбирать необходимые силовые параметры применяемой на концевом участке лавы индивидуальной крепи и деформационные характеристики жестких опорных конструкций возводимых вдоль подготовительной выработки вслед за очистным забоем.

1. Определение усилий в металлических стойках – опорах балки-стенки

Обеспечение устойчивости подготовительных выработок в зоне интенсивного влияния очистных работ является важным условием эффективного использования современных механизированных комплексов. Применяемые в настоящее время средства крепления и способы поддержания подготовительных выработок глубоких шахт не позволяют сохранить их устойчивость в зоне опорного давления, что приводит к необходимости выполнения большого объема ремонтных работ.

Для поддержания выемочных выработок глубоких шахт в зоне опорного давления необходимо применение комбинированных способов их охраны и средств крепления, которые бы позволили обеспечить минимизацию смещений боковых пород за счет оптимизации режимов совместной работы системы «боковые породы – крепь выработки – опорные конструкции концевых участков лав».

Одним из перспективных направлений обеспечения устойчивости подготовительных выработок глубоких шахт, как показала опытно-промышленная проверка, является применение комбинированной арочно-анкерной крепи [1–3], а также жесткой продольной связи комплектов крепи по длине выработки [4–6].

Концевой участок лавы (рис. 1) является одним из наиболее важных и сложных звеньев угледобычи, предопределяющих успешную работу очистного забоя. Суммарные трудозатраты выполнения технологических процессов на участках верхнего и нижнего сопряжений очистного забоя составляют около 50 % общей трудоемкости работ в лаве [7].

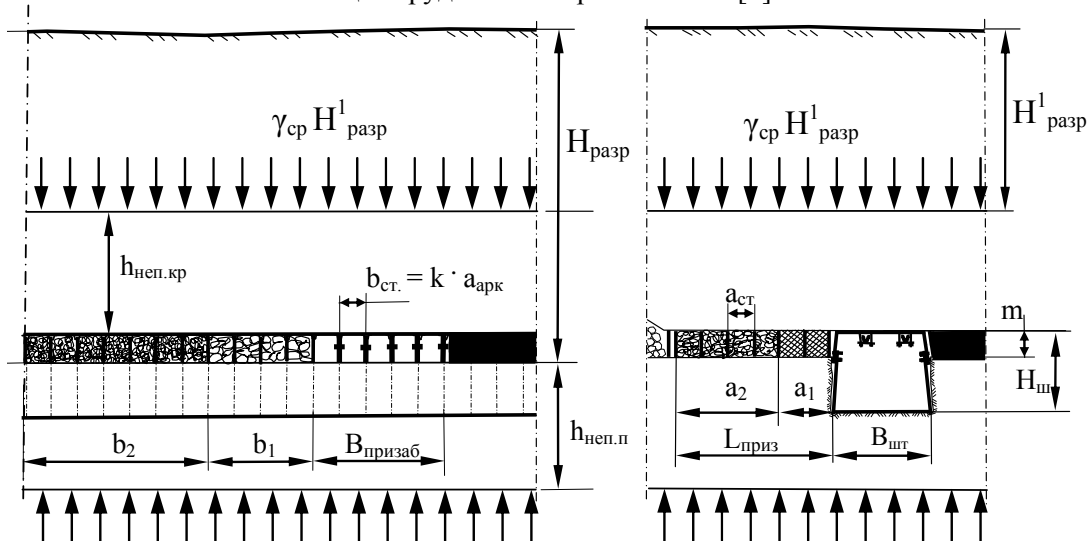


Рис. 1. Схема концевых участков лавы

Как показывают ранее проведенные исследования [1, 7, 8], определение технологических и геомеханических параметров концевых участков лав не поддается строгой аналитической формализации из-за сложности учета изменчивости структурно-литологических характеристик боковых пород и пространственно-временного характера протекания деформационных процессов в горном массиве.

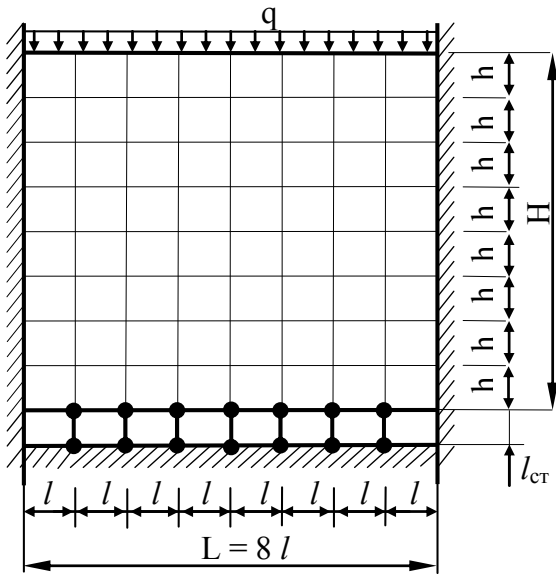


Рис. 2. Схема балки-стенки на упругих опорах (стойках)

Применение методов механики сплошной среды при решении задач о напряженно-деформированном состоянии боковых пород на концевом участке лав сопряжено с необходимостью принятия ряда идеализаций о сплошности горного массива

Для расчета балки-стенки на упругих опорах (рис. 2) методом конечных разностей (методом сеток, [9]) надо знать реакции упругих опор на нижнем контуре балки-стенки, которые можно определить, используя метод сил [10].

Как показано в исследованиях С. Н. Клепикова [11] для определения перемещений в точках нижнего контура балки-стенки можно с достаточной степенью точности (4–10 %) применить формулы сопротивления материалов (метод начальных параметров, формулу Мора или правило Верещагина) для расчета обычных балок, но с обязательным учетом перемещений от

поперечных сил (рис. 3, а).

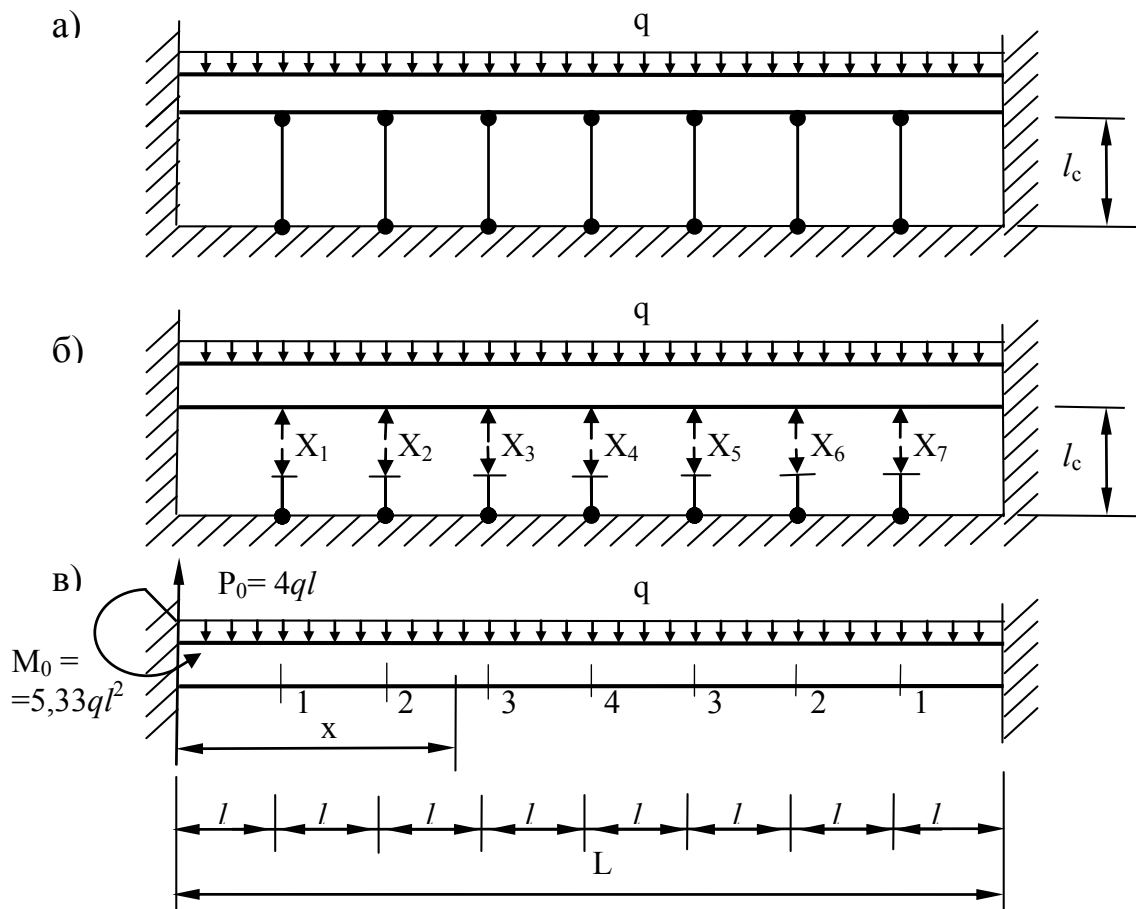


Рис. 3. Расчетная схема определения реакции упругих опор (стоек) от балки-стенки

Тогда методом сил можно определить реакции упругих опор (стоек) от воздействия на них балки-стенки – силы $X_1, X_2, X_3,$ и X_4 , учитывая симметрию относительно вертикальной оси.

На рис. 3, б показана основная (эквивалентная) система. Система канонических уравнений метода сил запишется в виде:

$$\begin{cases} \delta_{11} X_1 + \delta_{12} X_2 + \delta_{13} X_3 + \delta_{14} X_4 + \Delta_{1p} = 0, \\ \delta_{21} X_1 + \delta_{22} X_2 + \delta_{23} X_3 + \delta_{24} X_4 + \Delta_{2p} = 0, \\ \delta_{31} X_1 + \delta_{32} X_2 + \delta_{33} X_3 + \delta_{34} X_4 + \Delta_{3p} = 0, \\ \delta_{41} X_1 + \delta_{42} X_2 + \delta_{43} X_3 + \delta_{44} X_4 + \Delta_{4p} = 0. \end{cases} \quad (1)$$

Смысл каждого уравнения системы (1) заключается в том, что взаимное перемещение концов разрезанного стержня или стойки (упругой опоры) по направлению сил X_1, X_2, X_3, X_4 и заданной распределенной нагрузки равно нулю.

Грузовые коэффициенты Δ_{ip} зависят от изгибающих моментов $\Delta_{ip}(M_{изг})$ и поперечных сил $\Delta_{ip}(N_{поп})$, т.е.

$$\Delta_{ip} = \Delta_{ip}(M_{изг}) + \Delta_{ip}(N_{поп}) \quad (2)$$

где слагаемое, зависящее от изгибающих моментов можно определить методом начальных параметров:

$$EI \Delta_{ip}(M) = -M_0 \frac{x_i^2}{2} + P_0 \frac{x_i^3}{6} - 24 \frac{x_i^4}{24}, \quad (3)$$

где из условий $x = L = 8l$, $\alpha(L) = \frac{d\Delta_{ip}(M)}{dx} = 0$ и $\Delta_{ip}(M) = 0$, находим начальные параметры при $L = 8l$ (рис. 2, в):

$$M_0 = \frac{ql^2}{12} = \frac{16}{3} ql^2; P_0 = \frac{ql}{2} = 4ql. \quad (4)$$

Окончательное уравнение перемещений от изгибающих моментов запишется в виде:

$$\Delta_{ip}(M) = -24 \frac{ql^4}{EI} (64 \bar{x}_i^2 - 16 \bar{x}_i^3 + \bar{x}_i^4) = \frac{ql^4}{24EI} \bar{x}_i^2 [16(\bar{x}_i - 4) - \bar{x}_i^2], \quad (5)$$

или
$$\Delta_{ip}(M) = \frac{ql^4}{EI} \bar{\Delta}_{ip}(M) \quad (5')$$

где $\bar{\Delta}_{ip}(M) = \frac{\bar{x}_i^2}{24} [16(\bar{x}_i - 4) - \bar{x}_i^2]$ – безразмерное перемещение;

$\bar{x}_i = \frac{x_i}{l} = i$ – безразмерная координата точки приложения силы X_i .

В результате численного решения уравнения (4) получим:

$$\begin{cases} \Delta_{1p}(M) = -2,041(6) \frac{ql^4}{EI}, \\ \Delta_{2p}(M) = -6,0 \frac{ql^4}{EI}, \\ \Delta_{3p}(M) = -9,375 \frac{ql^4}{EI}, \\ \Delta_{4p}(M) = -10,(6) \frac{ql^4}{EI}. \end{cases} \quad (6)$$

Второе слагаемое в формуле (2), зависящее от поперечной силы, проще всего определить по правилу Верещагина [10]:

$$\Delta_{ip}(Q) = \sum \eta \frac{\omega(Q) Q_{1c}}{GF}, \quad (7)$$

где η – коэффициент неравномерности распределения касательных напряжений при изгибе, зависящий от формы поперечного сечения стержня; для прямоугольного стержня $\eta = 1,2$;

$$\eta = \frac{F}{I_z^2} \int_h \frac{S_z^2(y)}{b_y} dy \quad (8)$$

$\omega(Q)$ – площадь эпюры поперечных сил Q на рассматриваемом участке (рис. 4, а);

Q_{1c} – величина поперечной силы на единичной эпюре Q_i под центром тяжести грузовой эпюры (в данном случае $Q_{1c} = -1$, рис. 4, б).

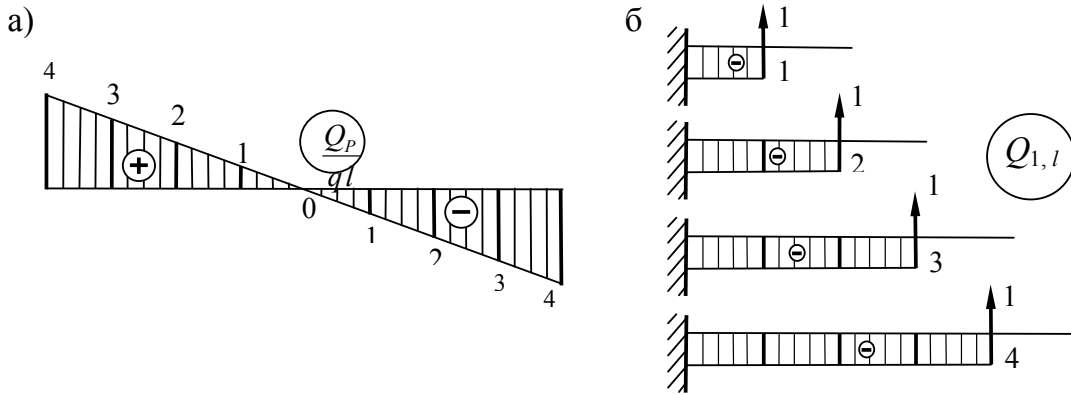


Рис. 4. Расчетная схема для определения грузовых коэффициентов от продольных сил по правилу Верещагина

Таким образом, после преобразования (с учетом рис. 3, а) выражения (7) примет вид:

$$\Delta_{ip}(Q) = -\frac{ql^2}{GF} \cdot \frac{\eta \cdot i}{2} (8-i) = \frac{ql^4}{EI} \cdot \frac{EI}{l^2 GF} \cdot \frac{\eta \cdot i}{2} (8-i),$$

учитывая, что $I = \frac{bH^3}{12}$, $F = b \cdot H$, $G = \frac{E}{2(1+\mu)}$, где μ – коэффициент Пуассона, при $\eta = 1,2$ получим:

$$\bar{\Delta}_{1p}(Q) = -\frac{EI}{l^2 GF} 0,6i(8-i) = -\frac{1+\mu}{6} \left(\frac{H}{l}\right)^2 0,6i(8-i) \quad (8)$$

При $\mu = 0,2$, $H = 8$ м, $l = 1$ м:

$$\Delta_{ip}(Q) = \frac{ql^4}{EI} \cdot \bar{\Delta}_{1p}(Q), \text{ где } \bar{\Delta}_{1p}(Q) = -7,68i(8-i). \quad (8')$$

Отсюда:

$$\Delta_{1p}(Q) = -53,76 \frac{ql^4}{EI}, \Delta_{2p}(Q) = -92,16 \frac{ql^4}{EI}, \Delta_{3p}(Q) = -115,2 \frac{ql^4}{EI}, \Delta_{4p}(Q) = -122,88 \frac{ql^4}{EI}, \quad (9)$$

Тогда по формуле (2) получим грузовые коэффициенты:

$$\Delta_{1p} = -55,801(6) \frac{ql^4}{EI}, \Delta_{2p} = -98,16 \frac{ql^4}{EI}, \Delta_{3p} = -124,575 \frac{ql^4}{EI}, \Delta_{4p} = -133,54(6) \frac{ql^4}{EI}, \quad (10)$$

Единичные коэффициенты δ_{ik} системы (1) зависят от изгибающих моментов $\delta_{ik}(M)$ и поперечных сил $\delta_{ik}(Q)$, а главные – от продольных сил в упругих стойках $\delta_{ii}(N)$:

$$\delta_{ik} = \delta_{ik}(M) + \delta_{ik}(Q), \quad \delta_{ii} = \delta_{ii}(M) + \delta_{ii}(Q) + \delta_{ii}(N), \quad (11)$$

Первые слагаемые $\delta_{ik}(M)$ в выражениях (11) можно определить методом начальных параметров (рис. 5):

$$EI \delta_{ik}(M) = M_0(k) \frac{x_i^2}{2} - P_0(k) \frac{x_i^3}{6} + \frac{1 \cdot (x_i - a_k)^3}{6},$$

или:
$$\delta_{ik}(M) = \frac{l^3}{EI} \left[M_0(k) \frac{i^2}{2} - P_0(k) \frac{i^3}{6} + \frac{(i - a_k)^3}{6} \right] = \frac{l^3}{EI} \bar{\delta}_{ik}(M), \quad (12)$$

где
$$M_0(k) = l \bar{M}_0(k) = \frac{k(8-k)^2}{64} \cdot l, \quad (13)$$

Изгибающие моменты в любом сечении определяются как:

$$M(x_i) = M_0(k) - P_0(k) x_i + 1(x_i - a_i) \quad (14)$$

– поперечные силы:

$$Q(x_i) = -P_0(k) + 1. \quad (15)$$

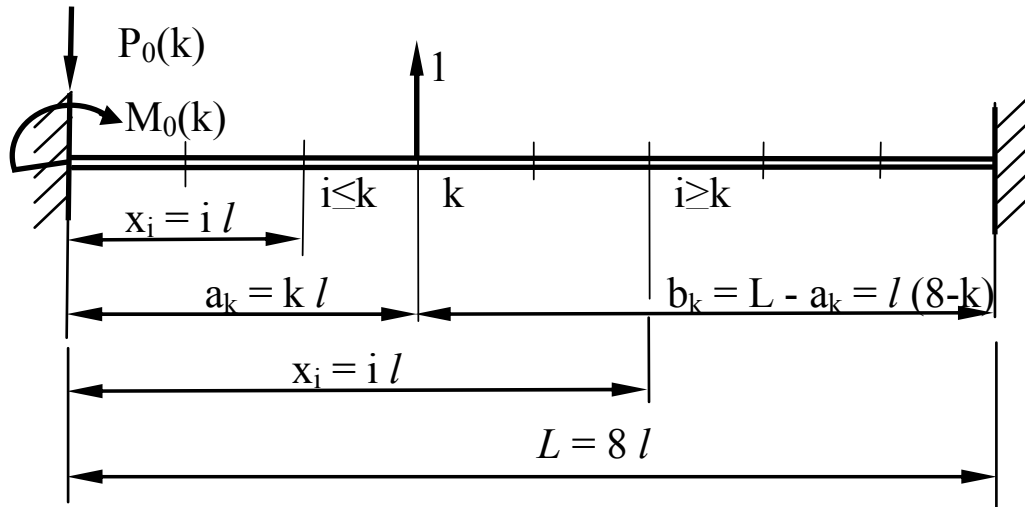


Рис. 5. Расчетная схема для определения изгибающих моментов и поперечных сил методом начальных параметров

Последние слагаемые в формулах (12, 14 и 15) учитываются правее единичной силы, т.е. при $i > k$.

Определив значения начальных изгибающих моментов $\bar{M}_0(k)$, реакций $P_0(k)$ и единичных коэффициентов $\bar{\delta}_{ik}$ по формулам (12, 13), согласно выражениям (14, 15) вычисляем значения изгибающих моментов $M(x_i)$ и поперечных сил $Q(x_i)$, результаты которых представлены на рис 6.

Значения единичных коэффициентов $\bar{\delta}_{ik}(M) = \bar{\delta}_{ki}(M)$ представлены в табл. 1.

Табл. 1. Значения единичных коэффициентов $\bar{\delta}_{ik}(M) = \bar{\delta}_{ki}(M)$

$\bar{\delta}_{ik}(M)$ li	1	2	3	4	5	6	7
1	0,2233073	0,421875	0,472005	0,41(6)	0,298828	0,161458	0,047527
2	0,421875	1,125	1,4322917	1,(3)	0,984375	0,541(6)	0,161458
3	0,472005	1,4322917	2,1972657	2,25	1,7402353	0,984375	0,298828
4	0,41(6)	1,(3)	2,25	2,(6)	2,25	1,(3)	0,41(6)
5	0,298828	0,984375	1,7402353	2,25	2,1972657	1,4322917	0,472005
6	0,161458	0,541(6)	0,984375	1,(3)	1,4322917	1,125	0,421875
7	0,047527	0,298828	0,298828	0,41(6)	0,472005	0,421875	0,2233073

Второе слагаемое коэффициентов выражения (11) получим по правилу Верещагина на основании эпюр поперечных сил от единичных сил (рис. 5) и формулы (7):

$$\delta_{ik}(Q) = \frac{1}{GF} \cdot \eta [P_0(i) \cdot i \cdot l \cdot P_0(k) - P_0(k) l (k-i) (1-P_0(i)) + (8-k) l \cdot (1-P_0(i)) (1-P_0(k))], \quad (16)$$

или (8 и 8'):

$$\delta_{ik}(Q) = \frac{l^3}{EI} \cdot \bar{\delta}_{ik}(Q); \quad \bar{\delta}_{ik}(Q) = \frac{\eta}{6} \cdot (1+\mu) \left(\frac{H}{l}\right)^2 \{P_0(k) [k P_0(i) - 1] + i\} + (8-k)(1-P_0(k)), \quad (17)$$

здесь: $\frac{\eta}{6} (1+\mu) \left(\frac{H}{l}\right)^2 = \frac{1,2}{6} (1+0,2) \left(\frac{8}{1}\right)^2 = 15,36.$

Результаты вычислений вторых слагаемых в формуле (11), выполненные по формуле (17), представлены в табл. 2.

Табл. 2. Значения единичных коэффициентов $\bar{\delta}_{ik}(Q) = \bar{\delta}_{ki}(Q)$

$l_i \backslash \bar{\delta}_{ik}(Q)$	1	2	3	4	5	6	7
1	14,266875	12,465	10,190625	7,68	5,169375	2,895	1,093125
2	12,465	24,12	19,875	15,36	10,845	6,6	2,895
3	10,190625	19,875	29,221875	23,04	16,858125	10,845	5,169375
4	7,68	15,36	23,04	30,72	23,04	15,36	7,68
5	5,169375	10,845	16,858125	23,04	29,221875	19,875	10,190625
6	2,895	6,6	10,845	15,36	19,875	24,12	12,465
7	1,093125	2,895	5,169375	7,68	10,190625	12,465	14,266875

Результаты вычислений единичных коэффициентов формулы (11) представлены в табл. 3.

Табл. 3. Значения единичных коэффициентов $\bar{\delta}_{ik} = \bar{\delta}_{ik}(M) + \bar{\delta}_{ik}(Q)$

$li \backslash \bar{\delta}_{ik}$	1	2	3	4	5	6	7
1	14,490182	12,886875	10,66263	8,09(6)	5,468203	3,056458	1,140652
2	12,886875	25,245	21,307292	16,69(3)	11,829375	7,141(6)	3,056458
3	10,66263	21,307292	31,419140	25,29	18,598360	11,829375	5,468203
4	8,09(6)	16,69(3)	25,29	33,38(6)	25,29	15,36	7,68
5	5,468203	11,829375	18,598360	25,29	31,419140	21,307292	10,66263
6	3,056458	7,141(6)	11,829375	15,36	21,307292	24,12	12,886875
7	1,140652	3,056458	7,68	7,68	10,66263	12,886875	14,490182

Последнее слагаемое коэффициентов $\bar{\delta}_{ii}(N)$ выражения (11) представляет собой деформацию металлической стойки (рис. 6).

Применяя закон Гука, получим:

$$\delta_{ii}(N) = \frac{1 \cdot l_{cm}}{E_{cm} \cdot F_{cm}}, \quad (18)$$

или, имея ввиду дальнейшее суммирование по формуле (11), получим:

$$\delta_{ii}(N) = \frac{l^3}{E \cdot I} \bar{\delta}_{ii}(N); \quad \bar{\delta}_{ii}(N) = \frac{E}{E_{cm}} \cdot \frac{I}{F_{cm}} \cdot \frac{l_{cm}}{l^3} \quad (19)$$

Модуль упругости материала балки-стенки – породы $E = 0,1 \cdot 10^5$ МПа, модуль упругости стали $E_{ст} = 2 \cdot 10^5$ МПа; $l = 1$ м – расстояние между стойками крепи, $l_{ст} = 1,3$ м.

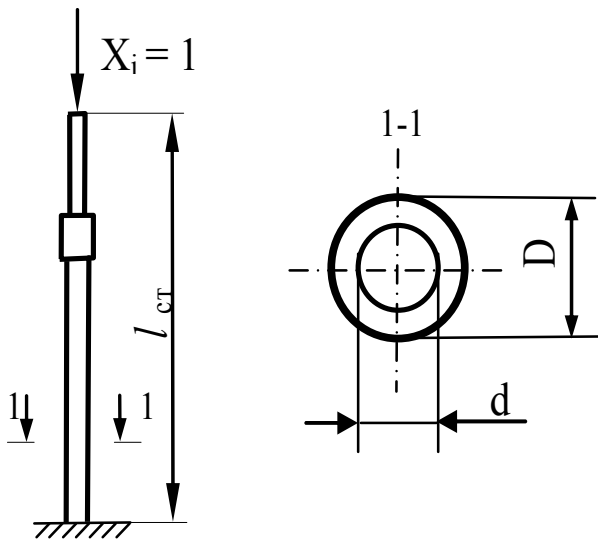


Рис. 6. Расчетная схема металлической стойки

Площадь поперечного сечения металлической стойки (при $D_{ст} = 0,14$ м, $d_{ст} = 0,10$ м, рис. 6) $F_{ст} = (D^2 - d^2) \cdot \pi/4 = (0,14^2 - 0,1^2) \cdot 3,14/4 = 0,007536$ м².

$$I_{б-см} = \frac{bH^3}{12} = \frac{1 \cdot 8^3}{12} = 42,6 \text{ м}^4.$$

Тогда по формуле (19) получим:

$$\bar{\delta}_{ii}(N) = \frac{0,1 \cdot 10^5}{2 \cdot 10^5} \cdot \frac{42,6}{0,007536} \cdot \frac{1,3}{1} = 368. \quad (20)$$

Добавляя это значение к главным коэффициентам от изгиба балки-стенки единичными силами (табл. 3) и учитывая симметрию, т. е. $X_1 = X_7$, $X_2 = X_6$, $X_3 = X_5$, получим систему четырех уравнений метода сил (1) в числовом виде:

$$\begin{cases} 76,933514 X_1 + 15,94(3) X_2 + 16,1308(3) X_3 + 8,09(6) X_4 = 55,801(6) ql, \\ 15,94 X_1 + 93,894347 X_2 + 33,13(6) X_3 + 16,69(3) X_4 = 98,16 ql, \\ 16,1308(3) X_1 + 33,13(6) X_2 + 111,32018 X_3 + 25,29 X_4 = 124,575 ql, \\ 8,09(6) X_1 + 16,69(3) X_2 + 25,29 X_3 + 47,344673 X_4 = 66,73(3) ql. \end{cases} \quad (21)$$

В результате решения системы (21) получим:

$$\begin{aligned} X_1 = X_7 &= 0,37235 ql, \\ X_2 = X_6 &= 0,59524 ql, \\ X_3 = X_5 &= 0,71663 ql, \\ X_4 &= 0,75401 ql. \end{aligned} \quad (22)$$

Эпюры изгибающих моментов и поперечных сил представлены на рис. 7, 8.

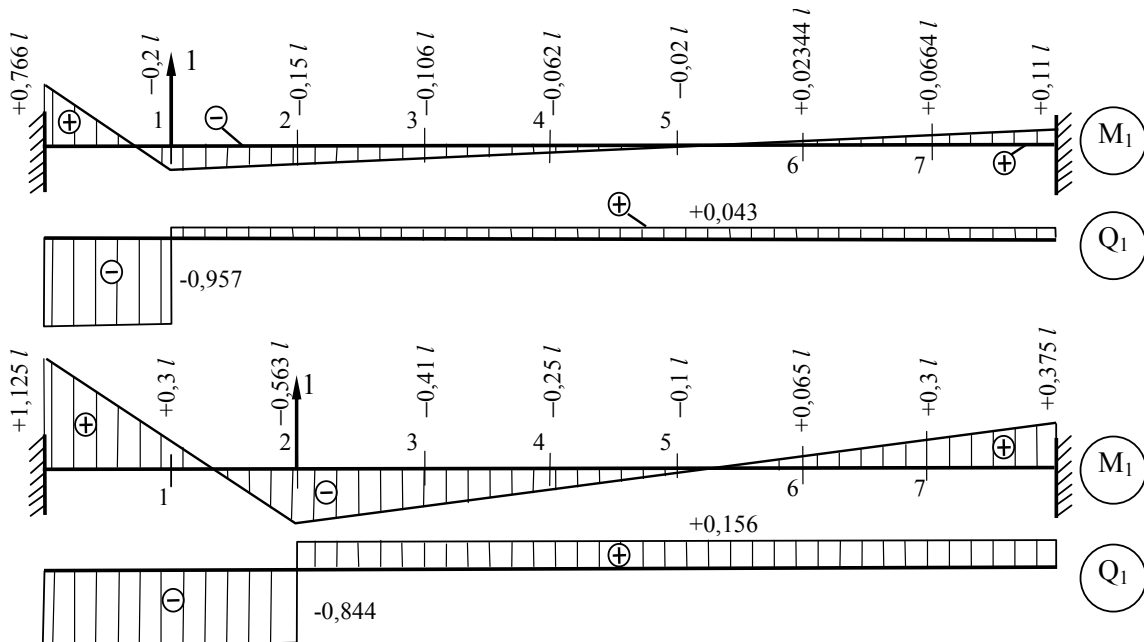


Рис. 7. Эпюры изгибающих моментов и продольных сил

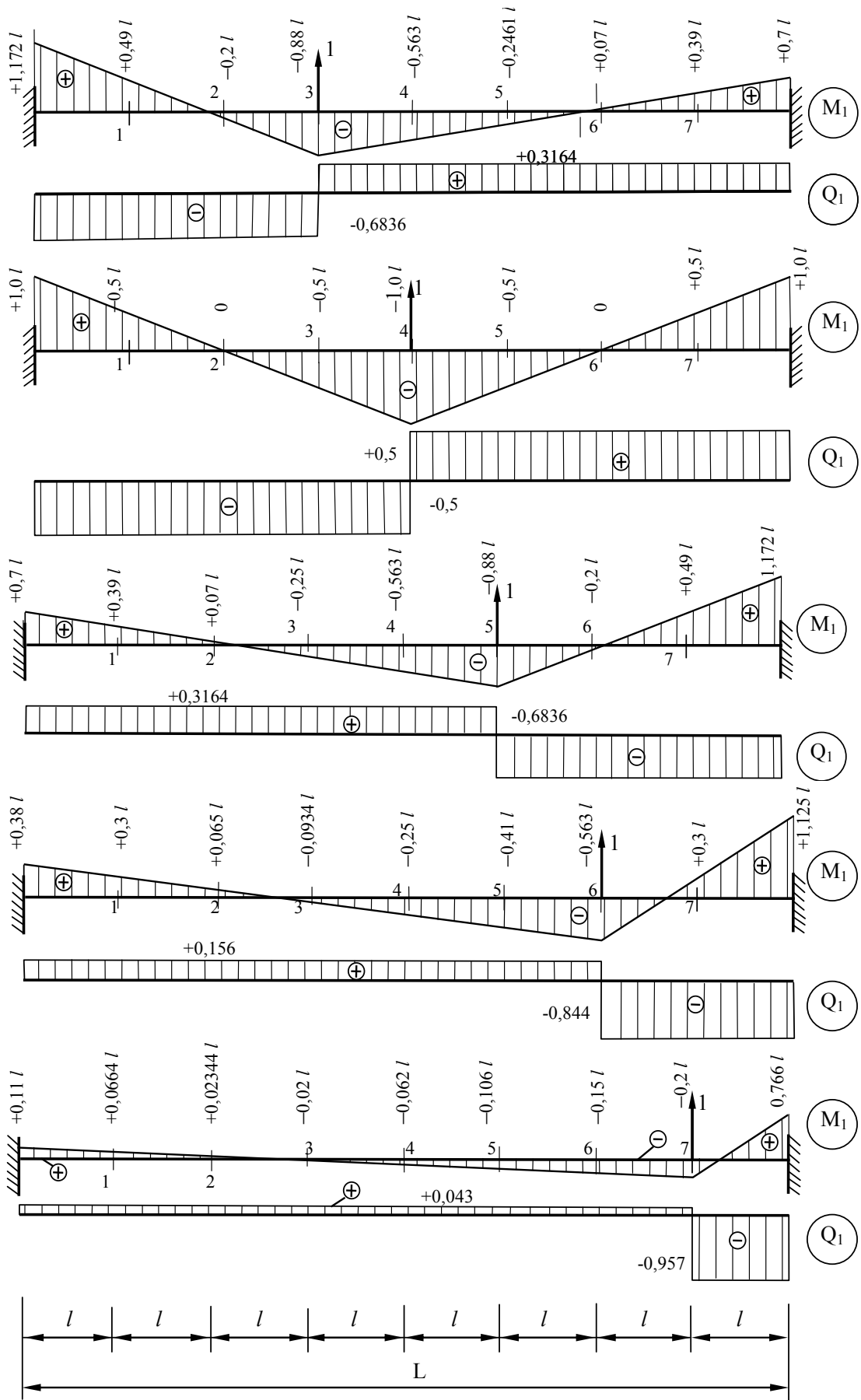


Рис. 8. Эпюры изгибающих моментов и продольных сил

Таким образом, решение поставленной задачи позволяет определить реакции упругих опор на нижнем контуре балки стенки или пород кровли. Полученное решение позволяет выбирать необходимые силовые параметры применяемой на концевом участке лавы индивидуальной крепи и деформационные характеристики жестких опорных конструкций возводимых вдоль подготовительной выработки вслед за очистным забоем.

Библиографический список

1. Бондаренко Ю. В., Татьянченко А. Г., Соловьев Г. И., Захаров В. С. Разработка математической модели процесса деформирования контура выработки при использовании каркасной крепи усиления // Известия Донецкого горного института. 1998. №2. С. 92–96.
2. Бондаренко Ю. В., Соловьев Г. И., Кублицкий Е. В., Петренко А. В. Определение параметров жестко-каркасного усиления крепи выемочной выработки // Геотехнологии на рубеже XXI века. – Донецк: ДУНПГО. 2001. Т1. – С. 68–74.
3. Бондаренко Ю. В., Соловьев Г. И., Кублицкий Е. В., Демин И. К. О физической модели взаимодействия каркасной усиливающей крепи выемочной выработки с вмещающими породами // Горный информационно-аналитический бюллетень Московского государственного горного университета. 2002. №6. С. 183–187.
4. Соловьев Г. И., Панфилов Ю. Н., Толкачев А. Ф., Малышева Н. Н. Определение рациональных параметров арочной крепи с усиливающим сегментом жесткости // Вісті Донецького гірничого інституту, №1, 2005 р., С. 39–46.
5. Соловьев Г. И. Определение параметров продольно-жесткой усиливающей крепи для выемочных выработок глубоких шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень, МГГУ, Москва. №9, 2005 г. С. 230–233.
6. Соловьев Г. И. Особенности физической модели самоорганизации боковых пород на контуре выемочной выработки при продольно-жестком усилении арочной крепи // Науковий вісник НГУ, Дніпропетровськ. 2006, №1. С. 11–18.
7. Каретников В. Н., Клейменов В. Б., Нуждихин А. Г. Крепление капитальных и подготовительных горных выработок. Справочник. – М.: Недра, 1989. – 571с.
8. Литвинский Г. Г., Гайко Г. И., Кулдыркаев М. И. Стальные рамные крепи горных выработок. – К.: Техніка, 1999. – 216с.
9. Справочник по теории упругости (для инженеров-строителей). Под ред. П. М. Варвака и А. Ф. Рябова. Будівельник, К.: – 1971, 426 с.
10. Писаренко Г. С., и др. Соппротивление материалов. К.: Вища школа, – 1986. 776 с.
11. Клепиков С. Н. Расчет конструкции на упругом основании. Будівельник, К.: – 1967, 184 с.
12. Жемочкин Б. Н. Теория упругости. ГОСИЗДАТ по строительству и архитектуре. М.: – 1957. 256 с.

© Соловьев Г. И., Толкачев А. Ф., Паниотов Ю. Н., Формос В. Ф., 2008.