

УДК 622.831.31:622.833.52

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОДОЛЬНО-БАЛОЧНОЙ КРЕПИ УСИЛЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-АНАЛИТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Панин Ф. В., студент гр. РПМ-14,
Бабак А. А., студент гр. РПМск-16,
Соловьев Г. И., канд. техн. наук, доцент, науч. рук.,
Саулин В. К., ст. преп.
(ГОУВПО «ДОННТУ» г. Донецк, ДНР)

Представлены результаты аналитических исследований по определению параметров продольно-балочной крепи усиления с использованием метода начальных параметров. Установлено, что применение жесткой продольной связи комплектов основной крепи позволяет за счет жесткости балки перераспределить повышенную нагрузку с одного перегруженного комплекта крепи между шестью соседними комплектами.

Ключевые слова: крепь усиления, продольная балка, подготовительная выработка, смещения пород кровли и почвы, метод начальных параметров, изгибающий момент, эпюра

Актуальность работы. Одним из весьма затратных звеньев в технологической схеме угольной шахты является обеспечение устойчивости подготовительных выработок, поддерживаемых в зонах повышенного горного давления.

Горная наука в сотрудничестве с инженерно-техническими сотрудниками угольных шахт предложила и проверила в практических условиях большое количество технологических решений, направленных на совершенствование способов и средств поддержания и охраны подготовительных выработок. Одним из таких решений является применение крепей усиления, которые устанавливаются на локальных участках поддерживаемых выработок и позволяют снизить повышенную нагрузку на интенсивно деформирующуюся основную крепь выработок.

В настоящее время для усиления основной крепи поддерживаемых в зоне влияния очистных работ подготовительных выра-

боток используются различные виды крепей усиления, которые условно можно разделить на три группы [1–7].

Первую группу представляют индивидуальные деревянные или металлические стойки, устанавливаемые под верхняк каждой рамы крепи, а по почве на отрезок деревянной шпалы на расстоянии 50–60 м перед лавой и извлекаемые для повторного использования на расстоянии 50 м вслед за лавой. Ко второй группе относятся инвентарные крепи многоразового использования, например, гидравлические стойки или составные стойки трения из отрезков СВП, устанавливаемые под одиночные или спаренные прогоны под верхняки основной крепи на сопряжении выработки с лавой.

В третью группу входят механизированные крепи сопряжений.

При использовании вышеперечисленных крепей усиления (особенно крепей третьей группы) их установка приводит к загромождению выработки и создает существенные помехи при выполнении транспортных операций и ремонте выработок.

Для устранения перечисленных недостатков сотрудники кафедры РПМ ГОУ ВПО «ДонНТУ» предложена продольно-балочную крепь усиления, которая представляет собой одну или две продольные балки из отрезков спецпрофля СВП27 (СВП-33) длиной по 4,5 м, которые соединяются между собой внахлест на 0,5 м двумя стандартными хомутами и подвешиваются к каждому верхняку основной крепи выработки на крючьях с планками, болтами и гайками [8–11].

Опыт применения данной крепи усиления на ряде глубоких шахт Донбасса, таких как «Южнодонецкая №3», им. М.И. Калинина, им. А.А. Скочинского, им. Е. Т. Абакумова, «Коммунарская» и «Щегловская-Глубокая» ПАО «Шахтоуправление «Донбасс», показал, что продольно-балочная связь комплектов крепи по длине выработки позволяет снизить величину вертикальных и горизонтальных смещений боковых пород на контуре выемочных выработок соответственно в 2,2–2,5 и в 1,6–1,8 раза за счет перераспределения повышенной нагрузки между комплектами крепи.

Цель работы заключается в определении количества комплектов основной крепи, участвующих в перераспределении повышенной нагрузки по длине выработки, при их связи жесткой продольной балкой.

Основное содержание работы. Продольно-балочную крепь усиления рассмотрим как многопролетную балку с величиной пролета равной шагу установки крепи [9]. На балку действует распределенная нагрузка на среднем пролете (рис. 1).

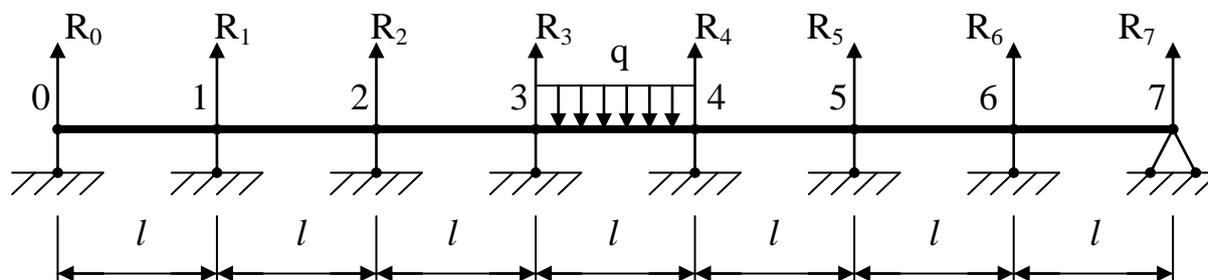


Рис. 1. Схема нагружения многопролетной балки

Определим действующие в балке изгибающие моменты и построим их эпюры при $EI = const$, $l_i = l$, рассматривая поочередно 1, 3, 5 и 7 пролеты.

Рассмотрим однопролетную статически определимую балку (рис. 2) под воздействием равномерной нагрузки q .

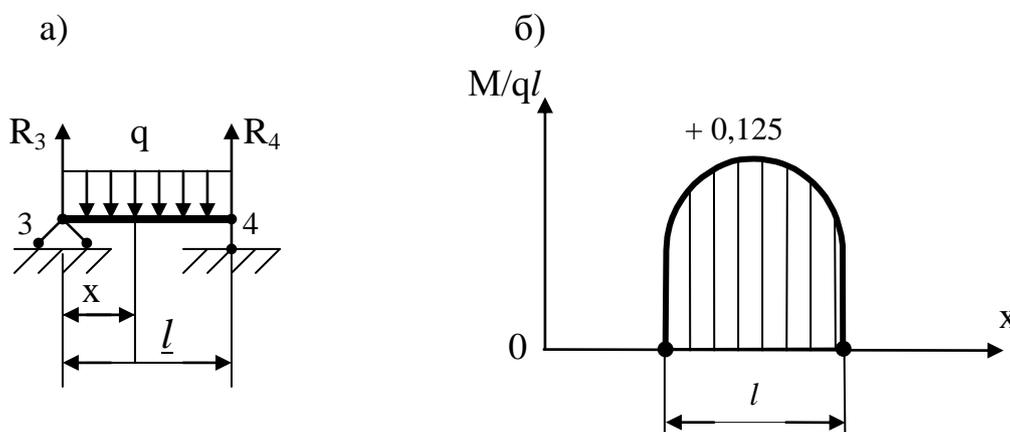


Рис. 2. Схема нагружения (а) и эпюра изгибающего момента (б) однопролетной балки

Реакция опор однопролетной балки (рис. 2 а) составит:

$$R_3 = R_4 = \frac{ql}{2}, \quad (1)$$

а величина изгибающего момента (рис. 2 б) будет равна:

$$M(x) = R_3 x - \frac{qx^2}{2}. \quad (2)$$

Максимальный изгибающий момент будет действовать по середине балки и его величина составит:

$$M(x) = \frac{ql^2}{2}. \quad (3)$$

Далее рассмотрим трехпролетную балку под воздействием равномерной нагрузки q (рис. 3).

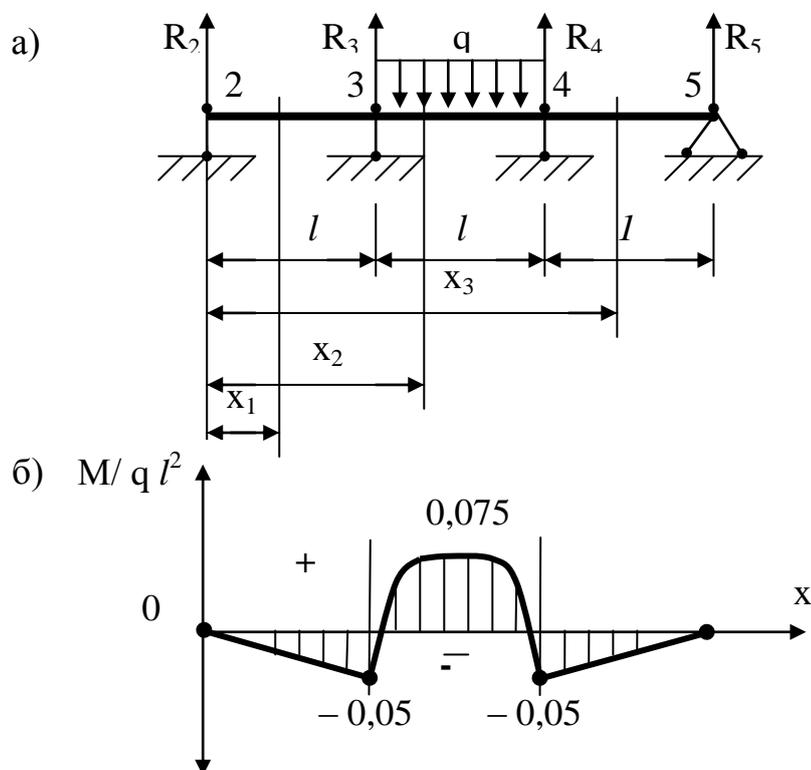


Рис. 3. Схема нагружения (а) и эпюра изгибающих моментов (б) трехпролетной балки

Такая арка имеет 2 «лишних» опоры, т.е. она дважды статически неопределима. Для раскрытия статической неопределенности используем метод начальных параметров [10, 11].

Принимая начало координат в левом конце балки, учтем симметрию ее нагружения, т.е. $R_2 = R_5$, $R_3 = R_4$ (и в дальнейшем $M_2 = M_5$, $M_3 = M_4$).

Уравнение прогибов трехпролетной балки имеет вид [1]:

$$EIy(x) = EIy_0 + EI\alpha_0 + R_2 \frac{x^3}{6} + R_3 \frac{(x-1)^3}{6} - \frac{q}{24} [(x-l)^4 - (x-2l)^4] + R_3 \frac{(x-2l)^3}{6} \quad (4)$$

На опорах прогибы равны нулю. Для определения начальных параметров и реакций опор имеем следующие начальные условия:

$$x = 0; y = 0;$$

$$x = l; y(l) = 0; \text{ т.е. } EI\alpha_0 l + R_2 \frac{l^3}{6} = 0;$$

$$x = 2l; y(2l) = 0; \text{ т.е. } EI\alpha_0 2l + R_2 \frac{(2l)^3}{6} + R_3 \frac{l^3}{6} - \frac{ql^4}{24} = 0; \quad (5)$$

$$\sum y = 0; \text{ т.е. (учитывая симметрию) } R_2 + R_3 = \frac{ql}{2}$$

Решая совместно уравнения (5) находим, что:

$$EI\alpha_0 = \frac{ql^3}{120};$$

$$R_2 = R_5 = -\frac{ql}{20} = -0,05ql; \quad (6)$$

$$R_3 = R_4 = \frac{11}{20}ql = 0,55ql$$

Эпюра (симметричная) изгибающих моментов показана на рис. 3 б.

Определим значения изгибающих моментов в трехпролетной балке:

$$M^I(x) = R_2 x = -0,05qlx; \quad (7)$$

$$\text{при } \begin{cases} x = 0; M(x) = 0; \\ x = l; M(x) = -0,05ql^2; \end{cases}$$

(что составляет 40 % от $M(x)_{\max} = 0,125ql^2$ в однопролетной балке).

Максимальный изгибающий момент в трехпролетной балке составляет 60 % от M_{max} однопролетной балки.

$$M''(x) = R_2 x + R_3(x-l) - \frac{qx^2}{2} = -0,05qxl + 0,55ql(x-l) - \frac{q(x-l)^2}{2}; \quad (8)$$

$$\text{при } \begin{cases} x=l; & M(l) = -0,05ql^2; \\ x=1,5l; & M(1,5l)_{max} = 0,075ql^2; \\ x=2l; & M(2l) = -0,05ql^2; \end{cases}$$

Рассмотрим балку с пятью пролетами (рис. 4).

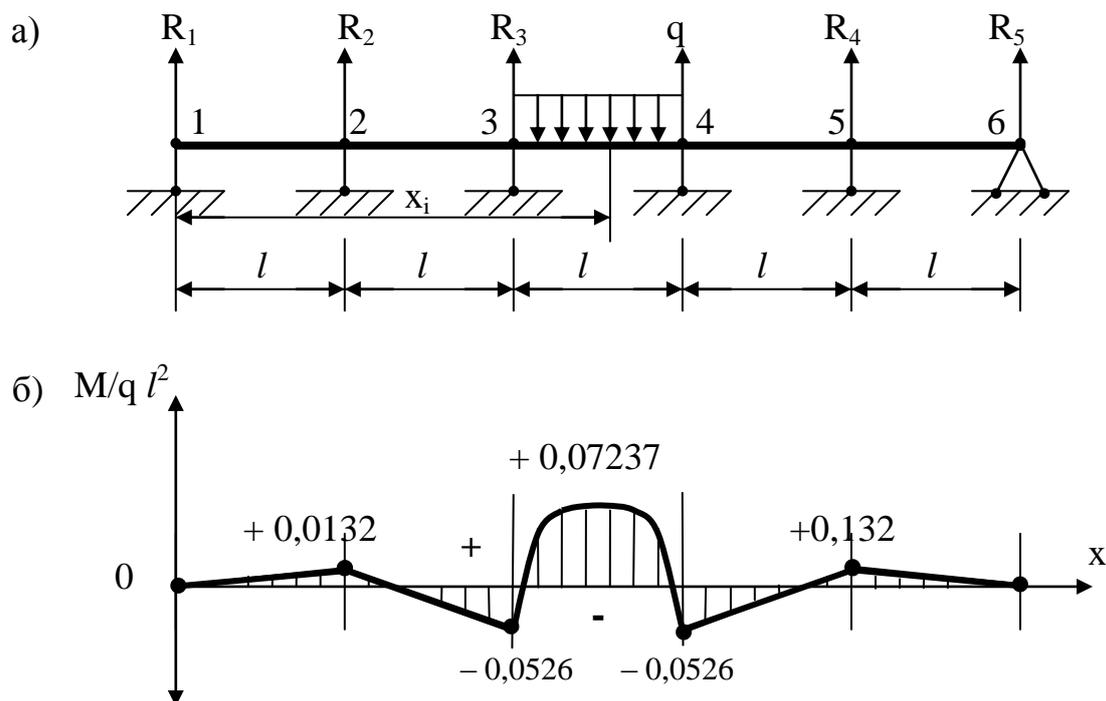


Рис. 4. Схема нагружения (а) и эпюра изгибающих момента (б) пятипролетной балки

Уравнение начальных параметров для прогибов балки запишется в виде:

$$EIy(x) = EIy_0 + EI\alpha_0 x + R_1 \frac{x^3}{6} + R_2 \frac{(x-l)^3}{6} + R_3 \frac{(x-2l)^3}{6} - \frac{q}{24} [(x-l)^4 - (x-3l)^4] + R_4 \frac{(x-3l)^3}{6} + R_5 \frac{(x-4l)^3}{6}. \quad (9)$$

Учитывая симметрию нагружения балки и из условий, что при:

$$\begin{aligned} x=0, \quad y=0; \quad x=l, \quad y(l)=l; \quad x=2l, \quad y(2l)=0; \\ x=3l, \quad y(3l)=0; \quad x=4l, \quad y(4l)=0; \quad \sum y=0; \end{aligned} \quad (10)$$

получим уравнения:

$$\left\{ \begin{aligned} EI\alpha_0 + R_1 \frac{l^2}{6} = 0; \end{aligned} \right. \quad (11)$$

$$\left\{ \begin{aligned} 2EI\alpha_0 + \frac{8}{6} R_1 l^2 + \frac{1}{6} R_2 l^2 = 0; \end{aligned} \right. \quad (12)$$

$$\left\{ \begin{aligned} 3EI\alpha_0 + \frac{27}{6} R_1 l^2 + \frac{8}{6} R_2 l^2 + \frac{1}{6} R_3 l^2 = \frac{ql^3}{24}; \end{aligned} \right. \quad (13)$$

$$\left\{ \begin{aligned} R_1 + R_2 + R_3 = \frac{ql}{2} \end{aligned} \right. \quad (14)$$

Решая уравнения (11 – 14) получим:

$$EI\alpha_0 = -\frac{ql^2}{456} = -0,002193ql^2; \quad (15)$$

$$R_1 = \frac{ql}{76} = 0,01316ql; \quad (16)$$

$$R_2 = -\frac{6}{76}ql = -0,07895ql; \quad (17)$$

$$R_3 = \frac{43}{76}ql = 0,5658ql. \quad (18)$$

Эпюра изгибающих моментов для пятипролетной балки представлена на рис. 4,б.

Анализируя изменение расчетной величины изгибающих моментов при увеличении числа пролетов в балке от трех до пяти, следует отметить, что над 2-й и 5-й опорами они составляют 10,5 % от максимального значения изгибающего момента в однопролетной балке равного $M(x)_{\max} = 0,125ql^2$.

Рассмотрим семипролетную балку (рис. 5).

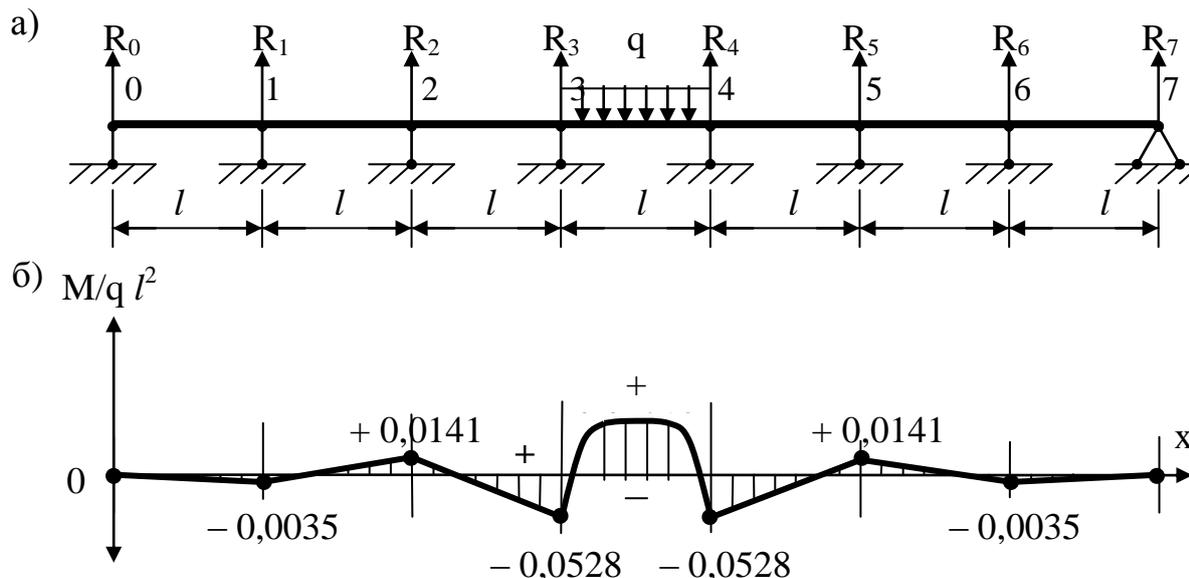


Рис. 5. Схема нагружения (а) и эпюра изгибающего момента (б) семипролетной балки

Уравнение для определения прогибов семипролетной балки можно записать в виде:

$$\begin{aligned}
 EIy(x) = & EIy_0 + EI\alpha_0 x + R_0 \frac{x^3}{6} + R_1 \frac{(x-1)^3}{6} + R_2 \frac{(x-2l)^3}{6} + \\
 & + R_3 \frac{(x-3l)^3}{6} - \frac{q}{24} [(x-3l)^4 - (x-4l)^4] + R_4 \frac{(x-4l)^3}{6} + \dots
 \end{aligned} \quad (19)$$

Учитывая симметрию нагружения балки и из условий (20):

$$\begin{aligned}
 x = 0, \quad y = 0; \quad x = l, \quad y(l) = l; \\
 x = 2l, \quad y(2l) = 0; \quad x = 3l, \quad y(3l) = 0; \\
 x = 4l, \quad y(4l) = 0; \quad x = 5l, \quad y(5l) = 0; \\
 x = 6l, \quad y(6l) = 0; \quad \sum y = 0;
 \end{aligned} \quad (20)$$

получим уравнения:

$$\left\{ \begin{array}{l} EI\alpha_0 + R_0 \frac{l^2}{6} = 0; \\ 2EI\alpha_0 + \frac{8}{6}R_0l^2 + \frac{1}{6}R_1l^2 = 0; \\ 3EI\alpha_0 + \frac{27}{6}R_0l^2 + \frac{8}{6}R_1l^2 + \frac{1}{6}R_2l^2 = 0; \\ 4EI\alpha_0 + \frac{64}{6}R_0l^2 + \frac{27}{6}R_1l^2 + \frac{8}{6}R_2l^2 + \frac{1}{6}R_3l^2 = \frac{ql^3}{24}; \\ R_1 + R_2 + R_3 + R_4 = \frac{ql}{2}. \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (21) \\ (22) \\ (23) \\ (24) \\ (25) \end{array}$$

Решив систему уравнений (21 – 25), получим:

$$EI\alpha_0 = 0,0005969ql^3; \quad (26)$$

$$R_0 = -0,00352113ql; \quad (27)$$

$$R_1 = 0,0211268ql; \quad (28)$$

$$R_2 = -\frac{354}{4189}ql = -0,084507ql; \quad (29)$$

$$R_3 = 0,566901ql. \quad (30)$$

Как видно из полученных значений, изгибающие моменты на опорах 1 и 6 составляют всего лишь 2,8 % от максимального изгибающего момента однопролетной балки равного $M(x)_{\max} = 0,125ql^2$. Изгибающие моменты на опорах 2 и 5 составляют 11,3 % от $M(x)_{\max}$.

Выводы. Таким образом, для расчета неразрезной многопролетной балки достаточно брать всего 5 пролетов или рассматривать 6 комплектов основной крепи, так как изгибающие моменты над более удаленными от загруженного пролета опорами весьма малы.

Полученные результаты позволяют произвести оценку напряженного состояния жесткой продольной крепи усиления в виде неразрезной многопролетной балки из шахтного спецпрофиля при равномерно распределенной нагрузке, которая обеспечивает за счет своей жесткости перераспределение повышенной и неравномерной нагрузки между перегруженными и недогруженными комплектами крепи по длине подготовительной выработки.

Библиографический список

1. Каретников, В. Н. Крепление капитальных и подготовительных выработок : Справочник [Текст] / В. Н. Каретников, В. Б. Клейменов, А. Г. Нуждихин. – М.: Недра, 1989. – 571 с.
2. Заславский, Ю. З. Исследование проявлений горного давления в капитальных выработках глубоких шахт Донецкого бассейна [Текст] / Ю. З. Заславский – М. : Недра, 1966. – 180 с.
3. Заславский, И. Ю. Повышение устойчивости подготовительных выработок угольных шахт [Текст] / И. Ю. Заславский, В. Ф. Компанец, А. Г. Файвишенко, В. М. Клещенков. – М. : Недра, 1991. – 235 с.
4. Литвинский, Г. Г. Стальные рамные крепи горных выработок [Текст] / Г. Г. Литвинский, Г. И. Гайко, М. И. Кулдыркаев. – К. : Техника, 1999. – 216 с.
5. Черняк, И. Л. Повышение устойчивости подготовительных выработок [Текст] / И. Л. Черняк. – М. : Недра, 1993. – 256 с.
6. Черняк, И. Л. Управление состоянием массива горных пород [Текст] / И. Л. Черняк, С. А. Ярунин. – М. : Недра, 1995. – 395 с.
7. Якоби, О. Практика управления горным давлением [Текст] / О. Якоби. – М. : Недра, 1987. – 566 с.
8. Бондаренко, Ю. В. Изменения деформаций контура кровли выемочной выработки при использовании каркасной крепи усиления [Текст] / Ю. В. Бондаренко, Г. И. Соловьев, В. С. Захаров // Известия Донецкого горного института. – 1999. – №1. – С. 66–70.
9. Бондаренко, Ю. В. Разработка математической модели процесса деформирования контура выработки при использовании каркасной крепи усиления [Текст] / Ю. В. Бондаренко, А. Г. Татьянченко, Г. И. Соловьев, В. С. Захаров // Известия Донецкого горного института. – 1998. – №2. – С. 92–96.
10. Тимошенко, С. П. Теория упругости [Текст] / С. П. Тимошенко, Дж. Гудьер. – М. : Наука, 1975. – 576 с.
11. Варвак, П. М. Справочник по теории упругости (для инженеров строителей) [Текст] / П. М. Варвак, А. Ф. Рябов. – К. : Будівельник, 1971. – 418 с.

12. Соловьев, Г. И. О результатах опытно-промышленной проверки эффективности способа продольно-жесткого усиления арочной крепи выемочных выработок глубоких шахт [Текст] / Г. И. Соловьев // Геотехнічна механіка: Міжвід. збірн. наук. праць. ІГТМ ім. М. С. Полякова НАН України. – Дніпропетровськ, 2005. – Вип. 61. – С. 274–284.

13. Соловьев, Г. И. Особенности физической модели самоорганизации боковых пород на контуре выемочной выработки при продольно-жестком усилении арочной крепи [Текст] / Г. И. Соловьев // Науковий вісник НГУ. – Дніпропетровськ, 2006. – №1. – С. 11–18.

Panin F. V, Babak A. A., Solovyev G. I., Saulin V. K.

(SEI HPE «Donetsk national technical university», Donetsk, DPR)

DETERMINATION OF PARAMETERS BY A LONG-BALTIC STRAPPING STRENGTHENING BY AN EXPERIMENTAL ANALYTICAL METHOD

The results of analytical studies to determine the parameters of the longitudinal-beam reinforcement using the method of initial parameters are presented. It has been established that the use of rigid longitudinal connection of sets of main supports allows, due to the rigidity of the beam, to redistribute the increased load from one overloaded set of supports between six adjacent sets.

Keywords: reinforcement support, longitudinal beam, preparatory development, roof and floor rock displacements, initial parameters method, bending moment, plot.