

УДК 622.28.044:622.261.2

А.О. Новиков, д-р техн. наук, проф.,
И.Н. Шестопалов

Государственное высшее учебное заведение „Донецкий национальный технический университет“, г. Донецк,
Украина, e-mail: rpm@mine.dgtu.donetsk.ua

О НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОМ СОСТОЯНИИ СИСТЕМЫ „РАМА – ОБОЛОЧКА ИЗ УКРЕПЛЕННЫХ АНКЕРАМИ ПОРОД“

A.O. Novikov, Dr. Sci. (Tech.), Professor,
I.N. Shestopalov

State Higher Educational Institution “Donetsk National Technical University”, Donetsk, Ukraine,
e-mail: rpm@mine.dgtu.donetsk.ua

ABOUT THE TENSE-DEFORMED STATE OF SYSTEM “FRAME - SHELL MAID OF THE ROCKS REINFORSED BY ANCHORS”

Цель. Определение параметров рамно-анкерной крепи для поддержания подготовительных выработок глубоких шахт.

Методика. Теоретический метод исследования напряженно-деформированного состояния системы „рама – оболочка из укрепленных анкерами пород“ с учетом ранее полученных экспериментальных данных.

Результаты. Результатами исследований являются: разработанная физико-математическая модель напряженно-деформированного состояния породного массива, вмещающего выработки с рамно-анкерной крепью; значение нормальных перемещений и максимальных составляющих тензора напряжений, действующих в укрепленной анкерами породной оболочке; значение внешней нагрузки, действующей на рамную крепь.

Научная новизна. Впервые вариационным методом решена задача о напряженно-деформированном состоянии системы „рама – оболочка из укрепленных анкерами пород“. В задаче учитываются следующие параметры: данные о количестве слоев, их физико-механические свойства, а также геометрические размеры горной выработки. Разработанная математическая модель позволяет дифференцированно рассчитать рациональные параметры каждого из элементов комбинированной крепи, обеспечивающие длительную устойчивость горной выработки.

Практическая значимость. На основании результатов теоретических исследований, а также результатов выполненных ранее лабораторных и шахтных исследований, разработана „Методика расчета параметров анкерных породо-армирующих систем для обеспечения устойчивости горных выработок“. Разработанные на основании „Методики...“ паспорта крепления выработок позволяют уменьшить затраты на крепление и поддержание выработок в 2–3 раза по сравнению с существующими методиками.

Ключевые слова: *горная выработка, анкерное крепление, перемещение, напряжения, вариационный метод, координатные функции*

Постановка проблемы и ее связь с важными практическими задачами. В настоящее время до 90% поддерживаемых горных выработок закреплены металлической арочной податливой крепью. При этом до 17,5% из них на шахтах Украины деформировано и нуждается в ремонте. Одной из основных причин неудовлетворительного состояния выработок является низкая несущая способность крепи и несоответствие ее технических характеристик горно-геологическим условиям применения. Перспективным направлением улучшения состояния крепи выработок является ее усиление, в том числе за счет применения анкерования. В этой связи актуальными являются исследования, позволяющие обосновать рациональные параметры комбинированных крепей, обеспечивающих устойчивое состояние поддерживаемых выработок.

Последние достижения и публикации. Известно, что основная задача горной геомеханики состоит в численной оценке различных проявлений горного давления, развивающихся в породном массиве при ведении горных работ. Попытки ее решения пред-

принимались различными методами в работах И.В. Баклашова, Ю.З. Заславского, А.Н. Шашенко, В.И. Шейнина, Ф.П. Глушихина и многих других исследователей. Вместе с тем, проблема, решаемая в них, до сих пор окончательно не решена, о чем свидетельствует не только значительная доля выработок, находящихся в неудовлетворительном состоянии, но и высокая стоимость и трудоемкость работ по их поддержанию. Опубликованные многочисленные результаты решения сложных объемных аналитических задач (работы М.Ш. Штейна и И.В. Баклашова), к сожалению, слишком идеализированы и не имеют практического значения, поскольку в них решена осесимметричная задача для однородного, изотропного, линейно деформируемого, не разрушенного массива, вмещающего цилиндрическую выработку в гидростатическом поле напряжений. В настоящее время, при решении сложных задач, в случаях, когда исследуемую математическую модель нельзя преобразовать к конечному виду, а производимые упрощения существенно снижают ее качество [1–3], нашли применение численные (вариационные) методы, эффективность которых в значительной степени обес-

печивается быстродействием вычислительной техники [4–6].

Анализ работ [1–3], посвященных изучению взаимодействия комбинированной крепи и массива, а также разработке методик расчета их параметров показал, что в них не содержится четкого разграничения между существующими конструкциями комбинированных крепей на основе применения анкерных систем, а механизм взаимодействия комбинированной крепи и массива во времени практически не изучен. Кроме того, в известных методиках расчета параметров комбинированных крепей не установлено распределение нагрузок, воспринимаемых отдельными составными элементами системы „крепежная рама-оболочка из укрепленных пород“, что не позволяет достоверно рассчитать их параметры.

В работах [4, 5] изложены основные положения разработанного метода расчета напряженно-деформированного состояния армированной анкерами кровли выработки в виде толстой пластины, состоящей из трансверсально изотропных слоев пород, находящейся под действием равномерно распределенной нагрузки, два противоположных края которой жестко защемлены, два других – свободные. Рассмотрены две основные схемы крепления анкерами: одиночное и двойное расположение под различными углами. В модели варьируются следующие параметры: количество слоев пород, диаметр анкеров, расстояние между ними, упругие характеристики анкеров и пород (модули упругости и сдвига, коэффициенты Пуассона пород и анкеров), а также приведенные упругие характеристики. В результате решения получены зависимости для определения нормальных перемещений и напряжений в породно-анкерной конструкции с учетом влияния поперечных сил и сдвига, позволяющие обосновано выбрать параметры анкерной системы, обеспечивающие надежность и длительную устойчивость выработки.

В работе [6] приведена в обобщенном виде математическая модель напряженно-деформированного состояния закрепленной анкерами горной выработки, расчетная схема которой представлена как многослойная толстая сферическая армированная оболочка под действием равномерно распределенной нагрузки, два противоположных края которой защемлены, а два других – свободные. При этом горная выработка имеет форму полуокружности или параболы и закреплена анкерами, нормально расположенными к ее поверхности.

Постановка задачи. Задача, во втором случае, в конечном счете, сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений [6]

$$\sum_{j=1}^n a_j \iint \sum_{r=1}^{13} F_r G_r ds = r_0 \iint f_e g_e ds, \quad e = 1, \bar{n}.$$

Здесь введены следующие обозначения

$$F_1 = f_e'' f_j''; F_2 = f_e'' f_j'; F_3 = f_e f_j''; F_4 = f_e f_j';$$

$$F_5 = f_e' f_j'; F_6 = f_e''' f_j''; F_7 = f_e''' f_j'; F_8 = f_e' f_j'';$$

$$F_9 = f_e' f_j'; F_{10} = f_e f_j'; F_{11} = f_e'' f_j'; F_{12} = f_e f_j'';$$

$$F_{13} = f_e'' f_j'';$$

$$G_1 = g_e g_j; G_2 = d_{12} k^2 g_e g_j''; G_3 = d_{12} k^2 g_e'' g_j;$$

$$G_4 = d_{22} k^4 g_j'' g_e''; G_5 = 2d_{66} k^2 g_j' g_e'';$$

$$G_6 = h^* g_e g_j; G_7 = h^* b_1^i k^2 g_e g_j'';$$

$$G_8 = h^* b_1^i k^2 g_e'' g_j; G_9 = h^* (b_1^i)^2 k^4 g_e'' g_j'';$$

$$G_{10} = h^* (b_2^i)^2 k^6 g_e'' g_j''; G_{11} = h^* b_1^i k^4 a^* g_e'' g_j'';$$

$$G_{12} = h^* b_1^i k^4 a^* g_e'' g_j'; G_{13} = h^* (b_1^i)^2 k^2 a^* g_e' g_j';$$

($0 \leq x \leq 1, 0 \leq y \leq 1$), где штрихами обозначены производные.

Безразмерные величины и константы для параболической формы горной выработки имеют вид [6]

$$x = L\bar{x}; y = B\bar{y}; z = f\bar{z}; w = L\bar{w};$$

$$m = \frac{f}{B}; k = \frac{L}{B}; d_{12} = \frac{D_{12}}{D_{11}};$$

$$d_{22} = \frac{D_{22}}{D_{11}}; d_{66} = \frac{D_{66}}{D_{11}}; r_0 = \frac{2qL^3}{D_{11}}; \quad (1)$$

$$h_1 = \frac{h_2}{L_2} - \frac{4m\bar{z}^2}{k^2}; h^* = \frac{h^3 h_1 a_{55} (B_{11}^i)^2}{96 D_{11}};$$

$$b_1^i = \frac{B_{12}^i + 2B_{66}^i}{B_{11}^i}; b_2^i = \frac{B_{22}^i}{B_{11}^i}; a^* = \frac{a_{44}}{a_{55}}.$$

Перемещения ищем в виде

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

где a_j – неопределенные параметры; f_j, q_i – координатные функции, удовлетворяющие граничным условиям.

Нормальные $\sigma_x^i, \sigma_y^i, \sigma_z^i$, касательные в плоскости τ_{xy}^i и поперечные касательные τ_{xz}^i, τ_{yz}^i напряжения для i -ого слоя пород горной выработки имеют вид

$$\sigma_x^i = -\frac{m}{k} \bar{z} \left[B_{11}^i \sum_{j=1}^n a_j f_j'' g_j + k^2 (B_{12}^i + 2B_{66}^i) \sum_{j=1}^n a_j f_j g_j'' \right] + \frac{8mk}{[1 + m^2(1 - 2\bar{y})^2]^{3/2}} B_{12}^i \sum_{j=1}^n a_j f_j g_j;$$

$$\sigma_y^i = -\frac{m}{k} \bar{z} \left[B_{22}^i k^2 \sum_{j=1}^n a_j f_j g_j'' + (B_{12}^i + 2B_{66}^i) \sum_{j=1}^n a_j f_j'' g_j \right] + \frac{8mk}{[1 + m^2(1 - 2\bar{y})^2]^{3/2}} B_{22}^i \sum_{j=1}^n a_j f_j g_j;$$

$$\sigma_z^i = \nu_{xy}^i (\sigma_x^i + \sigma_y^i), \text{ (при } \varepsilon_z = 0); \quad (2)$$

$$\tau_{xy}^i = -2mB_{66}^i \bar{z} \sum_{j=1}^n a_j f_j' g_j';$$

$$\tau_{xz}^i = -\frac{1}{8} h_1 \left[B_{11}^i \sum_{j=1}^n a_j f_j'' g_j + k^2 (B_{12}^i + 2B_{66}^i) \sum_{j=1}^n a_j f_j' g_j' \right];$$

$$\tau_{xz}^i = -\frac{1}{8} h_1 \left[B_{22}^i k^3 \sum_{j=1}^n a_j f_j g_j''' + k^2 (B_{12}^i + 2B_{66}^i) \sum_{j=1}^n a_j f_j' g_j' \right].$$

Изложение материала исследований. Цель исследований – определение максимальных нормальных напряжений (σ_z) и перемещений закрепленной части горной выработки, необходимых для расчета параметров рамной крепи.

Приведенные модули упругости, сдвига и коэффициенты Пуассона находим, равномерно распределяя жесткости анкеров и пород на растяжение-сжатие по площади сечения оболочки.

В нашем случае приведенные механические характеристики имеют вид

$$E_{x\bar{i}}^i = \frac{E_a d_a + (t_i - d_a) \sum_{i=1}^n E_{\bar{i}}^i / n}{t_i};$$

$$E_{y\bar{i}}^i = \frac{E_a d_a + (t_0 - d_a) \sum_{i=1}^n E_{\bar{i}}^i / n}{t_0};$$

$$E_{xz\bar{i}}^i = \frac{E_a d_a + (t_i - d_a) \sum_{i=1}^n G_{\bar{i}}^i / n}{t_i};$$

$$G_{y\bar{i}}^i = \frac{t_0}{\frac{d_a}{G_a} + \frac{(t_0 - d_a)}{\sum_{i=1}^n G_{\bar{i}}^i / n}}; \quad (3)$$

$$G_a = \frac{E_a}{2(1 - \nu_a)^2};$$

$$G_{\bar{i}}^i = \frac{E_{\bar{i}}^i}{2(1 - \nu_{\bar{i}}^i)^2};$$

$$t_i = 2R_{i-1} + \frac{\sin \alpha}{2}, \quad (n = 4).$$

Приведенные коэффициенты Пуассона имеют вид (3) при замене $E_a, E_{\bar{i}}^i$ на $\nu_a, \nu_{\bar{i}}^i$, причем введены следующие обозначения: $E_a, E_{\bar{i}}^i$ – модули нормальной упругости материала анкера и слоев породы, Па; $G_a, G_{\bar{i}}^i$ – соответственно, модули сдвига материала анкера и слоев породы, Па; d_a – диаметр анкера, м; t_0 – расстояние между анкерами в направлении x (по длине выработки), м; t_1 – расстояние между анкерами в направлении y , м; α – центральный угол между анкерами, град.

Закон изменения радиуса выработки R_0 приведен в работе [6].

В качестве координатных функций используем степенные полиномы, удовлетворяющие, по методу Ритца, кинематическим граничным условиям относительно функции w и ее первой производной (табл. 1, 2) или по методу Бубнова-Галеркина – всем граничным условиям (4).

Таблица 1

Набор степенных полиномов $f(x)$, удовлетворяющих граничным условиям по методу Ритца

f_i	x^2	x^3	x^4	x^5	x^6	x^7	x^8
f_1	1	-2	1				
f_2	-1	4	-5	2			
f_3	1	-8	19	-18	6		
f_4	-1	14	-55	92	-70	20	
f_5	1	-22	131	-340	440	-280	70

Таблица 2

Набор степенных полиномов $g(y)$, удовлетворяющих граничным условиям по методу Ритца

g_i	y^0	y^1	y^2	y^3	y^4	y^5
g_1	-1	2				
g_2	1	-6	6			
g_3	-1	12	-30	20		
g_4	1	-20	90	-140	70	
g_5	-1	30	-210	560	-630	252



Рис. 1. Блок-схема алгоритма решения задачи

$$f(x) = (x^4 - 2x^3 + x^2)/24, l = (6x^2 - 6x + 1)/12 ;$$

$$g(y) = 20y^7 - 10y^6 + 84y^5 - 35y^4 + y + 1. \quad (4)$$

Для проверки адекватности приведенной математической модели по разработанному алгоритму решения задачи (рис. 1) определены перемещения по методам Ритца и Бубнова-Галеркина. При этом использованы следующие исходные данные: для первого и второго слоев средние значения $E_{cp} = 1,75 \cdot 10^4$ МПа; $\nu_{cp} = 0,33$, третьего – $E_{cp} = 2,0 \cdot 10^4$ МПа; $\nu_{cp} = 0,32$, четвертого – $E_{cp} = 3,0 \cdot 10^4$ МПа; $\nu_{cp} = 0,27$; $B = 4,0$ м; $f = 2,5$; $\alpha = 20^\circ$; $R_0 = 2,5$ м; $t_0 = t_1 = 1,0$ м; $q = 3$ МПа.

Предварительные результаты расчетов перемещений показали, что лучшая их сходимость с данными шахтного эксперимента обеспечивается при использовании координатных функций (4). Данные экспериментальных исследований по определению перемещений пород на контуре получены в условиях конвейерного штрека 5-й южной лавы пласта m_4^0 шахты „Добропольская“. Во время эксперимента породы в выработке были увлажнены, поэтому погрешность результатов расчета составила около 50 %. В этой связи, при проведении дальнейших исследований значения модулей упругости были уменьшены в 1,5 раза. В этом случае при креплении выработки анкерами с сеткой 1,0 x 1,0 м погрешность при определении перемещений в кровле выработки составила 21% (рис. 2, кривая 1), а при уменьшении расстояния между анкерами в 2 раза (сетка 0,5 x 0,5 м) перемещения снизились в 1,75 раза (кривая 2). Затем были выполнены расчеты по определению нормальных и касательных напряжений выработки, закрепленной анкерами, по зависимостям (2). Распределение напряжений $\sigma_x^i, \sigma_y^i, \sigma_z^i$ для внутренней поверхности выработки в направлениях x и y представлены на

рис. 3–5, откуда следует, что максимальные напряжения σ_x возникают в средней ее части, σ_y, σ_z – в защемленной части, причем максимальное значение σ_z равно 0,07 МПа, а в верхней части выработки – 0,06 МПа. Действующие в оболочке касательные напряжения значительно ниже нормальных, поэтому они не приведены.

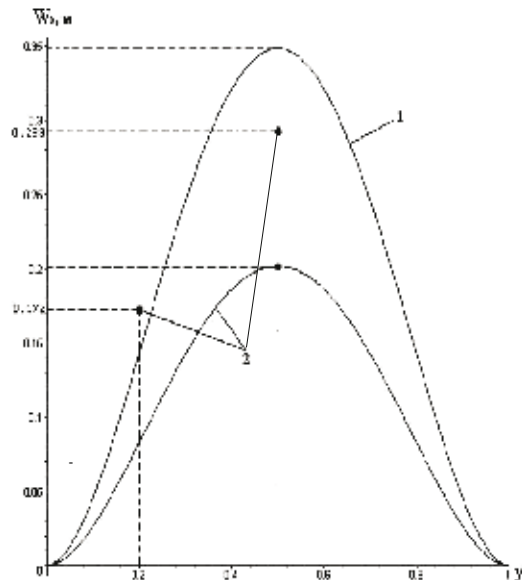


Рис. 2. Изменение нормального перемещения закрепленной анкерами горной выработки: 1, 2 – расстояния между анкерами, соответственно, 1,0 и 0,5 м; • – данные экспериментальных исследований

Таким образом, в данном случае при расчете параметров рамной крепи необходимо учитывать, что действующая на нее максимальная внешняя нагрузка q_j не должна превышать 0,07 МПа.

Разработанная математическая модель напряженно-деформированного состояния закрепленной анкерами горной выработки позволяет определить нормальные перемещения, составляющие тензора напряжений в зависимости от приведенных выше комплексов и симплексов (1), которые, в свою очередь, зависят от геометрических и физических ее параметров.

Все вышеперечисленное позволяет рассчитывать и принимать рациональные параметры комбинированной крепи, обеспечивающие ее длительную устойчивость при минимальной материалоемкости и стоимости.

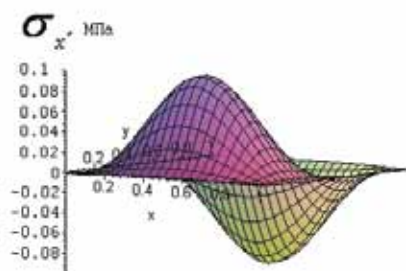


Рис. 3. Распределение нормальных максимальных напряжений (σ_x) внутренней поверхности закрепленной анкерами выработки (расстояние между анкерами 1,0 м)

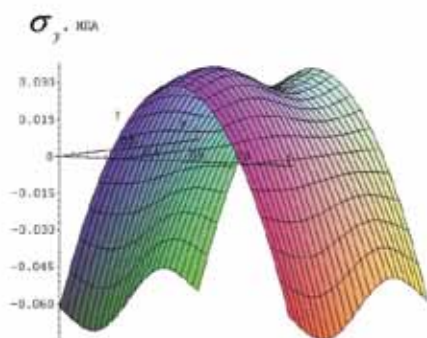


Рис. 4. Распределение нормальных максимальных напряжений (σ_y) внутренней поверхности закрепленной анкерами выработки (расстояние между анкерами 1,0 м)

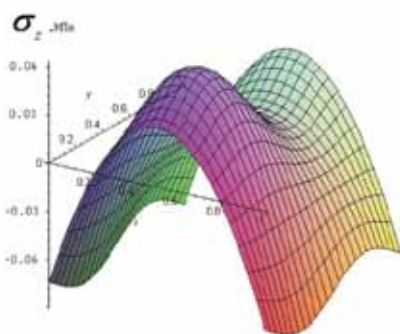


Рис. 5. Распределение нормальных максимальных напряжений (σ_z) внутренней поверхности закрепленной анкерами выработки (расстояние между анкерами 1,0 м)

Выводы и рекомендации. В результате решения задачи вариационным методом разработана физико-математическая модель напряженно-деформированного состояния породного массива, вмещающего горную выработку с рамной крепью, армированного анкерами. Его расчетная схема представлена в виде многослойной толстой оболочки параболической формы из трансверсально изотропных слоев, находящейся под действием равномерно распределенной нагрузки с жестко защемленными краями в одном направлении и свободными – в другом. Приведены результаты расчета нормального перемещения и максимальных составляющих тензора напряжений, в том числе нормального напряжения σ_z , которое является внешней нагрузкой, действующей на рамную крепь при выборе ее минимальной массы и стоимости. Модель позволяет с учетом данных о количестве слоев, их физико-механических свойствах, геометрических параметров горной выработки рассчитать рациональные параметры комбинированной крепи (рамы и анкерной системы), обеспечивающие длительную устойчивость поддерживаемой выработки. На основании результатов выполненных расчетов, а также данных лабораторных и шахтных исследований, получены зависимости, положенные в основу разработанной методики расчета [7].

В дальнейшем планируется провести исследования по определению перемещений и напряжений в укрепленной анкерами породной оболочке в зависимости от значений безразмерных комплексов и симплексов (1), а также для других форм внешней поверхности выработок.

Список литературы / References

1. Геомеханика взаимодействия анкерной и рамной крепи горных выработок в единой грузонесущей системе: монография / [В.И. Бондаренко, Ю.Я. Чередниченко, И.А. Ковалевская и др.] – Днепропетровск: Вид ТОВ „ЛізуновПрес“, 2010. – 174с.
Bondarenko, V.I., Cherednichenko, Yu.Ya. and Kovalevskaya, I.A. (2010), *Geomekhanika vzaimodeystviya ankernoy i ramnoy krepі gornykh vyrabotok v edinoy gruzonesushchey sisteme* [Geomechanics of Interaction of the Roof Bolting and Frame of the Mine Tunnel in Integrated Load-Bearing System], monograph, TOV „LizunovPres“, Dnepropetrovsk, Ukraine.
2. Методы расчета перемещений и упрочнения приконтурных пород горных выработок шахт Западного Донбасса: монография / [В.И. Бондаренко, И.А. Ковалевская, Г.А. Симанович и др.] – Днепропетровск: ТОВ „Підприємство „Дріант“, 2010. – 328с.
Bondarenko, V.I., Kovalevskaya, I.A. and Simanovich, G.A. (2010), *Metody rascheta peremeshcheniy i uprochneniya prikonturnykh porod gornykh vyrabotok* [Methods of Calculation of Shifting and Reinforcement of Rocks Surrounding Tunnels of Mines in Western Donets Basin], monograph, TOV “Pudpnyemstvo “Driant”, Dnepropetrovsk, Ukraine.
3. Черняк И.Л. Повышение устойчивости подготовительных выработок / И.Л. Черняк. – М.: Недра, 1993. – 256 с.

Chernyak, I.L. (1993), *Povyshenie ustoichivosti podgotovitelnykh vyrabotok* [Development Workings Stability Increase], Nedra, Moscow, Russia.

4. Новиков А.О. Теоретические основы оценки напряженно-деформированного состояния армированного анкерами массива горных пород вокруг выработки / Новиков А.О. // Научный вестник Национального горничого университета – Днепропетровськ: НГУ, 2009. – №9. – С. 31–38.

Novikov, A.O. (2009), “Theoretical bases of estimation of stressed state of rock massif reinforced by anchors around tunnel”, *Naukovyi visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universitetu*, no.9, pp. 31–38.

5. Новиков А.О. О напряженно-деформированном состоянии породного массива с анкерными породоармирующими системами / Новиков А.О. // Вісті Донецького гірничого інституту.– Донецьк, 2010.– №1.– С. 117–123.

Novikov, A.O. (2010), “About stressed state of rock massif with anchor rock-reinforcing systems”, *Visti Donetskoho Hirnychoho Instytutu*, no.1, pp. 117–123.

6. Новиков А.О. Математическая модель напряженно-деформированного состояния системы „рама – оболочка из скрепленных анкерных пород“ / Новиков А.О., Шестопалов И.Н. // Известия Донецкого горного института – Донецк: ДонНТУ, 2011. – №2. – С. 11–19.

Novikov, A.O. and Shestopalov, I.N. (2011), “Mathematical model of the stressed state of the system “frame – shell made of the rock reinforced by anchors”, *Visti Donetskoho Hirnychoho Instytutu*, no.2, pp. 11–19.

7. Методика определения параметров анкерных породо-армирующих систем для обеспечения устойчивости горных выработок: СТП (02070826) (26319481) / [Н.Н. Касьян, Ю.А. Петренко, А.О. Новиков и др.] – Донецк–Доброполье, 2010. – 27 с.

Kasyan, N.N., Petrenko, Yu.A. and Novikov, A.O. (2010), *Metodika opredeleniya parametrov ankernykh porodo-armiruyushchikh sistem dlya obespecheniya ustoichivosti gornyykh vyrabotok* [Methodology of Determination of Parameters of Anchor Rock-Reinforcing Systems to Provide Stability of Tunnels], STP (02070826) (26319481), Dobropolye, Donetsk, Ukraine.

Мета. Визначення параметрів рамно-анкерного кріплення для підтримання підготовчих виробок глибоких шахт.

Методика. Теоретичний метод дослідження напружено-деформованого стану системи „рама – оболочка з укріплених анкерами порід“ з урахуванням раніше отриманих експериментальних даних.

Результати. Результатами досліджень є: розроблена фізико-математична модель напружено-деформованого стану масиву гірських порід, що вміщує виробки з рамно-анкерним кріпленням; значення нормальних переміщень та максимальних складових тензору напружень, що діють в укріпленій анкерами порідній оболонці; значення зовнішнього навантаження, що діє на рамне кріплення.

Наукова новизна. Уперше варіаційним методом вирішена задача щодо напружено-деформованого

стану системи „рама – оболочка з укріплених анкерами порід“. У задачі враховуються наступні параметри: дані про кількість шарів, їх фізико-механічні властивості, а також геометричні розміри гірничої виробки. Розроблена математична модель дозволяє диференційовано розрахувати раціональні параметри кожного з елементів комбінованого кріплення, що забезпечують тривалу стійкість гірничої виробки.

Практична значимість. Уперше, на підставі теоретичних досліджень, а також даних лабораторних та шахтних досліджень, розроблено „Методику розрахунку параметрів породо-армуєчих систем для забезпечення стійкості гірничих виробок“. Розроблені на підставі „Методики...“ паспорти кріплення виробок дозволяють зменшити витрати на кріплення та підтримання виробок у 2–3 рази в порівнянні з існуючими методиками.

Ключові слова: *гірничі виробки, анкерне кріплення, переміщення, напруження, варіаційний метод, координатні функції*

Purpose. To determine the parameters of frame-anchor lining for assuring the support of the development workings in deep mines.

Methodology. Theoretical method of research of the stressed state of the system “frame – surrounding rock reinforced by anchors” used for the study takes into account experimental data received in earlier work.

Findings. The physical-mathematical model of the stressed state of the rock massif containing mine tunnels with frame-anchor lining has been developed. The normal values of shift and maximal component of stress tensor, affecting the rock shell supported by anchors and the value of the external loading, influencing on the rame lining have been determined.

Originality. For the first time the problem of the stressed state of the system “frame – surrounding rock reinforced by anchors” has been solved by means of the variation method. The following parameters have been taken into account during solving the problem: information about the number of layers, their physical and mathematical properties, and geometry of the mine tunnel. The developed mathematical model allows us to do differentiated calculation of rational parameters of each element of combined lining, assuring continuous stability of the mine working.

Practical value. On the base of statistical treatment of results of theoretical calculations and information received in laboratory and mine researches the “Method of calculation of parameters of the anchor rock-reinforcing system has been developed to providing of stability of mine workings”. The certificate of support developed on the basis of the “Method...” allow us to reduce expenses on fastening and supporting of working in 2–3 times as compared with existent methods.

Keywords: *mine working, anchor fastening, shift, tension, variation method, coordinate functions*

Рекомендовано до публікації докт. техн. наук С.В. Підкопасвим. Дата надходження рукопису 11.06.12.