

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОЧНОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ ГОРНОЙ ВЫРАБОТКИ В СИСТЕМЕ «ПОРОДНЫЙ МАССИВ – АНКЕР – МОДИФИЦИРОВАННЫЙ БЕТОН»

SUBSTANTIATION OF STRENGTH AND STABILITY PARAMETERS OF MINING IN THE SYSTEM “ROCK MASS – ANCHOR – MODIFIED CONCRETE”



В. Р. Алабьев,
Кубанский государственный
технологический университет,
г. Краснодар
avr.09@mail.ru

V. Alabyev,
Kuban State Technological
University, Krasnodar



И. В. Купенко,
Донецкий национальный
технический университет,
г. Донецк
ivk1978@mail.ru

I. Kупenko,
Donetsk National Technical
University, Donetsk



Н. Д. Барсук,
Донецкий национальный
технический университет,
г. Донецк
barsuk_nikita93@mail.ru

N. Barsuk,
Donetsk National Technical
University, Donetsk



В. И. Демин,
Кубанский государственный
технологический университет,
г. Краснодар
avr.09@mail.ru

V. Demin,
Kuban State Technological
University, Krasnodar

Отсутствие в Донецком бассейне анкерного крепления породного массива с использованием модифицированного бетона снижает безопасность ведения горных работ, не обеспечивает его длительную прочность и устойчивость в выработках глубоких угольных шахт. Объект исследования – горные выработки в системе «породный массив – модифицированный бетон – анкер». Предмет исследования – обоснование параметров прочности и устойчивости горной выработки. *Цель исследования* – раскрыть закономерности напряженно-деформированного состояния системы «породный массив – модифицированный бетон – анкер» для обоснования параметров закрепления породного массива, обеспечивающих безопасность ведения горных работ, повышение устойчивости и снижение затрат на проведение горных выработок глубоких угольных шахт. *Методы исследования:* математическое моделирование напряженно-деформированного состояния системы «породный массив – анкер – модифицированный бетон». Рассмотрена расчетная схема породного массива, представленного в виде толстой оболочки с анизотропными слоями пород под действием горного давления и двумя граничными условиями. Приведена математическая модель напряженно-деформированного состояния (НДС) системы «породный массив-анкер-модифицированный бетон». Полученные результаты исследований напряжений и номограмма по определению безразмерных величин позволили обосновать параметры системы, обеспечивающие ее прочность и устойчивость в горных выработках глубоких угольных шахт

Ключевые слова: горная выработка, породный массив, анкер, модифицированный бетон, напряжения, перемещения, прочность, устойчивость, угольные шахты, крепь

The absence of a rock mass anchoring in the Donetsk basin using modified concrete reduces the safety of mining operations and does not ensure its long-term strength and stability in the workings of deep coal mines. *The object of the research* is mining in the system “rock mass – modified concrete anchor”. *The subject of the research* is the substantiation of the strength and stability parameters of mining. *The purpose of the research* is to reveal the regularities of the stress-strain state of the “rock mass - modified concrete anchor” system to substantiate the parameters of fixing the rock mass, ensuring the safety of mining operations, increasing sta-

bility and reducing the cost of mining deep coal mines. *The research methods:* mathematical modeling of the stress-strain state of the “rock mass – anchor – modified concrete” system. The design scheme of a rock mass presented in the form of a thick shell with anisotropic layers of rocks under the influence of rock pressure and two boundary conditions is considered. A mathematical model of the stress-strain state (VAT) of the “rock mass-anchor-modified concrete” system is given. The obtained results of stress studies and a nomogram for the dimensionless quantities determination allowed the authors to substantiate the parameters of the system that ensure its strength and stability in the mine workings of deep coal mines

Key words: *mining, rock mass, anchor, modified concrete, stresses, displacements, strength, stability, coal mines, support*

Введение. Важнейшей задачей угольной промышленности, как одной из ведущих отраслей народного хозяйства, является повышение производительности труда и снижение себестоимости продукции, что достигается, в том числе, за счет совершенствования способов крепления и поддержания капитальных и подготовительных выработок, создания и широкого внедрения надежных и экономичных видов крепи.

В Донецком бассейне до 30 % случаев травматизма при ведении подготовительных работ происходит в забойной части тупиковых выработок из-за несвоевременной установки или отсутствия временного крепления. При этом ежегодно ремонтируется около 31 % выработок от общей протяженности, а затраты на их поддержание, стоимость крепления и трудоемкость работ постоянно увеличиваются. Большинство горных выработок закреплено долговременными крепями, в основном – металлической и сборной железобетонной крепью, что связано с большими материальными затратами [10].

Крепление породного массива тупиковой выработки с помощью анкерной крепи повышает его прочность и устойчивость, обеспечивает сокращение трудоемкости работ по креплению, снижение затрат, улучшение условий труда и значительное повышение технико-экономических показателей добычи угля [1].

За рубежом на угольных шахтах, при сохраняющемся преобладании металлической рамной крепи, определилась устойчивая тенденция к росту объемов применения анкерной и набрызгбетонной крепей, как наиболее перспективная, используемая самостоятельно и в сочетании друг с другом и элементами других крепей [11].

Для отечественной угольной промышленности получены результаты исследований

напряженно-деформированного состояния (НДС) породных массивов горных выработок, закрепленных отдельно анкерами или набрызгбетоном [2; 5; 7; 8]. Однако в первом случае не устраняются трещины наиболее напряженного нижнего слоя массива, которые, как показали результаты ранее проведенных экспериментальных исследований, составляют 80...95 % [3], являясь источником хрупкого разрушения, во втором – незначительно увеличивается жесткость, что является недостаточным для обеспечения его прочности и устойчивости в выработках глубоких шахт.

Объект исследования – горные выработки в системе «породный массив – модифицированный бетон – анкер».

Предмет исследования – обоснование параметров прочности и устойчивости горной выработки.

Цель исследования – раскрыть закономерности напряженно-деформированного состояния системы «породный массив – модифицированный бетон – анкер» для обоснования параметров крепления породного массива, обеспечивающих безопасность ведения горных работ, повышение устойчивости и снижение затрат на проведение горных выработок глубоких угольных шахт.

Методы исследования. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния системы «породный массив – анкер – модифицированный бетон».

Результаты исследования. Расчетная схема породного массива горной выработки, представленного в виде многослойной толстой оболочки с трансверсально изотропными слоями под действием распределенной нагрузки q_z от действия горного давления, четыре или два края которых защемлены, другие – шарнирно оперты, приведена на рис. 1.

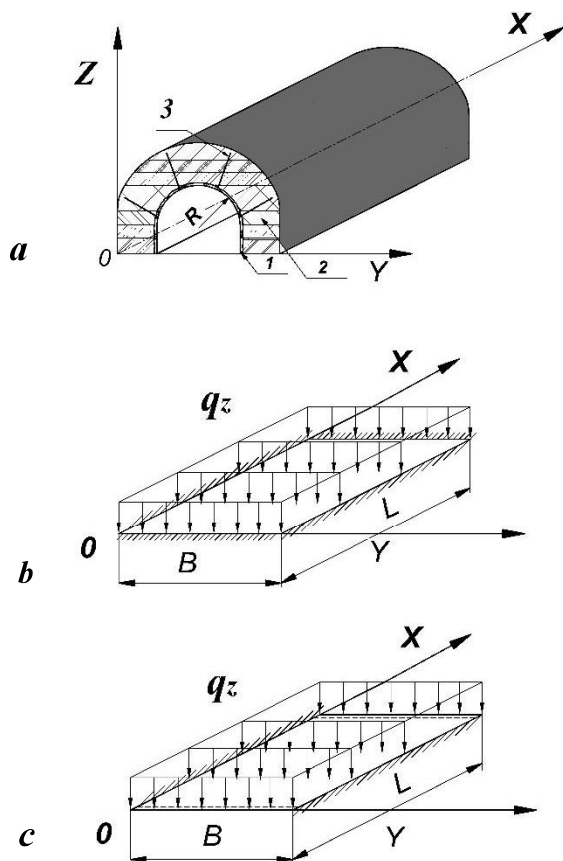


Рис. 1. Расчетная схема системы «порodный массив – анкер – модифицированный бетон» горной выработки (а) с граничными условиями: все края защемлены (b), два края защемлены, два других – свободно опертые (с): 1 – слой модифицированного бетона; 2 – массив горных пород; 3 – анкер / Fig. 1. Design scheme of the “rock mass – anchor – modified concrete” mining system (a) with boundary conditions: all edges are pinched (b), two edges are pinched, the other two are freely supported (c): 1 – a layer of modified concrete; 2 – an array of rocks; 3 – anchor

Для решения задачи о НДС системы «порodный массив - анкер - модифицированный батон» использован вариационный метод Ритца [12], а критерии устойчивости в плоскости uoz (по ширине и кровле выработки) и прочности для интенсивности напряжений σ_i (предела пропорциональности σ_{pl}), максимальных нормальных $\sigma_{max(p,c)}$ и касательных τ_{max} напряжений, представленные в виде следующих функциональных зависимостей от параметров соответственно:

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_y^2 - \sigma_y \sigma_z + \sigma_z^2 + 3\tau_{yz}^2} \leq \sigma_{pl}, w \leq w_n \quad (1)$$

$$\sigma_{max(p,c)}, \tau(L, B, f, H, R, t_a, E_i, \nu_i, q_z, i, S, BC)_{max} \leq \sigma_{pl}, \leq \tau_{pr} \quad (2)$$

где L, B, f – длина, ширина и максимальная высота выработки соответственно, м;

R – радиус кривизны выработки, м;

t_a – расстояние между анкерами, м;

E_i, ν_i – модуль нормальной упругости, МПа, и коэффициент Пуассона i -го слоя оболочки;

S – количество слоев породного массива;

BC – граничные условия;

$\sigma_x, \dots, \tau_{yz}$ – нормальные и касательные напряжения, действующие в плоскости оболочки;

w, w_n – общий прогиб и нормированные перемещения породного массива выработки, м.

В работе использован прием, состоящий в представлении полного прогиба в виде суммы двух составляющих – за счет изгиба w_0 и сдвига w_1 . Искомые функции представлены в виде [10]:

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

$$w_1(x, y) = \sum_{j=1}^n c_j l_j(x) u_j(y); \quad (3)$$

$$\varphi(x, y) = \sum_{j=1}^n b_j p_j(x) q_j(y),$$

где $\varphi(x, y)$ – функция усилий;

a_j, b_j, c_j – неопределенные параметры;

f_j, g_j, \dots, q_j – заданные координатные функции, которые выбраны в виде степенных полиномов.

В пределах технической теории многослойных анизотропных оболочек, используя основные соотношения для деформаций, сил и моментов, для вариации полной энергии слоистой оболочки получим [9] (здесь и далее символ «*» – для параметров сдвига):

$$\delta \Delta \int \left[\frac{1}{2} L_a(w, w_1) - \frac{1}{2} L_c(\varphi, \varphi) - L(w_0, \varphi) + \frac{1}{2} L(w_1) - q_z w_0 \right] dS = 0. \quad (4)$$

Здесь введены следующие обозначения:

$$D_{jk} = a_{jk}, \quad 2D^*_{12} = a^*_{12}, \quad A_{11} = C_{22},$$

$$A_{22} = C_{11}, \quad \frac{1}{2} A^*_{12} = C^*_{12};$$

$$L_p(\psi, \eta) = p_{11}\psi_{xx}\eta''_{xx} + 2p_{12}\psi''_{xx}\eta_{yy} + p_{22}\psi_{yy}\eta''_{yy} + 2p^*_{12}\psi''_{xy}\eta_{xy}; \quad (5)$$

$$L(w_0, \varphi) = R^{-1} \iint (w_0)_x \varphi'_x; L(w_1) = G_{xz}(w'_1)_x + G_{yz}(w'_1)_y;$$

где D_{jk}, A_{jk} – соответственно жесткостные и упругие параметры оболочки;

R – радиус кривизны горной выработки;
 G_{xz}, G_{yz} – модули сдвига в двух направлениях; штрихами обозначены кратные производные.

В выражении $L_p(\psi, \eta)$ p_{jk} принимает значения a_{jk}, c_{jk} , а функции ψ и η соответствуют функциям w и φ .

Вводя безразмерные величины и константы по формулам:

$$w_0 = L_0 \bar{w}_0, w_1 = L_0 \bar{w}_1, \varphi = 2EH_0L_0^2 \bar{\varphi}, x = L_0 \bar{x}, y = B_0 \bar{y};$$

$$D_{jk} = 2D_0 h_{jk}, D^*_{12} = 2D_0 h^*_{12}, C_{jk} = 2C_0 \alpha_{jk}, C^*_{12} = 2C_0 \alpha^*_{12};$$

$$q_z = 2q_0 \bar{q}_z, q_0 = \sum \rho_i h_i, H = H_0 \bar{H}, \quad (6)$$

$$\beta_{ij} = \frac{\alpha_{ij}}{\Delta_2}, \beta_{12} = -\frac{\alpha_{12}}{\Delta_2}, \beta^*_{12} = \frac{1}{\alpha^*_{12}},$$

$$\Delta_1 = \alpha_{11}\alpha_{22} - \alpha^2_{12},$$

$$C_0 = -\frac{12(1-\nu^2)R^2}{H_0^2}, t_0 = \frac{L_0}{R}, k_0 = \frac{L_0}{B_0},$$

$$\tau_0 = \frac{G_0 H_0 L_0^2}{D_0}, \rho_0 = \frac{q_0 L_0^3}{D_0}$$

и опуская в дальнейшем черту в обозначениях безразмерных величин, получим систему уравнений следующего вида:

$$\sum_{j=1}^n a_j \iint \sum_{r=1}^5 F_r G_r dS + \sum_{j=1}^n c_j \iint \sum_{r=1}^5 F_r S_r dS + c_0 t_0^3 \sum_{j=1}^m b_j \iint KN dS = \rho_0 \iint f_i g_i dS, i = 1, 2, 3, \dots, n;$$

$$c_0 t_0^3 \sum_{j=1}^n a_j \iint RS dS + c_0 t_0^2 \sum_{j=1}^m b_j \iint \sum_{r=1}^5 P_r Q_r dS = 0; \quad (7)$$

$$i = n+1, n+2, \dots, n+m;$$

$$\sum_{j=1}^n a_j \iint \sum_{r=1}^5 K_r G_r dS + \sum_{j=1}^m c_j \iint \sum_{r=1}^7 K_r S_r dS = 0;$$

$$i = n+m+1, n+m+2, \dots, 2n+m.$$

Здесь входящие величины имеют вид

$$F_1 = f_i'' f_j'', F_2 = f_i'' f_j, F_3 = f_i f_j'', F_4 = f_i f_j,$$

$$F_5 = f_i' f_j', G_1 = h_{11} g_i g_j, G_2 = k^2_0 h_{12} g_i g_j'',$$

$$G_3 = k^2_0 h_{12} g_i'' g_j, G_4 = k^4_0 h_{12} g_i'' g_j'', G_5 = 4k^2_0 h^*_12 g_i' g_j',$$

$$S_1 = h_{11} l''_j u_j, S_2 = k^2_0 h_{12} l_j u''_j, S_3 = k^2_0 h_{12} l''_j u_j, \quad (8)$$

$$S_5 = 4k^2_0 h^*_12 l'_j u'_j, S_6 = \tau_0 \alpha_{13} l'_j u_j, S_7 = \tau_0 k^2_0 \alpha_{23} l_j u'_j,$$

$$K_1 = K_2 = l''_i u_i, K_3 = K_4 = l_i u''_i, K_5 = l'_i u'_i, K_6 = l'_i u_i,$$

$$K_7 = l_i u'_i, K = f_i' g_i, N = p_j q_j.$$

Выражения для функций P_r, Q_r и R, S получены из выражений для F_r, G_r и K, N заменой в них f, g на p, q, h_{jk} , на $b_{jk}, 4h^*_12$ на β^*_{12} и f, g на p, q, i на j и наоборот.

Интегралы в уравнении (5) вычисляются в пределах $0 \leq x \leq 1, 0 \leq y \leq 1$.

Для i -го слоя оболочки напряжения имеют вид [13]:

$$\sigma^i_x = \sum_{j=1}^m b_j (k^2_0 \beta_{11} p_j q''_j + \beta_{21} p''_j q_j) - \frac{z}{L_0} \left[\sum_{j=1}^n a_j (B^i_{11} f''_j g_j + k^2_0 B^i_{12} f_j g''_j) + \sum_{j=1}^m c_j (B^i_{11} l''_j u_j + k^2_0 B^i_{12} l'_j u''_j) \right];$$

$$\sigma^i_y = \sum_{j=1}^m b_j (k^2_0 \beta_{31} p_j q''_j + \beta_{41} p''_j q_j) - \frac{z}{L_0} \left[\sum_{j=1}^n a_j (B^i_{12} f''_j g_j + k^2_0 B^i_{22} f_j g''_j) + \sum_{j=1}^m c_j (B^i_{12} l''_j u_j + k^2_0 B^i_{22} l'_j u''_j) \right]; \quad (9)$$

$$\sigma^i_{xy} = -k_0 B^i_{12} \left[\beta^*_{12} \sum_{j=1}^m b_j p'_j q'_j + \frac{2z}{L_0} \left(\sum_{j=1}^n a_j f'_j g'_j + \sum_{j=1}^m c_j l'_j u'_j \right) \right];$$

$$\sigma^i_{xz} = G^i_{xz} \sum_{j=1}^n c_j l'_j u_j, \quad \sigma^i_{yz} = k_0 G^i_{yz} \sum_{j=1}^m c_j l_j u'_j,$$

$$\sigma^i_{\Sigma} = (v^i_x \sigma^i_x + v^i_y \sigma^i_y), \text{ при } \epsilon^i_{\Sigma} = 0,$$

где

$$\beta_1 = B^i_{11} \beta_{22} + B^i_{12} \beta_{12}; \quad \beta_3 = B^i_{12} \beta_{22} + B^i_{22} \beta_{12}; \quad (10)$$

$$\beta_2 = B^i_{11} \beta_{12} + B^i_{12} \beta_{11}; \quad \beta_4 = B^i_{12} \beta_{12} + B^i_{22} \beta_{11}.$$

Координатные функции выбраны в виде степенных полиномов по методу Ритца, удовлетворяющих геометрическим условиям.

Рассмотрена схема армирования породного массива анкерами и модифицированным бетоном, приведенные механические характеристики которого имеют вид [6]:

$$E^i_x = \frac{E_a d_a + (t - d_a) (E_n h_n^i + E_b h_b^i) / (h_n^i + h_b^i)}{t} = E' / t;$$

$$E^i_y = (E_a d_a + E_b^i h_b^i) / (d_a + h_b^i);$$

$$G_{xz}^i = \frac{G_a d_a + (t - d_a)(G_n^i h_n^i + G_b^i h_b^i)}{t} = E'/t;$$

$$G_{yz}^i = (G_a d_a + G_b^i h_b^i)/(d_a + h_b^i); G_{12}^{*i} = G_n^i;$$

$$v_x^i = \frac{v_a d_a + (t - d_a)(v_n^i h_n^i + v_b^i h_b^i)}{t} = v'/t;$$

$$v_y^i = (v_a d_a + v_b^i h_b^i)/(d_a + h_b^i);$$

$$G_a = \frac{E_a}{2(1 + \nu_a)}; G_n^i = \frac{E_n^i}{2(1 + \nu_n^i)}; G_b^i = \frac{E_b^i}{2(1 + \nu_b^i)}. \quad (11)$$

Здесь введены следующие обозначения:
 $E_a, E_n^i, E_b^i, G_a, G_n^i, G_b^i$ – модули нормальной упругости и сдвига материала анкера, слоёв породы и модифицированного бетона, МПа, соответственно;

ν_a, ν_n^i, ν_b^i – соответствующие коэффициенты Пуассона h_n^i, h_b^i ,

h_n^i – толщины, м;

d_a – диаметр анкера, м.

Системы координатных функций, в частности, для прогиба w_0 при двух граничных условиях породного массива приведены в табл. 1, 2.

Разработан алгоритм и составлена программа решения задачи.

Породный массив, в котором находится горная выработка на глубине 1000 м и более, состоит из трех слоев: верхний слой – песчаник; средний – песчаный сланец; нижний – глинистый сланец. Параметры выработки: длина $L = 150...300$ м; ширина $B = 5...7$ м; максимальная высота $f = 2,5$ м. Толщина породного массива $H = 3,0$ м; модули упругости пород $E = 35,6 \cdot 10^3; 18,9 \cdot 10^3; 10,8 \cdot 10^3$ МПа (соответствующие предельные напряжения на сжатия $\sigma_{сж} = 60,0; 40,8; 30,3$ МПа); коэффициенты Пуассона $\nu = 0,35, 0,25, 0,15; q_z = 3$ МПа.

В связи с тем, что в породном массиве возникают напряжения изгиба и растяжения, приняты предельные их значения: $\sigma_{pl(s)} = 0,1 \sigma_{pl(c)}$, то есть $\sigma_{pl(s)} = 6,0; 4,08; 3,03$ МПа соответственно, а с учетом трещин 80 % $\sigma_{pl(s)} = 0,61$ МПа.

Как показали предварительные результаты исследований, сходимость в результате использования приведенных координатных функций по методу Ритца достигается при их сочетании, равном 14. При этом наблюдает

Таблица 1 / Table 1

Коэффициенты полиномов $f_j(x), g_j(y)$, для условий породного массива с защемленными краями /
 Coefficients of polynomials $f_j(x), g_j(y)$, for conditions of a rock mass with pinched edges

f_j, g_j	x^2, y^2	x^3, y^3	x^4, y^4	x^5, y^5	x^6, y^6	x^7, y^7	x^8, y^8
1	1	-2	1				
2	-1	4	-5	2			
3	1	-8	19	-18	6		
4	-1	14	-55	92	-70	20	
5	1	-22	131	-340	440	-280	70

Таблица 2 / Table 2

Коэффициенты полиномов $f_j(x), g_j(y)$ для условий породного массива со свободными опорами /
 Coefficients of polynomials $f_j(x), g_j(y)$ for rock mass conditions with free supports

f_j, g_j	x^2, y^2	x^3, y^3	x^4, y^4	x^5, y^5	x^6, y^6	x^7, y^7	x^8, y^8	x^9, y^9
1	3	-5	2					
2	-12	40	-43	15				
3	92	-540	1113	-965	300			
4	-9	15	-6	3	-5	2		
5	12	-40	43	-27	40	-43	15	
6	-276	1620	-3339	2987	-1400	1113	-965	300

ся устойчивостью сходимости метода, так как дальнейшее их использование дает погрешность около 3 %.

В качестве модифицированного бетона использовали следующий состав: цемент, песок, щебень, вода и полипропиленовая фибра в процентном соотношении по массе – 15:32:45:7:1 с механическими характеристиками: модуль упругости $E = 2,0 \cdot 10^4$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,25$.

Результаты исследований НДС системы показали, что ее устойчивость при сжатии обеспечивается, а с учетом 80 % трещин максимальные нормальные напряжения на растяжения превышают предельные [2].

Используя приведенные данные, получены распределения максимальных суммарных перемещений w и за счет изгиба w_0 для аналогичных граничных условий.

Результаты исследований напряжений с учетом приведенных механических характеристик (11) при дополни-

тельных исходных данных: $E_a = 2 \cdot 10^5$ МПа, $E_n = 10,8 \cdot 10^3$ МПа, $E_b = 2 \cdot 10^4$ МПа, диаметр анкера $d_a = 3 \cdot 10^{-2}$ м, расстояние между анкерами $t_a = 0,8$ м, толщина слоя модифицированного бетона $\square_b = 8 \cdot 10^{-2}$ м показывают, что условия прочности выполняются. При этом, перемещения породного массива при его закреплении анкерами и слоем модифицированного бетона уменьшаются практически в два раза.

В результате расчетов, варьируя геометрическими размерами анкеров: расстоянием между ними $t_a = 0,5 \dots 0,8$ м, диаметром $d_a = (20 \dots 30) \cdot 10^{-3}$ м; толщиной породного массива $H = (2,0 \dots 3,0)$ м, длиной горной выработки $L = (100 \dots 300)$ м, приведенным модулем упругости $E_{xn} = (0,6 \dots 5,0) \cdot 10^4$ МПа при постоянной нагрузке, получены зависимости перемещений породного массива от отношений различных сочетаний его параметров (рис. 2) и разработана номограмма (рис. 3).

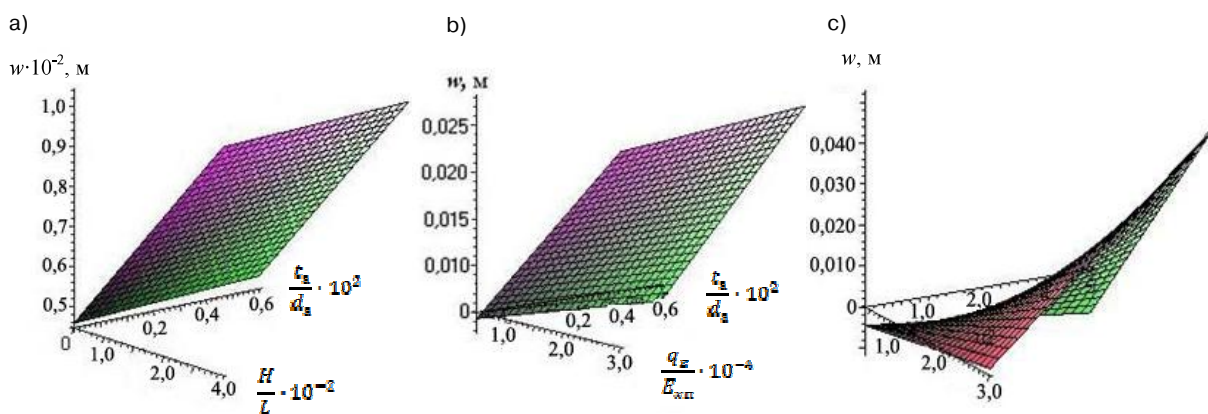


Рис. 2. Зависимость перемещений от отношений безразмерных величин: расстояния между анкерами к их диаметрам $\frac{t_a}{d_a}$ и толщины породного массива к длине выработки $\frac{H}{L}$ (а), расстояния между анкерами к их диаметрам и нагрузки к максимальному приведенному модулю упругости $\frac{q_z}{E_{xn}}$ (б), толщины породного массива к длине выработки $\frac{H}{L}$, нагрузки к максимальному приведенному модулю упругости $\frac{q_z}{E_{xn}}$ (в) при толщине модифицированного бетона $8 \cdot 10^{-2}$ м / Fig. 2. The dependence of displacements on the ratio of dimensionless quantities: the distance between the anchors to their diameters $\frac{t_a}{d_a}$ and the thickness of the rock mass to the length of the mine $\frac{H}{L}$ (a), the distance between the anchors to their diameters and the load to the maximum reduced modulus of elasticity $\frac{q_z}{E_{xn}}$ (b), the thickness of the rock mass to the length of the mine $\frac{H}{L}$, the load to the maximum reduced modulus of elasticity $\frac{q_z}{E_{xn}}$ (c) with a modified concrete thickness of 8×10^{-2} m

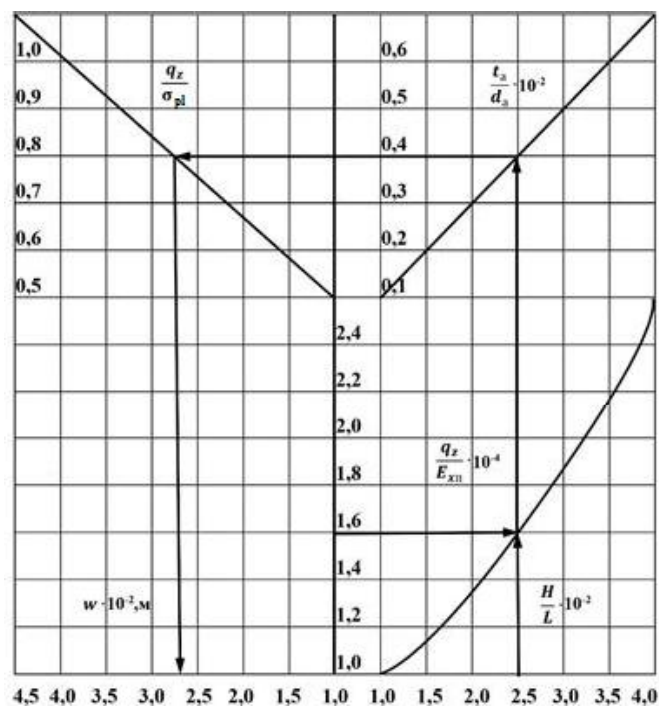


Рис. 3. Номограмма для определения прогиба закрепленного породного массива горной выработки анкерами и модифицированным бетоном в зависимости от безразмерных параметров: H, L, d_a, t_a – толщина породного массива, длина выработки, диаметр анкеров, расстояние между ними, м; σ_{pl}, E_{xn}, q_z – предел пропорциональности пород, приведенный максимальный модуль упругости породного массива, нагрузка от горного давления, МПа / Fig. 3. Nomogram for determining the deflection of the fixed rock mass of the mining by anchors and modified concrete depending on the dimensionless parameters: H, L, d_a, t_a – thickness of the rock mass, length of the workings, diameter of anchors, distance between them, m; σ_{pl}, E_{xn}, q_z – the limit of proportionality of rocks, the given maximum modulus of elasticity of the rock mass, the load from the rock pressure, MPa

Выводы

1. Отсутствие в Донецком бассейне анкерного крепления породного массива с использованием модифицированного бетона снижает безопасность ведения горных работ, не обеспечивает его длительную прочность и устойчивость в выработках глубоких угольных шахт.

2. Разработана математическая модель НДС системы «породный массив – анкер – модифицированный бетон», учитывающая различное сочетание геометрических размеров выработки; толщину слоев пород и их количество; параметры анкеров, приведенные

механические характеристики породного массива, различные граничные условия, позволила обосновать ее параметры, обеспечивающие прочность и устойчивость горных выработок глубоких угольных шахт.

3. Максимальные напряжения породного массива, состоящего из нижнего глинистого сланца, среднего – песчаного сланца, верхнего – песчаника, без крепи с двумя граничными условиями на глубине выработки 1000 м и ниже превышают предел пропорциональности. Крепь в виде анкеров и модифицированного бетона обеспечивает его прочность и устойчивость.

Список литературы

1. Амоша, В. И., Логвиненко В. И., Гринев В. Г. Комплексное освоение угольных месторождений Донецкой области. Донецк: ИЭП НАН Украины, 2007. 216 с.
2. Борщевский С. В., Марийчук И. Ф., Купенко И. Ф., Калякин С. А. Прочность и устойчивость системы «породный массив горной выработки – анкер – модифицированный бетон»: монография / под общ. ред. С. В. Борщевского и И. Ф. Марийчука. Донецк: Цифровая типография, 2022. 324 с.
3. Дрипан П. С. Математические модели устойчивости и прочности анкера при закреплении породного массива под действием нагрузки. Текст: электронный // Сборник научных трудов Донбасского госу-

дарственного технического института. 2020. № 20. С. 31–40. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44818454> (дата обращения: 14.04.2022).

4. Ефремов И. А., Александров С. Н., Марийчук И. Ф. Методы решений краевых задач в горной геомеханике: монография / под общ. ред. И. А. Ефремова. Донецк: Ноулидж, 2013. 291 с.

5. Кочура И. В. Анализ развития экономического потенциала угольной промышленности Донбасса в современных условиях хозяйствования. Текст: электронный // Вестник Института экономических исследований. 2018. № 4. С. 55–64. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38206523> (дата обращения: 14.04.2022).

6. Купенко И. В., Марийчук И. Ф., Барсук Н. Д. Приведенные механические характеристики для исследования напряженно-деформированного состояния системы «породный массив – анкерная крепь выработки – крепь выработки из модифицированного бетона». Текст: электронный // Проблемы горного дела: сб. науч. трудов II Междунар. форума студентов, аспирантов и молодых ученых-горняков, посвященного 100-летию ДонНТУ (г. Донецк, 08–09 апреля 2021 г.). Донецк: Донецкий нац. техн. ун-т, 2021. С. 50–54. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46125895> (дата обращения: 14.04.2022).

7. Купенко И. В., Марийчук И. Ф., Барсук Н. Д., Грицаенко А. Ю. Результаты исследования напряженно-деформированного состояния системы «анкерно-породная оболочка – крепь из модифицированного бетона» горизонтальной выработки. Текст: электронный // Инновационные перспективы Донбасса: материалы 7-й Междунар. науч.-практ. конф. (г. Донецк, 24–26 мая 2021 г.). Донецк: Донецкий нац. техн. ун-т, 2021. – С. 5–9. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46497560&pff> (дата обращения: 14.04.2022).

8. Марийчук И. Ф., Купенко И. В., Выговская Д. Д., Барсук Н. Д. Напряженно-деформированное состояние массива горных пород подземных объектов угольных шахт / под общ. ред. С. В. Борщевского, И. Ф. Марийчука: монография. Донецк: Донецкий нац. техн. ун-т, 2017. 275 с.

9. Марийчук И. Ф., Купенко И. В., Барсук Н. Д. Математическая модель системы «породный массив – анкерная крепь – крепь из модифицированного бетона горных выработок угольных шахт. Текст: электронный // Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики: материалы 16-й Междунар. конф. по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики (Тула, Минск, Донецк, 19–20 ноября 2020 г.) / под общ. ред. Р. А. Ковалева. Тула; Минск; Донецк: Тульский гос. ун-т, 2020. С. 85–89. URL: http://tsu.tula.ru/files/40/conf-2020_t1.pdf (дата обращения: 14.04.2022).

10. Махова А. О. Анализ угольной промышленности Донбасса: Проблемы и перспективы. Текст: электронный // Экономика и маркетинг в XXI веке: проблемы, опыт, перспективы: материалы 16-й Междунар. науч.-практ. конф. Донецк: ИЭП НАН Украины, 2018. С. 113–115. URL: <https://masters.donntu.org/2018/ief/machova/library/article1.htm> (дата обращения: 22.12.2021).

11. Плакиткина Л. С., Плакиткин Ю. А. Угольная промышленность мира и России: анализ, тенденции и перспективы развития. Москва: Литтерра, 2017. 374 с. ISBN 978-5-4235-0296-6. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29813696> (дата обращения: 14.04.2022). Текст: электронный.

12. Руппенейт К. В. Деформируемость массивов трещиноватых горных пород. М.: Недра, 1975. 223 с.

13. Mariychuk I. F., Borshevsky S.V., Kupenko I. V., Barsuk N. D., Gritsaenko A. J. Research of the stress-deformed state of the system «rock massif–anchor–modified concrete» support of excavation. Текст: электронный // Topical Issues of Rational Use of Natural Resources: XVII International Forum-Contest of Students and Young Researchers. Scientific conference abstracts (St Petersburg, May 31 – June 06, 2021). St Petersburg: Санкт-Петербургский горный университет, 2021. Vol. 1. P. 196–197. ISBN 978-5-94211-939-3. URL: <http://myouth.spmi.ru/sites/default/files/Volume%201%20correct.pdf> (дата обращения: 14.04.2022).

References

1. Amosha, V. I., Logvinenko V. I., Grinev V. G. *Kompleksnoye osvoyeniye ugolnyh mestorozhdeniy Donetskoy oblasti* (Integrated development of coal deposits in the Donetsk region). Donetsk: IEP NAS of Ukraine, 2007, 216 p.

2. Borschhevsky S. V., Mariychuk I. F., Kupenko I. F., Kalyakin S. A. *Prochnost i ustoychivost sistemy «porodny massiv gornoj vyrabotki – anker – modifitsirovanny beton»*: monografiya / pod obshch. red. S. V. Borshevskogo I. I. F. Mariychuka (Strength and stability of the system “rock mass of a mine working - anchor - modified concrete”: monograph / under the general. ed. S. V. Borschhevsky and I. F. Mariychuk). Donetsk: Digital Printing House, 2022. 324 p.

3. Dripan P. S. *Sbornik nauchnyh trudov Donbasskogo gosudarstvennogo tehničeskogo instituta* (Collection of scientific works of the Donbass State Technical Institute), 2020, no. 20. p. 31–40. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44818454> (date of access: 04/14/2022). Text: electronic.

4. Yefremov I. A., Aleksandrov S. N., Mariychuk I. F. *Metody resheniy krayevykh zadach v gornoj geomehanike*: monografiya / pod obshch. red. I. A. Yefremova (Methods for solving boundary value problems in mining geomechanics: monograph / ed. ed. I. A. Efremova). Donetsk: Knowledge, 2013, 291 p.

5. Kochura I. V. *Vestnik Instituta ekonomicheskikh issledovaniy* (Bulletin of the Institute of Economic Research). 2018, no. 4, p. 55–64. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38206523> (date of access: 04/14/2022). Text: electronic.

6. Kупенко I. V., Mariyчuk I. F., Barsuk N. D. *Problemy gornogo dela: sb. nauch. trudov II Mezhdunar. foruma studentov, aspirantov i molodykh uchenykh-gornyakov, posvyashchennogo 100-letiyu DonNTU* (Donetsk, 08–09 Aprelya 2021 g.) (Mining Problems: Collected scientific proceedings of the II Intern. forum of students, postgraduates and young mining scientists dedicated to the 100th anniversary of DonNTU (Donetsk, April 08–09, 2021)). Donetsk: Donetsk nat. tech. un-t, 2021, pp. 50–54. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46125895> (date of access: 04/14/2022). Text: electronic.

7. Kупенко I. V., Mariyчuk I. F., Barsuk N. D., Gritsayenko A. Yu. *Innovatsionnye perspektivy Donbassa: materialy 7-y Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (g. Donetsk, 24–26 Maya 2021)* (Innovative prospects of Donbass: scientific-practical. conf. (Donetsk, May 24–26, 2021)). Donetsk: Donetsk nat. tech. un-t, 2021. – P. 5–9. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46497560&pf> (date of access: 04/14/2022). Text: electronic.

8. Mariyчuk I. F., Kупенко I. V., Vygovskaya D. D., Barsuk N. D. *Napryazhenno-deformirovannoye sostoyaniye massiva gornyh porod podzemnykh obyektov ugolnykh shaht / pod obsch. red. S. V. Borschevskogo, I. F. Mariyчuka: monografiya* (Stress-strain state of the rock massif of underground objects of coal mines. ed. S. V. Borschevsky, I. F. Mariyчuk: monograph). Donetsk: Donetsk Nat. Tech. Un-ty, 2017, 275 p.

9. Mariyчuk, I. F., Kупенко I. V., Barsuk N. D. *Sotsialno-ekonomicheskiye i ekologicheskkiye problemy gornoj promyshlennosti, stroitelstva i energetiki: materialy 16-y Mezhdunar. konferentsii po problemam gornoj promyshlennosti, stroitelstva i energetiki* (Socio-economic and environmental problems of the mining industry, construction and energy: materials of the 16th Intern. conference on the problems of mining, construction and energy (Tula, Minsk, Donetsk, November 19–20, 2020) / edited by. ed. R. A. Kovaleva). Tula; Minsk; Donetsk: Tula State Un-ty, 2020, pp. 85–89. Available at: http://tsu.tula.ru/files/40/conf-2020_t1.pdf (date of access: 04/14/2022). Text: electronic.

10. Makhova A. O. *Ekonomika i marketing v XXI veke: problemy, opyt, perspektivy: materialy 16-y Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (Economics and marketing in the XXI century: problems, experience, prospects: materials of the 16th Intern. scientific-practical. conf. Donetsk: IEP NAS of Ukraine, 2018, pp. 113–115. Available at: <https://masters.donntu.org/2018/ief/machova/library/article1.htm> (date of access 12/22/2021). Text: electronic.*

11. Plakitkina L. S., Plakitkin Yu. A. *Ugolnaya promyshlennost mira i Rossii: analiz, tendentsii i perspektivy razvitiya* (Coal industry of the world and Russia: analysis, trends and development prospects). Moscow: Litterra, 2017. 374 p. ISBN 978-5-4235-0296-6. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29813696> (date of access: 04/14/2022). Text: electronic.

12. Ruppeneyt K. V. *Deformiruyemost massivov treschinovatykh gornyh porod* (Deformability of massifs of fractured rocks). M.: Nedra, 1975. 223 p.

13. Mariyчuk I. F., Borshevsky S.V., Kупенко I. V., Barsuk N. D., Gritsaenko A. J. *Topical Issues of Rational Use of Natural Resources: XVII International Forum-Contest of Students and Young Researchers. Scientific conference abstracts* (St Petersburg, May 31 – June 06, 2021) (Topical Issues of Rational Use of Natural Resources: XVII International Forum-Contest of Students and Young Researchers. Scientific conference abstracts (St Petersburg, May 31 – June 06, 2021). St Petersburg: St. Petersburg Mining University, 2021. Vol. 1, pp. 196–197. ISBN 978-5-94211-939-3. Available at: <http://myouth.spmi.ru/sites/default/files/Volume%201%20correct.pdf> (Accessed 04/14/2022). Text: electronic.

Информация об авторе

Алабьев Вадим Рудольфович, д-р техн. наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры безопасности жизнедеятельности, Кубанский государственный технологический университет, г. Краснодар, Россия. Область научных интересов: тепловой режим подземных сооружений, геомеханика и разрушение горных пород. avr.09@mail.ru

Купенко Иван Владимирович, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры строительства зданий, подземных сооружений и геомеханики, Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, Донецкая Народная Республика. Область научных интересов: геотехнология, геомеханика и разрушение горных пород. ivk1978@mail.ru

Барсук Никита Дмитриевич, ассистент кафедры строительства зданий, подземных сооружений и геомеханики, Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, Донецкая Народная Республика. Область научных интересов: геотехнология, геомеханика и разрушение горных пород
barsuk_nikita93@mail.ru

Демин Владимир Иванович, канд. техн. наук, доцент ВАК, доцент кафедры безопасности жизнедеятельности, Кубанский государственный технологический университет (КубГТУ), г. Краснодар, Россия. Область научных интересов: охрана труда, промышленная безопасность, геомеханика и разрушение горных пород.
avr.09@mail.ru

Information about the author

Vadim Alabyev, doctor of technical sciences, professor, Safety of Life Activity and Environmental Protection department, FSBEI HE «Kuban State Technological University», Krasnodar, Russia. Research interests: thermal regime of underground structures, geomechanics and rock failure

Ivan Kuppenko, candidate of technical sciences, associate professor, assistant professor, Building Construction, Underground Structures and Geomechanics department, Donetsk National Technical University, Donetsk, Donetsk People's Republic. Research interests: geotechnology, geomechanics and rock failure

Nikita Barsuk, assistant, Building Construction, Underground Structures and Geomechanics department, Donetsk National Technical University, Donetsk, Donetsk People's Republic. Research interests: geotechnology, geomechanics and rock failure

Vladimir Demin, candidate of technical sciences, associate professor, assistant professor, Life Activity and Environmental Protection department, FSBEI HE «Kuban State Technological University», Krasnodar, Russia. Research interests: labor protection, industrial safety, geomechanics and rock failure

Для цитирования

Алабьев В. Р., Купенко И. В., Барсук Н. Д., Демин В. И. Обоснование параметров прочности и устойчивости горной выработки в системе «породный массив – анкер – модифицированный бетон» // Вестник Забайкальского государственного университета. 2022. Т. 28, № 4. С. 6–15. DOI: 10.21209/2227-9245-2022-28-4-6-15.

Alabyev V., Kuppenko I., Barsuk N., Demin V. Substantiation of strength and stability parameters of mining in the system "rock mass – anchor – modified concrete" // Transbaikal State University Journal, 2022, vol. 28, no. 4, pp. 6–15. DOI: 10.21209/2227-9245-2022-28-4-6-15.

Статья поступила в редакцию: 08.04.2022 г.

Статья принята к публикации: 18.04.2022 г.