

МЕТОД ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИОННЫХ И ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГОРНЫХ ПОРОД РЕГУЛЯРНО-БЛОЧНОЙ СТРУКТУРЫ

Л.А. Назаров¹, Н.А. Голиков¹, А.А. Скулкин¹, Л.А. Назарова²

¹ Новосибирский национальный исследовательский государственный университет,
Новосибирск, Россия, e-mail: mining1957@mail.ru

² Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения РАН,
Новосибирск, Россия

Аннотация: Разработан и в лабораторных условиях апробирован метод количественной оценки деформационных и фильтрационных свойств горных пород квазирегулярной структуры, в основе которого лежит идея физического осреднения, когда эксперименты проводятся на образцах из однотипных структурных элементов. Из искусственного геоматериала (смесь калиброванного песка и криогеля в соотношении 7:3) по оригинальной технологии изготовлены пластины $10 \times 7 \times 1$ см и цилиндры (диаметр 3 см, высота 6 см). Последние испытаны по стандартным методикам, определены модуль Юнга $E = 370$ МПа, предел прочности на одноосное сжатие и проницаемость $k_m = 8,4$ Д искусственного геоматериала. Из шести пластин компоновался слоистый образец с пятью нарушениями сплошности, осуществлялось мягкое ступенчатое нагружение ($\sigma(n)$ – напряжение) в направлении, ортогональном нарушениям. По измеренному укорочению образца при известной E находились эмпирические константы двухпараметрической дробно-линейной функции, описывающей зависимость конвергенции берегов и раскрытости нарушений δ от σ . Затем образец с изолированной боковой поверхностью помещался в герметичную камеру и подвергался ступенчатому сжатию по той же программе. На каждом шаге нагружения n проводились фильтрационные испытания и в стационарном режиме регистрировался расход газа Q_{ni} при заданном входном давлении P_i . Разработана геомеханическая модель эксперимента и с использованием полученного аналитического решения проведена интерпретация данных испытаний: при известных δ и k_m по Q_{ni} рассчитана проницаемость нарушений сплошности k_f при каждом значении σ . Установлены эмпирические зависимости $k_f(\delta)$ и $k_f(\sigma)$.

Ключевые слова: фильтрация, напряжение, проницаемость, блочный образец, нарушение сплошности, лабораторный эксперимент, искусственный геоматериал.

Благодарность: Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-27-00339).

Для цитирования: Назаров Л. А., Голиков Н. А., Скулкин А. А., Назарова Л. А. Метод экспериментального определения деформационных и фильтрационных характеристик горных пород регулярно-блочной структуры // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 11. – С. 70–81. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_11_0_70.

Method of experimental determination of deformation and flow characteristics in rocks with regular block structure

L.A. Nazarov¹, N.A. Golikov¹, A.A. Skulkin¹, L.A. Nazarova²

¹ Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia, e-mail: mining1957@mail.ru

² Chinakal Institute of Mining of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

Abstract: The method of evaluation of deformation and flow characteristics in rocks with quasi-regular structure is developed and tested on a laboratory scale. The method uses the idea of physical averaging and testing of samples composed of twin structural components. Using an original technology and a manmade geomaterial (mixture of calibrated sand and cryogel at a ratio of 7 : 3), the plates 10×7×1 cm and cylinders (diameter 3 cm, height 6 cm) were manufactured. The cylinders were tested using standard procedures, and the characteristics of the manmade geomaterial were determined: the Young modulus $E=370$ MPa, the uniaxial compression strength, the permeability $k_m=8.4$ darcy. The plates in number of 6 were used to make a layered sample with five discontinuities; the sample was subjected to stepped loading ($\sigma(n)$ -stress) applied in orthogonal direction to the discontinuities. From the measured contraction of the sample at the known E , the empirical constants were found for the two-parametric homographic function describing the discontinuity convergence and opening δ versus σ . Then, the side surface of the sample was isolated, the sample was placed in a sealed cell and subjected to the same program stepped loading. At each loading step n , the stationary flow tests were carried out, and the gas flow rate Q_{ni} was recorded at the present inlet pressure P_i . The geomechanical model of the experiment was built, and using the obtained analytical solution, the test data interpretation was undertaken: at the known values of δ and k_m , and the measured Q_{ni} , the discontinuity permeability k_f was calculated at each value of σ . The empirical dependences of $k_f(\delta)$ and $k_f(\sigma)$ were found.

Key words: flow, stress, permeability, block sample, discontinuity, laboratory experiment, man-made geomaterial.

Acknowledgements: The study was supported by the Russian Science Foundation, Project No. 23-27-00339.

For citation: Nazarov L. A., Golikov N. A., Skulkin A. A., Nazarova L. A. Method of experimental determination of deformation and flow characteristics in rocks with regular block structure. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(11):70-81. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_11_0_70.

Введение

Прогноз газообильности и заблаговременная дегазация угольных пластов [1 – 3], захоронение газообразных отходов производства в геологических формациях, утилизация шахтного метана и «зеленая энергетика» [4, 5], моделирование процессов массопереноса в углепородных массивах для обоснования техно-

логий выемки запасов [6, 7], инверсия ГИС данных для выявления продуктивных интервалов и оценки обычных характеристик скважин [8] — при решении этих и многих других проблем углефтегазодобычи необходима информация о фильтрационно-емкостных свойствах пород-коллекторов, которую получают по данным лабораторных экспериментов

[9], натуральных измерений [10] с использованием математического моделирования [11–13].

Многие угольные [14] и нефтяные [15] пласты имеют слоистую структуру, при незначительном уровне напряжений проницаемость слоев k_m много меньше проницаемости межслоевых нарушений (макротрещин) k_f [16, 17]. Однако с ростом глубины горных работ разница между k_m и k_f может нивелироваться, поскольку чувствительность к напряжениям у нарушений гораздо выше, чем у горных пород [18, 19]. Зависимость k_m от напряжений [20, 21] определяется, как правило, в лабораторных условиях с учетом стандартных методик (ГОСТ 28985–91. Породы горные). Величина k_f зависит от многих факторов, некоторые из них (в частности, раскрытость и рельеф берегов нарушения) невозможно определить *in situ*. Поэтому в эксперименте используют образцы с одиночным нарушением сплошности с *a priori* известной геометрией берегов для исследования его механических характеристик [22–25]. Полученные данные несут, по сути, уникальный характер, и их перенос на реальный массив горных пород требует дополнительного анализа [24].

В статье предложен и апробирован на искусственных образцах блочной структуры экспериментальный метод определения деформационных и фильтрационных свойств нарушений сплошности, а также эмпирической зависимости проницаемости последних от напряжений.

Геомеханическая модель эксперимента

Теоретически показано [17, 26], что проницаемость идеальной трещины $k_f = \delta^2/12(\delta - \text{раскрытость})$. По данным лабораторных экспериментов, проводившихся в большинстве случаев на одиночных трещинах [17, 27, 28], получено

соотношение $k_f \sim \delta^3$, в которое обычно вносятся поправочные коэффициенты, зависящие от шероховатости берегов, густоты трещин, свойств вмещающих пород и т.д. При использовании таких соотношений для моделирования реального массива предполагается, что проницаемость всех рассматриваемых трещин одинакова и равна величине k_f , установленной в эксперименте. Здесь предлагается иной подход, когда испытывается образец регулярно-блочной структуры и в эксперименте осуществляется «физическое» осреднение.

Рассмотрим параллелепипед R с размерами X, Y, Z по соответствующим осям декартовой системы координат (x, y, z) , составленный из m одинаковых блоков B (высота H), разделенных $m - 1$ нарушениями сплошности J (трещинами) с раскрытостью $\delta \ll H$ (рис. 1, а). Движение флюида в R описывается системой, включающей:

уравнение неразрывности

$$(\varphi\rho)_{,t} + (\rho V_j)_{,j} = 0; \quad (1)$$

закон Дарси

$$V_j = -kp_j / \eta \quad (2)$$

и уравнения состояния

$$\rho = \rho_a p / p_a, \quad (3)$$

где p — давление; V_j — компоненты вектора скорости фильтрации; $j = x, y, z$ (по повторяющемуся индексу производится суммирование), ρ и η — плотность и вязкость флюида; φ и k — пористость и проницаемость среды ($k = k_b$ в блоках, $k = k_f$ в трещинах); ρ_a — плотность флюида при атмосферном давлении p_a . На границах параллелепипеда ∂R формулируем следующие условия:

$$\begin{aligned} V_y(x, 0, z) = V_y(x, Y, z) = \\ = V_z(x, y, 0) = V_z(x, y, Z) = 0; \end{aligned} \quad (4)$$

$$p(0, y, z) = P_0, \quad p(X, y, z) = P_i, \quad (5)$$

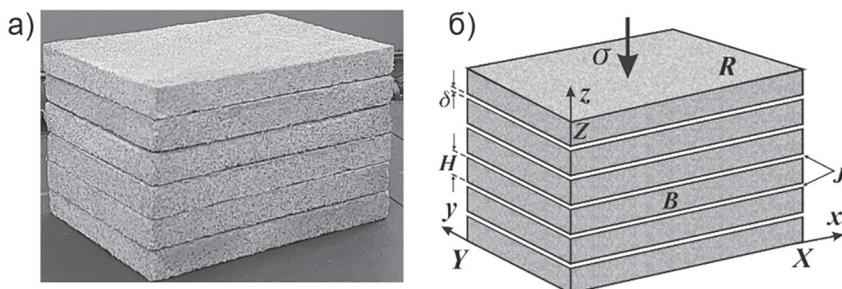


Рис. 1. Исследуемый объект: блочный образец из искусственного геоматериала (а); область моделирования R (б);

Fig. 1. Object under investigation: block specimen made of artificial geomaterial (a); modeling domain R (b)

где P_i и P_0 — входное и выходное давления.

Система (1)–(5) имеет стационарное решение:

$$p(x, y, z) = \sqrt{P_0^2 + (P_i^2 - P_0^2)x/X},$$

тогда расход на границе $x = 0$ вычисляется по формуле

$$Q = Y \left[k_b m H + k_f (m-1) \delta \right] \frac{P_i^2 - P_0^2}{2\eta X P_0}. \quad (6)$$

Пусть нижняя граница $z = 0$ области R неподвижна в вертикальном направлении, на верхней границе $z = Z$ приложено постоянное сжимающее напряжение $\sigma_{zz} = \sigma$ (рис. 1, а).

Если блоки B — упругие (модуль Юнга E), то вертикальная деформация каждого из них равна σ/E , а вертикальное укорочение параллелепипеда

$$\Delta Z = m\sigma H / E + (m-1)w, \quad (7)$$

где w — конвергенция берегов каждого нарушения J . Деформирование последних под действием нормального к плоскости J напряжения σ описывается дробно-линейной функцией [29]

$$w(\sigma) = \frac{w_* \sigma}{\sigma_* + \sigma}, \quad (8)$$

где σ_* и w_* — эмпирические константы;

$w_* = \lim_{\sigma \rightarrow \infty} w(\sigma)$ — предельное сближение,

тогда раскрытость $\delta = w_* - w$.

Таким образом, из (6) при известных σ_* , w_* и k_b для каждого значения σ можно определить величину проницаемости нарушений k_f по измеренному в фильтрационных испытаниях стационарному расходу Q .

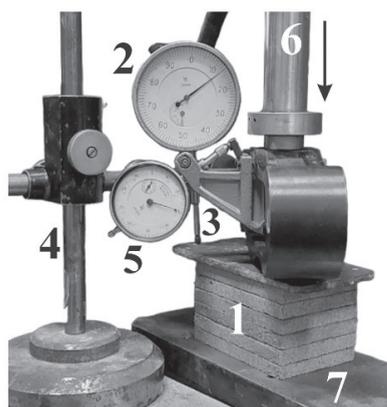
Лабораторные эксперименты: процедура и интерпретация результатов

Образцы из искусственного геоматериала

Из смеси криогеля и калиброванного песка (фракция 0,25–0,35 мм) в пропорции 3:7 по описанной в [30] технологии изготовлены шесть пластин размерами 10×7×1 см и четыре цилиндрических образца (высота 6 см, диаметр 3 см). Последние испытаны по стандартным методикам (ГОСТ 26450.2–85, ГОСТ 28985–91. Породы горные), и для искусственного геоматериала установлены: модуль Юнга $E = 370$ МПа, предел прочности на одноосное сжатие 9,1 МПа и проницаемость по газу $k_b = 8,4$ Д.

Определение деформационных характеристик нарушений плоскости

Из пластин компоновали слоистый образец ($m = 6$, $X = 0,1$ м, $Y = 0,07$ м, $Z = 0,06$ м, рис. 1, б), который на лабораторной установке (рис. 2) подвергал-



- 1 – блочный образец
- 2 – микрометр часового типа
- 3 – шток микрометра
- 4 – штатив
- 5 – динамометр
- 6 – шток нагружающего устройства
- 7 – жесткое основание

Рис. 2. Установка для деформационных испытаний
Fig. 2. Deformation test bench

ся ступенчатому сжатию. При каждом уровне нагрузки F_n (табл. 1, колонка 1) измерялось укорочение образца ΔZ_n (колонка 3), а из (7) вычислялась конвергенция берегов нарушений (колонка 4):

$$W_n = \frac{\Delta Z_n - m\sigma_n H / E}{m - 1},$$

где $\sigma_n = F_n / XY$ – напряжение, действующее перпендикулярно J (колонка 2).

Предполагая, что имеет место соотношение (8), методом наименьших квадратов по экспериментальным данным

(σ_n, W_n) (см. табл. 1, колонки 2 и 4, кружки на рис. 3) определены эмпирические константы $\sigma_* = 0,122$ МПа и $w_* = 73,29$ мкм (коэффициент вариации 2,2%). В колонках 5 и 6 (см. табл. 1) представлены значения конвергенции берегов w и раскрытости δ нарушений J , рассчитанные по (8) при найденных σ_* и w_* , а на рис. 3 – графики функций $w(\sigma)$ и $\delta(\sigma)$. Полученная зависимость раскрытости от напряжения (см. табл. 1, колонка 6) использовалась при обработке данных фильтрационных испытаний.

Таблица 1

Данные и результаты интерпретации деформационных испытаний
Data and interpretation results of deformation tests

	1	2	3	4	5	6
n	F_n , кН	σ_n , МПа	ΔZ_n , мкм	W_n , мкм	$w(\sigma_n)$, мкм	δ , мкм
1	0,20	0,029	75	14,07	14,20	59,09
2	0,25	0,036	90	16,84	16,93	56,36
3	0,40	0,057	135	25,15	23,79	49,50
4	0,55	0,079	160	29,45	29,16	44,13
5	0,80	0,114	200	36,29	35,92	37,37
6	0,95	0,136	210	37,60	39,07	34,23
7	1,30	0,186	250	43,97	44,68	28,61
8	1,65	0,236	280	48,36	48,72	24,58
9	2,10	0,300	310	52,27	52,49	20,80
10	2,60	0,371	330	53,95	55,52	17,77
11	3,50	0,500	380	59,78	59,21	14,08

Эксперименты по стационарной фильтрации

Четыре боковых грани образца с образующей 10 см изолировались полиуретановой манжетой, что обеспечивало выполнение условий (4). Образец 1 в манжете помещался в герметичную камеру 2 и подвергался ступенчатому сжатию в вертикальном направлении (см. рис. 1) с усилием F_n (см. табл. 1, колонка 1), которое контролировалось динамометром 3 (рис. 4). При каждом уровне n нагрузки проводились фильтрационные испытания: на входе создавалось давление воздуха $P_i = 0,111, 0,112, \dots, 0,115$ МПа, а на выходе при одном и том же давлении $P_0 = 0,110$ МПа регистрировался расход Q_{ni} ($n = 1, \dots, 8; i = 1, \dots, 5$) при стационарном режиме. Таким образом, для установления зависимости проницаемости трещин от напряжений получен массив данных, представленный в табл. 2 (колонки 1, 3, ..., 15).

Таблица 2

Данные фильтрационных испытаний при различном напряжении σ_n
Data of filtration tests at various stress σ_n

i	P_i , МПа	1	2	3	4	5	6	7	8
		$\sigma_1 = 0,029$ МПа		$\sigma_2 = 0,036$ МПа		$\sigma_3 = 0,057$ МПа		$\sigma_4 = 0,079$ МПа	
		Q_{1i} , мл/мин	k_{f1} , Д	Q_{2i} , мл/мин	k_{f2} , Д	Q_{3i} , мл/мин	k_{f3} , Д	Q_{4i} , мл/мин	k_{f4} , Д
1	0,111	2220	74,26	2200	61,05	2170	40,79	2160	35,02
2	0,112	4450	69,44	4430	64,44	4370	44,79	4340	34,22
3	0,113	6710	69,96	6670	62,25	6580	42,44	6540	33,43
4	0,114	8990	69,81	8940	62,84	8820	43,25	8760	32,65
5	0,115	11 300	70,98	11 230	62,87	11 080	43,43	11 000	31,88
			70,89		62,69		42,94		33,44

i	P_i , МПа	9	10	11	12	13	14	15	16
		$\sigma_5 = 0,114$ МПа		$\sigma_6 = 0,136$ МПа		$\sigma_7 = 0,186$ МПа		$\sigma_8 = 0,236$ МПа	
		Q_{5i} , мл/мин	k_{f5} , Д	Q_{6i} , мл/мин	k_{f6} , Д	Q_{7i} , мл/мин	k_{f7} , Д	Q_{8i} , мл/мин	k_{f8} , Д
1	0,111	2140	16,00	2140	17,47	2130	4,33	2130	5,04
2	0,112	4310	21,49	4300	16,57	4290	11,59	4280	3,90
3	0,113	6490	18,56	6480	15,69	6460	7,84	6460	9,13
4	0,114	8700	19,82	8680	14,82	8660	9,57	8650	6,39
5	0,115	10 930	20,24	10 900	13,95	10 880	10,20	10 860	4,31
			19,22		15,70		8,71		5,75

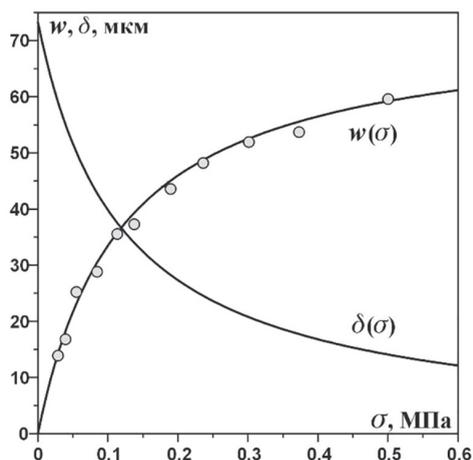
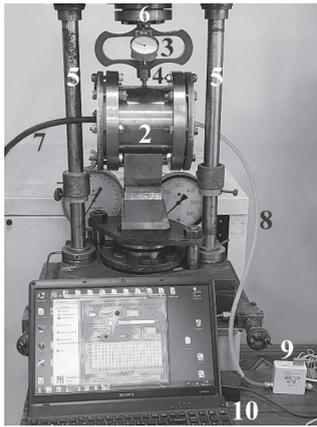


Рис. 3. Зависимость конвергенции берегов w и раскрытости δ нарушения от напряжения σ
Fig. 3. Dependence of the edge convergence w and the opening δ of the joint on the stress σ

И деформационные, и фильтрационные испытания проводились дважды при различном порядке пластин в образце для повышения достоверности резуль-



- 1 – образец
 - 2 – герметичная камера
 - 3 – динамометр
 - 4 – шток, передающий нагрузку на образец
 - 5, 6 – стойки и шток гидравлического пресса
 - 7, 8 – магистрали компрессора и расходомера
 - 9 – расходомер
 - 10 – РС
- Стрелка указывает направление сжатия

Рис. 4. Лабораторная установка для фильтрационных испытаний
Fig. 4. Laboratory plant for filtration tests

татов экспериментов. Из (6) находится проницаемость нарушений сплошности

$$k_f = \frac{1}{(m-1)\delta} \left[\frac{2\eta X P_0 Q_{ni}}{(P_i^2 - P_0^2)Y} - k_b m H \right], \quad (9)$$

где сближения берегов δ и расхода Q_{ni} приведены в табл. 1 и 2 соответственно. Результаты расчетов по (9) при $\eta = 0,00001$ Па·с (воздух) представлены в табл. 2 (колонки 2, 4, ..., 16). В качестве k_f принимается среднее значение по соответствующей колонке (последние строки в табл. 2). Следует обратить внимание, что с ростом напряжения отношение расходов газа через нарушения и

пластины, оцениваемое величиной $\delta k_f / H k_b$, быстро уменьшается и становится сравнимым с относительной точностью расходомера. Это обуславливает разброс вычисленных значений k_f и необходимость проведения опытов при различном входном давлении P_i с последующим осреднением. Примем, что связь проницаемости нарушений с раскрытостью описывается функцией

$$k_f(\delta) \cong \frac{\delta^3}{12(A + B\delta)}, \quad (10)$$

которая при $A = 0$ и $B = 1$ превращается в известную зависимость для идеальной трещины, а при $B = 0$ и надлежащем выбо-

Таблица 3

Данные деформационных и фильтрационных испытаний и результаты их интерпретации

Data of deformation and filtration tests and the results of their interpretation

n	σ_n , МПа	δ , мкм	k_p , Д	$k_f(\sigma_n)$, Д
1	0,029	59,09	70,89	71,22
2	0,036	56,36	62,69	62,56
3	0,057	49,50	42,94	43,74
4	0,079	44,13	33,44	31,79
5	0,114	37,37	19,22	19,95
6	0,136	34,23	15,70	15,57
7	0,186	28,61	9,37	9,36
8	0,236	24,58	5,75	6,06

ре A — в исправленный «кубический закон» [28]. Эмпирические константы $A = 177,7$ мкм и $B = 1,08$ (коэффициент вариации 2,3%), найденные методом наименьших квадратов по данным деформационных и фильтрационных испытаний (табл. 3), характеризуют шероховатость рассмотренных нарушений как «низкую» по классификации (Руководство по методике определения фильтрационно-суффозионных свойств скальных оснований гидротехнических сооружений, 1975). В последней колонке табл. 3 приведены рассчитанные по (10) значения k_f : относительная погрешность не превышает 5%.

Из (8) и (10) находится зависимость проницаемости нарушений сплошности от нормального напряжения:

$$k_f \cong \frac{w_*^3}{12(A_s + Bw_*)s^2}, \quad (11)$$

где $s = 1 + \sigma / \sigma_*$.

Касательное деформирование нарушений значительно меньше, чем нормальное, влияет на величину раскрытия (эффект дилатансии) и, следовательно, на проницаемость k_f [22, 31]. Поэтому если в массиве горных пород с квазирегулярной системой нарушений сплошности известно распределение напряжений, то в (11) в качестве σ следует принимать нормальную компоненту век-

тора напряжений на площадке, параллельной плоскости нарушений.

Заключение

Создан в лабораторных условиях и апробирован основанный на идее физического осреднения метод, позволяющий определить механические характеристики нарушений сплошности по данным совместных деформационных и фильтрационных испытаний искусственных блочных образцов.

Установлено, что проницаемость нарушений описывается рациональной функцией типа (11) от ортогональных к плоскости нарушений напряжений, эмпирические коэффициенты которой зависят от деформационных свойств нарушений.

Представляется, что дальнейшие исследования должны развиваться в следующих направлениях:

- разработка и реализация метода количественной оценки проницаемости k_b для реальных образцов горных пород квазирегулярной трещиноватой структуры, поскольку стандартные методики для таких объектов непригодны;
- теоретическое обоснование и апробация метода определения пористости блоков и нарушений сплошности по данным нестационарных фильтрационных испытаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рубан А. Д., Артемьев В. Б., Забурдяев В. С., Захаров В. Н., Логинов А. К., Ютяев Е. П. Подготовка и разработка высокогазоносных угольных пластов. — М.: Изд-во «Горная книга», 2010. — 500 с.
2. Schissler A. P. Coal mining, design and methods of / Encyclopedia of Energy. Cleveland C. J. (Ed.), Elsevier, 2004, pp. 485—494. DOI: 10.1016/b0-12-176480-x/00284-9.
3. Забурдяев В. С., Малинникова О. Н., Трофимов В. А. Метанообильные шахты: добыча угля, газовыделение, метановая опасность. — Калуга: ООО «Манускрипт», 2020. — 334 с.
4. Thakur P. Advanced reservoir and production engineering for coal bed methane. Houston, Gulf Professional Publishing, 2016, 404 p. DOI: 10.1016/B978-0-12-803095-0.00013-2.
5. Mosleh M. H., Sedighi M., Babaei M., Turner M. Geological sequestration of carbon dioxide / Managing Global Warming, Letcher T. M. (Ed.). Academic Press, 2019, pp. 487—500. DOI: 10.1016/b978-0-12-814104-5.00016-8.

6. Nazarov L. A., Nazarova L. A. Some geomechanical aspects of gas recovery from coal seams // Journal of Mining Science. 1999, vol. 35, no. 2, pp. 135–145. DOI: 10.1007/BF02565367.

7. Захаров В. Н., Трофимов В. А., Филиппов Ю. А., Шляпин А. В. О дегазации углеородного массива в кровле обрабатываемого угольного пласта // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 11. – С. 20–36. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_11_0_20.

8. Robinson P. R., Hsu C. S. Introduction to petroleum technology / Springer Handbook of Petroleum Technology. Cham, Springer. 2017, pp. 1–83. DOI: 10.1007/978-3-319-49347-3_1.

9. Аверин А. П., Белоусов Ф. С., Пашичев Б. Н., Трофимов В. А. Закономерности фильтрации газа через образец горной породы // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 10. – С. 100–111. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_10_0_100.

10. Seidle J. Foundations of coalbed methane reservoir engineering. PennWell Books, 2011, 416 p.

11. Тайлаков О. В., Макеев М. П., Уткаев Е. А. Определение коллекторских свойств угля на основе численного моделирования и в лабораторных исследованиях // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 9. – С. 99–108. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_9_0_99.

12. Назарова Л. А., Назаров Л. А., Полевщиков Г. Я., Родин Р. И. Определение коэффициента диффузии и содержания газа в угле на основе решения обратной задачи // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2012. – № 5. – С. 15–23. DOI: 10.1134/S1062739148050024.

13. Pan Z., Connell L. D. Modelling permeability for coal reservoirs. A review of analytical models and testing data // International Journal of Coal Geology. 2012, vol. 92, pp. 1–44. DOI: 10.1016/j.coal.2011.12.009.

14. Thomas L. J., Thomas L. P. Coal geology. John Wiley & Sons, 2002, 384 p.

15. Дорофеева Т. В., Краснов С. Г., Лебедев Б. А., Петрова Г. В., Позиненко Б. В. Коллекторы нефтей Баженовской свиты Западной Сибири. – Л.: Недра, 1983. – 131 с.

20. Захаров В. Н., Малинникова О. Н., Трофимов В. А., Филиппов Ю. А. Зависимость проницаемости угольного пласта от газосодержания и действующих напряжений // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2016. – № 2. – С. 16–25. DOI: 10.1134/S1062739116020345.

Литературу с п. 16 по п. 19 и с п. 21 по п. 29 смотри в REFERENCES.

30. Назарова Л. А., Назаров Л. А., Голиков Н. А., Скулкин А. А. Зависимость проницаемости геоматериалов от напряжений по данным лабораторных экспериментов на цилиндрических образцах с центральным отверстием // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2019. – № 5. – С. 18–25. DOI: 10.15372/FTPRPI20190503.

31. Tan R., Chai J., Cao C. Experimental investigation of the permeability measurement of radial flow through a single rough fracture under shearing action // Advances in Civil Engineering. 2019, vol. 2019, article 6717295. DOI: 10.1155/2019/6717295. **PLoS**

REFERENCES

1. Ruban A. D., Artem'ev V. B., Zaburdyayev V. S., Zakharov V. N., Loginov A. K., Yutyaev E. P. *Podgotovka i razrabotka vysokogazonosnykh ugol'nykh plastov* [Preparation and development of high-gas-bearing coal seams], Moscow, Izd-vo «Gornaya kniga», 2010, 500 p.

2. Schissler A. P. Coal mining, design and methods of. *Encyclopedia of Energy*. Cleveland C. J. (Ed.), Elsevier, 2004, pp. 485–494. DOI: 10.1016/b0-12-176480-x/00284-9.

3. Zaburdyayev V. S., Malinnikova O. N., Trofimov V. A. *Metanoobil'nye shakhty: dobycha uglja, gazovydelenie, metanovaya opasnost'* [Methane-rich collieries: coal mining, gas emission, methane hazard], Kaluga, ООО «Манускрипт», 2020, 334 p.

4. Thakur P. *Advanced reservoir and production engineering for coal bed methane*. Houston, Gulf Professional Publishing, 2016, 404 p. DOI: 10.1016/B978-0-12-803095-0.00013-2.

5. Mosleh M. H., Sedighi M., Babaei M., Turner M. Geological sequestration of carbon dioxide. *Managing Global Warming*, Letcher T. M. (Ed.). Academic Press, 2019, pp. 487 – 500. DOI: 10.1016/b978-0-12-814104-5.00016-8.
6. Nazarov L. A., Nazarova L. A. Some geomechanical aspects of gas recovery from coal seams. *Journal of Mining Science*. 1999, vol. 35, no. 2, pp. 135 – 145. DOI: 10.1007/BF02565367.
7. Zakharov V. N., Trofimov V. A., Filippov Yu. A., Shlyapin A. V. About degassing of the coal-rocks massif in the roof of the coal seam being worked out. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 11, pp. 20 – 36. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_11_0_20.
8. Robinson P. R., Hsu C. S. Introduction to petroleum technology. *Springer Handbook of Petroleum Technology*. Cham, Springer. 2017, pp. 1 – 83. DOI: 10.1007/978-3-319-49347-3_1.
9. Averin A. P., Belousov F. S., Pashichev B. N., Trofimov V. A. Gas flow patterns in rock samples. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 10, pp. 100 – 111. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_10_0_100.
10. Seidle J. *Foundations of coalbed methane reservoir engineering*. PennWell Books, 2011, 416 p.
11. Tailakov O. V., Makeev M. P., Utkaev E. A. Numerical modeling and laboratory testing of reservoir properties of coal. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 9, pp. 99 – 108. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_9_0_99.
12. Nazarova L. A., Nazarov L. A., Polevshchikov G. Ya., Rodin R. I. Inverse problem solution for estimating gas content and gas diffusion coefficient of coal. *Fiziko-tehnicheskkiye problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2012, no. 5, pp. 15 – 23. [In Russ]. DOI: 10.1134/S1062739148050024.
13. Pan Z., Connell L. D. Modelling permeability for coal reservoirs. A review of analytical models and testing data. *International Journal of Coal Geology*. 2012, vol. 92, pp. 1 – 44. DOI: 10.1016/j.coal.2011.12.009.
14. Thomas L. J., Thomas L. P. *Coal geology*. John Wiley & Sons, 2002, 384 p.
15. Dorofeeva T. V., Krasnov S. G., Lebedev B. A., Petrova G. V., Pozinenko B. V. *Kollektory neftey Bazhenovskoy svity Zapadnoy Sibiri* [Oil reservoirs of the Bazhenov suite of Western Siberia], Leningrad, Nedra, 1983, 131 p.
16. Rutqvist J., Liu H.-H. A new coal-permeability model: internal swelling stress and fracture – matrix interaction. *Transport in Porous Media*. 2010, vol. 82, pp. 157 – 171. DOI: 10.1007/s11242-009-9442-x.
17. van Golf-Racht T. *Fundamentals of fractured reservoir engineering*. Elsevier, 1982, 732 p.
18. Lv R., Xue J., Zhang Z., Ma X., Li B., Zhu Y., Li Y. Experimental study on permeability and stress sensitivity of different lithological surrounding rock combinations. *Frontiers in Earth Science*. 2022, vol. 9 – 2021. DOI: 10.3389/feart.2021.762106.
19. Feng Y., Tang Ho., Tang Ha. Leng Y., Shi X., Liu J., Wang Z. Influence of geomechanics parameters on stress sensitivity in fractured reservoir. *Frontiers in Earth Science*. 2023, vol. 11. DOI: 10.3389/feart.2023.1134260.
20. Zakharov V. N., Malinnikova O. N., Trofimov V. A., Filippov Yu. A. Effect of gas content and actual stresses on coalbed permeability. *Fiziko-tehnicheskkiye problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2016, no. 2, pp. 16 – 25. [In Russ]. DOI: 10.1134/S1062739116020345.
21. Meng Y., Li Z., Lai F. Experimental study on porosity and permeability of anthracite coal under different stresses. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2015, vol. 133, pp. 810 – 817. DOI: 10.1016/j.petrol.2015.04.012.
22. Esaki T., Du S., Mitani Y., Ikusada K., Jing L. Development of a shear-flow test apparatus and determination of coupled properties for a single rock joint. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 1999, vol. 36, no. 5, pp. 641 – 650. DOI: 10.1016/S0148-9062(99)00044-3.
23. Blocher G., Kluge C., Milsch H., Cacace M., Jacquy A., Schmittbuhl J. Permeability of matrix-fracture systems under mechanical loading – constraints from laboratory experiments

and 3-D numerical modelling. *Advances in Geosciences*. 2019, vol. 49, pp. 95–104. DOI: 10.5194/adgeo-49-95-2019.

24. Zilong Zhou, Jing Zhang, Xin Cai, Shanyong Wang, Xueming Du, Haizhi Zang Permeability experiment of fractured rock with rough surfaces under different stress conditions. *Geo fluids*. 2020, vol. 2020, article 9030484. DOI: 10.1155/2020/9030484.

25. Alcolea A., Kuhlmann U., Marschall P., Lisjak A., Grasselli G., Mahabadi O., de la Vaisiere R., Leung H., Shao H. A pragmatic approach to abstract the excavation damaged zone around tunnels of a geological radioactive waste repository: application to the HG-A experiment in Mont Terri. *Radioactive Waste Confinement: Clays in Natural and Engineered Barriers*. Geological Society, London, Special Publications. 2016, vol. 443, pp. 127–147. DOI: 10.1144/SP443.8.

26. Tiab D., Donaldson E. C. *Petrophysics: Theory and practice of measuring reservoir rock and fluid transport properties*. Gulf Professional Publishing, 2011, 950 p.

27. Tan W., Wang P. Experimental study on seepage properties of jointed rock-like samples based on 3D printing techniques. *Advances in Civil Engineering*. 2020, vol. 2020, article 9403968. DOI: 10.1155/2020/9403968.

28. Witherspoon P. A., Wang J. S. Y., Iwai K., Gale J. E. Validity of cubic law for fluid flow in a deformable rock fracture. *Water Resources Research*. 1980, vol. 16, pp. 1016–1024.

29. Barton N. R. Deformation phenomena in jointed rock. *Geotechnique*. 1986, vol. 36, no. 2, pp. 147–167. DOI: 10.1680/geot.1986.36.2.147.

30. Nazarova L. A., Nazarov L. A., Skulkin A. A., Golikov N. A. Stress-permeability dependence in geomaterials from laboratory testing of cylindrical specimens with central hole. *Fiziko-tehnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2019, no. 5, pp. 18–25. [In Russ]. DOI: 10.15372/FTPRPI20190503.

31. Tan R., Chai J., Cao C. Experimental investigation of the permeability measurement of radial flow through a single rough fracture under shearing action. *Advances in Civil Engineering*. 2019, vol. 2019, article 6717295. DOI: 10.1155/2019/6717295.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Назаров Леонид Анатольевич¹ — д-р физ.-мат. наук,
главный научный сотрудник,
e-mail: mining1957@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0002-9857-295X,

Голиков Никита Александрович¹ — канд. техн. наук,
старший научный сотрудник,

e-mail: golikovna@ipgg.sbras.ru,

ORCID ID: 0000-0001-8101-230X,

Скулкин Александр Александрович¹ — младший
научный сотрудник, e-mail: chuppt@yandex.ru,

Назарова Лариса Алексеевна — д-р физ.-мат. наук,
главный научный сотрудник,

e-mail: larisa.a.nazarova@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0002-3712-2939,

Институт горного дела им. Н.А.Чинакала СО РАН,

¹ Новосибирский национальный исследовательский
государственный университет.

Для контактов: Назаров Л.А., e-mail: mining1957@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

L.A. Nazarov¹, Dr. Sci. (Phys. Mathem.),

Chief Researcher, e-mail: mining1957@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0002-9857-295X,

*N.A. Golikov*¹, Cand. Sci. (Eng.),
Senior Researcher,
e-mail: golikovna@ipgg.sbras.ru,
ORCID ID: 0000-0001-8101-230X,
*A.A. Skulkin*¹, Junior Researcher,
e-mail: chuptt@yandex.ru,
L.A. Nazarova, Dr. Sci. (Phys. Mathem.),
Chief Researcher, Chinakal Institute of Mining
of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,
630091, Novosibirsk, Russia,
e-mail: larisa.a.nazarova@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0002-3712-2939,
¹ Novosibirsk State University,
630090, Novosibirsk, Russia.

Corresponding author: L.A. Nazarova, e-mail: mining1957@mail.ru.

Получена редакцией 08.08.2023; получена после рецензии 11.09.2023; принята к печати 10.10.2023.
Received by the editors 08.08.2023; received after the review 11.09.2023; accepted for printing 10.10.2023.



ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ (СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК)

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЯ ГОРНЫМИ КОМПЛЕКСАМИ НА ОСНОВЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА

(2023, № 5, СБ 1, 56 с.)

*Хакулов В. А.*¹, *Шаповалов В. А.*¹, *Игнатов В. Н.*², *Игнатов М. В.*¹, *Ногеров И. А.*¹, *Карпова Ж. В.*¹

¹ Кабардино-Балкарский государственный университет имени Х.М. Бербекова, e-mail: vkh21@yandex.ru,

² Южно-Российский государственный политехнический университет имени М.И. Платова,

Одним из главных направлений повышения рентабельности горного производства становится совершенствование саморазвивающихся систем районирования массивов горных пород по категориям взрываемости. Эффективность этих систем зависит от получения достоверной и своевременной информации функционирования процессов горных работ. На основе использования интеллектуальных систем мониторинга предлагаются апробированные решения по районированию геомеханического состояния массивов горных пород. В процессе мониторинга, через измерение в производственных условиях энергетических параметров бурения и экскавации производится корректировка саморазвивающихся моделей районирования карьерного поля по категориям буримости, взрываемости и управление процессами горных работ.

Ключевые слова: мониторинг процесса экскавации, районирование по взрываемости, динамическое районирование смежных забоев, режим синхронизации смежных забоев и управления, мониторинг процесса шарошечного бурения, энергоёмкость бурения, искусственная трещиноватость массивов.

IMPROVING THE MANAGEMENT OF MINING COMPLEXES BASED ON INTELLIGENT MONITORING SYSTEMS

*V.A. Khakulov*¹, *V.A. Shapovalov*¹, *V.N. Ignatov*², *M.V. Ignatov*¹, *I.A. Nogerov*¹, *Zh.V. Karpova*¹

¹ Kh. M. Berbekov Kabardino-Balkarian State University, 360004, Nalchik, Russia,

² M. I. Platov South-Russian State Polytechnic University, 346428, Novocherkassk, Russia.

One of the main directions of increasing the profitability of mining production is the improvement of self-developing systems for zoning rock massifs by explosion categories. The effectiveness of these systems depends on obtaining reliable and timely information about the functioning of mining processes. Based on the use of intelligent monitoring systems, proven solutions for zoning the geomechanical state of rock massifs are proposed. In the process of monitoring, through measurement in production conditions of the energy parameters of drilling and excavation, self-developing models of zoning of the quarry field are adjusted according to the categories of drillability, explosivity and management of mining processes.

Key words: monitoring of the excavation process, zoning by explosiveness, dynamic zoning of adjacent faces, synchronization mode of adjacent faces and control, monitoring of the process of ball drilling, drilling energy intensity, artificial fracturing of massifs.