



II РУДНИЧНАЯ АЭРОГАЗОДИНАМИКА

DOI: 10.25558/VOSTNII.2021.76.95.003

УДК 622.831

© В.С. Зыков, В.В. Иванов, Э.К. Пуль, А.А. Вьюников, 2021

В.С. ЗЫКОВ

д-р техн. наук, проф.,
зам. генерального директора по научной работе
АО «НЦ ВостНИИ», г. Кемерово
e-mail: v.zykov@nc-vostnii.ru



В.В. ИВАНОВ

д-р техн. наук, проф.,
ведущий научный сотрудник
АО «НЦ ВостНИИ», г. Кемерово
e-mail: v.ivanov@nc-vostnii.ru



Э.К. ПУЛЬ

главный геотехник
АК «АЛРОСА» (ПАО)



А.А. ВЬЮНИКОВ

главный геотехник
Мирнинского МГОК
АК «АЛРОСА» (ПАО)



ОЦЕНКА ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ И ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВМЕЩАЮЩИХ ПОРОД РУДНИКА «ИНТЕРНАЦИОНАЛЬНЫЙ» КОМПАНИИ «АЛРОСА»

В связи с происходящими на руднике «Интернациональный» компании «АЛРОСА» выбросами породы и газа, инициированными буровзрывными работами, возникла необходимость определения газодинамических и фильтрационных характеристик выбросоопасных доломитов данного месторождения. Результаты исследований газоносности и фильтрационных характеристик вмещающих пород позволяют локализовать и уточнить положение газовых скоплений по геологическому разрезу и обосновывать параметры способов предотвращения газодинамических явлений при проходке горных выработок. В настоящей статье приводится решение задачи о квазистационарной изотермической фильтрации метана к измерительной скважине, даются расчетные формулы для дебита метана из скважины и определения коэффициента

проницаемости пород по данным газодинамических измерений. Приводится результат расчета размеров зоны разрушения вокруг цилиндрической скважины и даются расчетные формулы для определения максимальных касательных напряжений в зоне разрушения. Эти результаты позволили на основе измерений газовыделения из скважин, пробуренных в спиральном сьезде, определить газоносность породы по свободным газам, коэффициенты проницаемости пород в местах измерений, оценить максимальные разрушающие касательные напряжения в местах измерения. Полученные результаты измерений хорошо согласуются с данными исследований научных сотрудников Пермского филиала научного центра Уральского отделения Российской академии наук, проведенных ранее. Предлагаемые расчетные формулы в дальнейшем могут использоваться для уточнения положения выбросоопасных зон во вмещающих породах рудника.

Ключевые слова: ГАЗОНОСНОСТЬ, ФИЛЬТРАЦИЯ МЕТАНА, КОЭФФИЦИЕНТ ПРОНИЦАЕМОСТИ, ЗОНА РАЗРУШЕНИЯ, КОНТРОЛЬНАЯ СКВАЖИНА, МАКСИМАЛЬНЫЕ КАСАТЕЛЬНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время на руднике «Интернациональный» АК «АЛРОСА» при ведении горных выработок во вмещающих породах происходят газодинамические явления в виде инициированных буровзрывными работами выбросов породы и газа, которые в силу большой интенсивности представляют серьезную угрозу для жизни работающих под землей горняков, нарушают технологию ведения горных работ и параметры проводимых на рудниках выработок. На ликвидацию последствий выбросов породы и газа на стадии подготовки подготовительных выработок требуются существенные материальные затраты.

Цель настоящей работы — дать оценку газодинамических и фильтрационных характеристик вмещающих пород в производственных условиях.

Количественные данные о газоносности вмещающих пород по свободным газам и газодинамических характеристиках могут быть использованы при разработке и корректировке методики прогнозирования зон, опасных по выбросам породы и газа, а также способов борьбы с выбросами.

Результаты исследований газоносности вмещающих пород позволяют локализовать и уточнить положение газовых скоплений по геологическому разрезу и обосновывать параметры способов предотвращения газодинамических явлений породы и газа при проходке горных выработок.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О КВАЗИСТАЦИОНАРНОЙ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ФИЛЬТРАЦИИ МЕТАНА К СКВАЖИНЕ

Рассмотрим задачу об изотермическом квазистационарном режиме фильтрации метана к скважине цилиндрической формы. В рассматриваемом случае уравнение Лейбензона [1], описывающее данный вид фильтрации, имеет вид $\Delta(p^2) = 0$, где Δ — оператор Лапласа; а p — давление газа.

Уравнение Лейбензона в цилиндрической системе координат записывается в виде

$$\frac{1}{r} \frac{\partial p^2(r, \varphi, z)}{\partial r} + \frac{\partial^2 p^2(r, \varphi, z)}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 p^2(r, \varphi, z)}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 p^2(r, \varphi, z)}{\partial z^2} = 0, \quad (1)$$

где r, φ, z — цилиндрические координаты.

Учитывая, что давление зависит только от полярного радиуса (в силу симметрии), уравнение (1) можно привести к виду

$$\frac{1}{r} \frac{dp^2(r)}{dr} + \frac{d^2 p^2(r)}{dr^2} = 0. \quad (2)$$

В результате интегрирования уравнения (2) получаем формулу $p^2 = c_1 \ln r + c_2$, где константы интегрирования должны быть найдены из граничных условий:

$$p_{r=a} = p_{скв}, p_{r=b} = p_0, \quad (3)$$

где первое условие означает, что давление на границе, равной радиусу скважины, равно измеренному начальному давлению в загерметизированной части скважины, а давление на границе зоны разрушения (в массиве) вокруг скважины равно давлению, определяемому по формуле Лейбенсона:

$$p_0 = p_{скв} / \left(\frac{2}{v+1}\right)^{\frac{v}{v-1}}, \quad (4)$$

где v — показатель адиабаты смеси газов, выделяющихся при газодинамическом явлении ($v = 1,4$).

Нахождение констант из граничных условий приводит к следующему результату:

$$p^2 = \frac{p_{скв}^2 - (p_0)^2}{\ln(a/b)} \ln\left(\frac{r}{a}\right) + p_{скв}^2. \quad (5)$$

Зная давление, дебит метана в скважину в m^3/c , можно подсчитать по формуле

$$Q = \frac{kL}{2RT\rho\mu} \int \frac{\partial p^2}{\partial r} ds, \quad (6)$$

где интеграл берется по замкнутому контуру окружности радиуса a ; k — коэффициент проницаемости массива, m^2 ; L — длина скважины, m ; R — удельная газовая постоянная

метана, Дж/кг град; T — абсолютная температура массива, K° ; ρ — плотность метана, $кг/м^3$; μ — динамическая вязкость метана, Па·с.

Беря интеграл с учетом формулы (5), получим окончательную формулу для дебита метана в скважину:

$$Q = \frac{\pi kL}{RT\rho\mu} \frac{[p_{скв}^2 - (p_0)^2]}{\ln(a/b)}. \quad (7)$$

Формула (7) позволяет при известных размерах зоны разрушения вокруг скважины, начальной скорости газовыделения и давлении метана в скважине найти коэффициент проницаемости массива в месте измерения. Использование формулы (7) для квазистационарного режима фильтрации возможно вследствие медленного газовыделения из скважин (см. далее рис. 1 и табл. 1, в которой приведены скорости истечения газа в скважину через 2 и 5 минут после начала измерений). Кроме того, использование формулы (10), вытекающей из (7), дает для коэффициента проницаемости массива результаты, близкие к тем, которые получены сотрудниками Пермского научного центра УРО РАН с помощью классических методов измерений на образцах пород с помощью пермеаметра (см. далее).

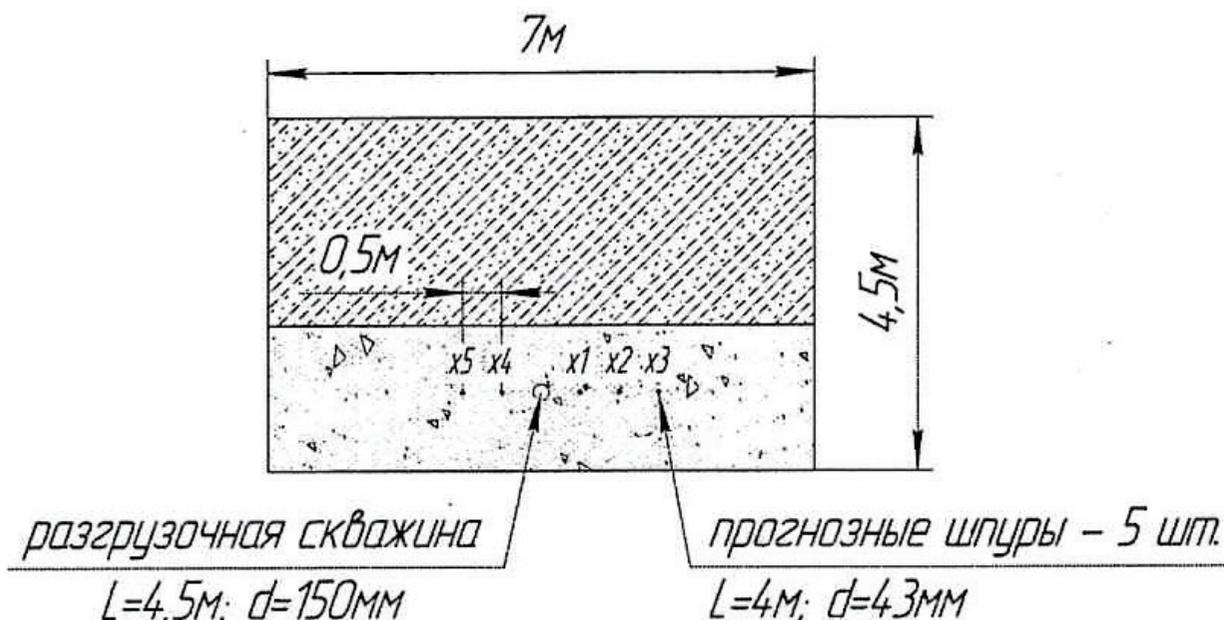


Рис. 1. Схема бурения разгрузочной скважины и прогнозных шпуров в забое спирального съезда

Таблица 1

Данные измерений в контрольных шпурах

Наименования шпуров	x1		x2		x3		x4		x5		Интервалы шпуров, м
	2	5	2	5	2	5	2	5	2	5	
Время от окончания бурения, мин											
Измеренные параметры											
g , л/мин	0,3	0,2	1,5	0,6	1,9	0,4	0,2	0	0,6	0	0,5–1,5
$P_{шп}$, кПа	2,0		7,0		8,4		0	0	6,9	0	
C_m , %	65,8		99,0		100,0		64,4		63,0		
g , л/мин	1,3	0,5	5,2	1,6	7,8	2,6	0,6	—	0,7	—	1,5–2,5
$P_{шп}$, кПа	8,4		5,4	30,0	75,0	37,0	9,2	—	8,8	—	
C_m , %	100		100		100		92		100		
g , л/мин	0,6	0,4	0,7	0,4	1,3	0,6	—	—	—	—	2,5–3,5
$P_{шп}$, кПа	6,6	4,7	2,0	1,0	3,0		—	—	—	—	
C_m , %	100		100		100		—	—	—	—	
g , л/мин	0,5	0,3	0,2	—	—	—	—	—	—	—	3,5–4,5
$P_{шп}$, кПа	1,1	0,6	0,1	0	1,3	0,4	—	—	—	—	
C_m , %	68		100		100		—	—	—	—	

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О РАЗМЕРАХ ЗОНЫ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ (РАЗРУШЕНИЯ) ВОКРУГ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ СКВАЖИНЫ

Решение известной задачи о размерах зоны пластической деформации (зоны разрушения) вокруг горизонтальной скважины цилиндрической формы рассмотрена в работе [2]. Для простоты вычислений предполагалось, что скважина находится в условиях всестороннего равномерного сжатия, причем напряжение на глубине H равно ρgH , где ρ — плотность пород, g — ускорение свободного падения. Радиус границы зоны разрушения в соответствии с [2] находится следующим образом:

$$b = a \exp(\rho gH / 2\tau_{\max}), \quad (8)$$

где b — радиус границы зоны разрушенных пород; a — радиус скважины; τ_{\max} — максимальное касательное (разрушающее) напряжение в массиве.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА, ОБРАБОТКА И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Определение газоносности доломитов и фильтрационных параметров пород состояло из подготовки к шахтным измерениям и, собственно, из самих измерений. Традиционные методы определения свойств пород изложены в публикациях [3–14], однако эти измерения и расчеты можно существенно упростить, используя теоретические результаты, приведенные в данной работе.

Подготовка к измерениям осуществлялась разметкой забоя спирального съезда и бурением разгрузочной скважины диаметром 150 мм и длиной 5 м (рис. 1). Исследование газоносности и состава газов осуществлялось посредством поинтервального бурения шпуров диаметром 43 мм и длиной 5 м, расположенных через 0,5 м от центральной скважины (до 5 шпуров) с последующей герметизацией каждого шпура при помощи пневматического герметизатора и измерений с каждого метра шпура (рис. 1). Газ, выделяющийся со стенок

и забоя загерметизированной части шпура, поступает в газоотводящий штуцер, к которому подключается прецизионный портативный цифровой манометр, предназначенный для работы в шахтных условиях (рис. 2). С помощью манометра определяется скорость газовыделения в скважину g через 2 минуты и 5 минут после герметизации, давление, а с помощью специальной аппаратуры определяется компонентный состав газа (аппаратура позволяет зарегистрировать концентрацию метана C_m и водорода, см. пример замеров на рис. 1).

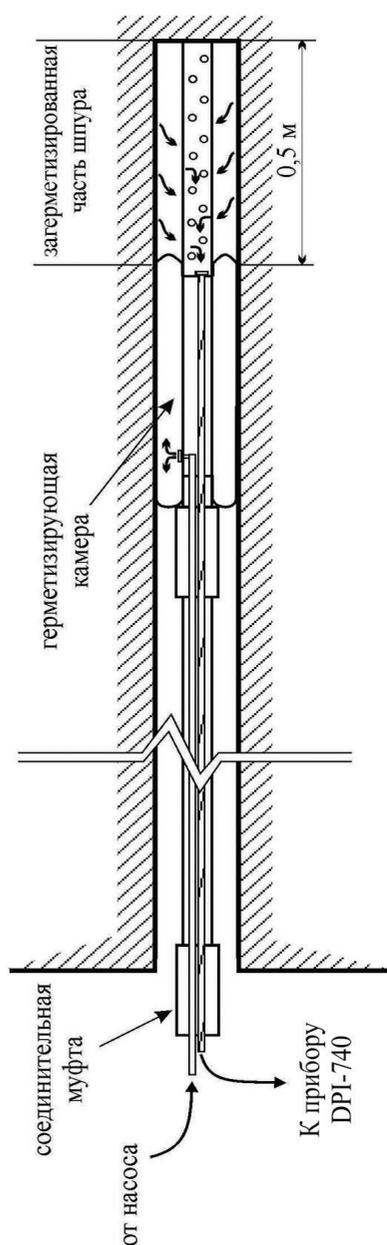


Рис. 2. Схема измерения g и $P_{штн}$ с помощью пневматического герметизатора

По результатам измерений давления и газовыделения в пяти скважинах определялся размер зоны разгрузки вокруг центральной скважины (радиус зоны разрушенных пород). В примере, приведенном в табл. 1, он равен 0,575 м. Газоносность пород в месте измерения по свободным газам находится по формуле:

$$g = \frac{(g_1 - g_2)(t_2 - t_1) \cdot 0,001}{\pi(b^2 + 2ab) \cdot L \cdot \ln\left(\frac{g_1}{g_2}\right)} \quad (9)$$

где g — газоносность пород, $\text{м}^3/\text{м}^3$; g_1, g_2 — скорость газовыделения из загерметизированной части скважины (л/мин) в моменты времени t_1 и t_2 (время берется в минутах); a — радиус шпура; b — радиус зоны разгрузки вокруг шпура, м; L — длина загерметизированной части шпура, м. По результатам измерений (рис. 1, табл. 1) и по формуле (17) оценка газоносности пород в месте измерения по максимальным скоростям газовыделения дает $0,81 \text{ м}^3/\text{м}^3$, что достаточно хорошо согласуется с результатами исследований Пермского научного центра УРО РАН.

По результатам измерений, приведенных в табл. 1, рис. 1, можно дать количественную оценку максимальных касательных напряжений в зоне разгрузки по формуле, вытекающей из (10):

$$\tau_{\max} = \frac{\rho g H}{2 \ln\left(\frac{b}{a}\right)}, \text{ Па} \quad (10)$$

где ρ — плотность пород, $\text{кг}/\text{м}^3$; g — ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$; H — глубина ведения горных работ, м. Остальные обозначения те же, что и в формуле (15) (заметим, что здесь b — радиус границы зоны разгрузки вокруг центральной скважины, который в нашем случае равен 0,575 м; a — ее радиус). В результате расчета по формуле (10) для глубины 1220 м, на которой располагался спиральный съезд во время производства измерений, получаем.

Результаты измерения (табл. 1, рис. 1) позволяют определить коэффициент проницаемости массива горных пород в местах изме-

рения. Расчет коэффициента проницаемости осуществляется по формуле, вытекающей из (7):

$$k = \frac{RT\mu\rho Q \ln\left(\frac{b}{a}\right) \cdot 0,98 \cdot 10^{12}}{60000\pi L(P_m - P_{\text{шп}})}, \text{ Дарси}, \quad (11)$$

где $R = 519$ Дж/кг·град — газовая постоянная метана; T — абсолютная температура смеси в шпуре в градусах Кельвина; $\mu = 11,2 \cdot 10^{-6}$, Па·с — вязкость метана; $\rho = 0,7168$, кг/м³ — плотность метана; Q — скорость газовыделения в шпур по данным измерений, л/мин; L — длина загерметизированной части шпура, м; $P_{\text{шп}}$ — измеренное давление свободного газа в шпуре, Па; a и b — радиус шпура и радиус зоны разрушенных пород вокруг шпура, определяемый по результатам измерений по формуле (15), м; P_m — давление газа в массиве на границе зоны разрушенных пород, определяемое по формуле Лейбензона:

СПИСОК ЛИТЕРАТУРА

1. Лейбензон Л.С. Движение природных жидкостей и газов в пористой среде. М., 1947. 244 с.
2. Иванов В.В., Семенцов В.В., Ли К.Х. Определение удельного давления на крепь с учетом зоны разрушения пород вокруг подготовительной выработки // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2019. № 1. С. 18–21.
3. Ильницкая Е.И. Свойства горных пород и методы их определения. М., 1969. 392 с.
4. Ржевский В.В. Основы физики горных пород. М., 1978. 390 с.
5. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика). Справочник геофизика. М., 1976. 527 с.
6. Тиаб Дж., Доналдсон Эрл. Ч. Петрофизика: теория и практика изучения коллекторских свойств горных пород и движения пластовых флюидов. М., 2011. 868 с.
7. Потураев В.Н. Прогноз и предотвращение выбросов пород и газа. Киев, 1986. 160 с.
8. Николин В.И. Выбросы породы и газа. М., 1967. 80 с.
9. Зыков В.С. Техногенная геодинамика. Учебное пособие. Кемерово: КузГТУ, 2006. 266 с.
10. Operating instructions for planetary ball mills type PM100/PM200. Retsch GmbH & Co. KG, Haan, Germany, Doc.Nr. D98.540/640.9999. 2004. 32 p.
11. Baryakh A., Lobanov S. On one approach to the numerical modeling of the strain – stress state of layered rock mass // Frattura ed Integrita Strutturale. 2019. T. 13. No. 49. P. 257–266.
12. Baryakh A.A., Asanov V.A. Methods and approaches to geomechanical ensuring of mining safety at potash mines // Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses. Set of 2 volumes. 2018. P. 121–130.
13. Baryakh A., Lobanov S., Lomakin I., Tsayukov A. Mathematical modeling of limit states for load bearing elements in room-and-pillar mining of saliferous rocks // Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses. Set of 2 volumes. 2018. P. 767–774.
14. Baryakh A., Lobanov S. Geomechanical analysis of the stability of salt stopes in the layered salt mass // 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConferences SGEM 2018. Conference proceedings. 2018. P. 435–442.

$$P_m = P_{\text{шп}} / \left(\frac{2}{1+\nu}\right)^{\nu-1}, \text{ Па} \quad (12)$$

где $\nu = 1,4$ — показатель адиабаты свободных газов в шпуре.

Результат расчета по формуле (19) дает $k = 0,43$ миллиДарси.

Полученный результат хорошо согласуется с данными измерений сотрудников Пермского научного центра УРО РАН (0,05–1,25, миллиарды для разных доломитов).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные результаты показывают, что методика эксперимента и обработка измерений по приводимым в работе формулам позволяют существенно упростить определение выбросоопасных зон при разработке алмазного месторождения рудника «Интернациональный» компании «АПРОСА».

DOI: 10.25558/VOSTNII.2021.76.95.003

UDC 622.831

© V.S. Zykov, V.V. Ivanov, E.K. Pul, A.A. Vyunikov, 2021

V.S. ZYKOV

Doctor of Engineering Sciences, Professor,
Deputy General Director for Science
JSC «NC VostNII», Kemerovo
e-mail: v.zykov@nc-vostnii.ru

V.V. IVANOV

Doctor of Engineering Sciences, Professor,
Leading Researcher
JSC «NC VostNII», Kemerovo
e-mail: v.ivanov@nc-vostnii.ru

E.K. PUL

Chief Geotechnical Officer
PJSC «ALROSA»

A.A. VYUNIKOV

Chief Geotechnical Officer of the Mirny Mining and Processing Plant
PJSC «ALROSA»

EVALUATION OF GAS DYNAMIC AND FILTERING CHARACTERISTICS OF THE INTERNET ROCKS OF THE INTERNATSIONALNY MINER OF ALROSA COMPANY

In connection with the rock and gas emissions initiated by drilling and blasting operations at the International mine of ALROSA, it became necessary to determine the gas dynamic and filtration characteristics of the ejection-hazardous Dolomites of this field. The results of studies of the gas content and filtration characteristics of the host rocks allow us to localize and clarify the position of gas accumulations along the geological section and justify the parameters of methods for preventing gas-dynamic phenomena during mining. This article provides a solution to the problem of L.S. Leibenzon on the quasi-stationary isothermal filtration of methane to the measuring well, the calculation formulas for the methane flow rate from the well and the determination of the permeability coefficient of rocks from gas-dynamic measurements are given. The elastic – plastic problem of the size of the fracture zone around a cylindrical well is considered and calculation formulas for determining the maximum shear stresses in the fracture zone are given. These results made it possible, on the basis of measurements of gas flow from wells drilled in the spiral exit, to determine the gas content of the rock by free gases, the permeability coefficients of rocks at the measurement sites, and to estimate the maximum destructive shear stresses at the measurement sites. The obtained measurement results are in good agreement with the data of research conducted earlier by researchers of the Perm center branch of the Ural branch of the Russian Academy of Sciences. The proposed calculation formulas can be used in the future to clarify the position of hazardous areas in the host rocks of the mine.

Keywords: GAS CONTENT, METHANE FILTRATION, PERMEABILITY COEFFICIENT, FRACTURE ZONE, WELL, MAXIMUM SHEAR STRESSES.

REFERENCES

1. Leibenzon L.S. The movement of natural liquids and gases in a porous medium. M., 1947. 244 p. [In Russ.].

2. Ivanov V.V., Sementsov V.V., Lee K.Kh. Determination of the specific pressure on the support taking into account the zone of destruction of rocks around the development working // Bulletin of the scientific center for the safety of work in the coal industry [Vestnik nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugolnoy promyshlennosti]. 2019. No. 1. P. 18–21. [In Russ.].
3. Initskaya E.I. Properties of rocks and methods for their determination. M., 1969. 392 p. [In Russ.].
4. Rzhovsky V.V. Fundamentals of rock physics. M., 1978. 390 p. [In Russ.]
5. Physical properties of rocks and minerals (petrophysics). Geophysics Handbook. M., 1976. 527 p. [In Russ.].
6. Tiab J., Donaldson Earl. Ch. Petrophysics: Theory and Practice of Studying the Reservoir Properties of Rocks and the Movement of Formation Fluids. M., 2011. 868 p. [In Russ.].
7. Poturaev V.N. Forecast and prevention of rock and gas emissions. Kiev, 1986. 160 p. [In Russ.].
8. Nikolin V.I. Rock and gas emissions. M., 1967. 80 p. [In Russ.].
9. Zykov V.S. Technogenic geodynamics. Tutorial. Kemerovo: KuzSTU, 2006. 266 p. [In Russ.].
10. Operating instructions for planetary ball mills type PM100/PM200. Retsch GmbH & Co. KG, Haan, Germany, Doc.Nr. D98.540/640.9999. 2004. 32 p.
11. Baryakh A., Lobanov S. On one approach to the numerical modeling of the strain – stress state of layered rock mass // Frattura ed Integrita Strutturale. 2019. T. 13. No. 49. P. 257–266.
12. Baryakh A.A., Asanov V.A. Methods and approaches to geomechanical ensuring of mining safety at potash mines // Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses. Set of 2 volumes. 2018. P. 121–130.
13. Baryakh A., Lobanov S., Lomakin I., Tsayukov A. Mathematical modeling of limit states for load bearing elements in room-and-pillar mining of saliferous rocks // Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses. Set of 2 volumes. 2018. P. 767–774.
14. Baryakh A., Lobanov S. Geomechanical analysis of the stability of salt stopes in the layered salt mass // 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConferences SGEM 2018. Conference proceedings. 2018. P. 435–442.