

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамов Ф.А., Бойко В.А. и др. Методика определения режима движения воздуха в выработанном пространстве “Совершенствование проветривания шахт”. “Недра”, 1964.
2. Клебанов Ф.С. О движении воздуха по горным выработкам при наличии выработанных пространств. Доклады АН СССР, т.113, №4, 1957.
3. Устинов А.М., Калиев С.Г. Закономерность распределения утечек воздуха в выработанном пространстве при возвратноточной через целик схеме проветривания. “Аэрогазодинамика и проветривание угольных шахт”, труды ВостНИИ, том XIX, 1973.
4. Касимов О.И., Погребная А.Я. Утечки воздуха через выработанное пространство при столбовой системе разработки. “Борьба с газом, пылью и выбросами в угольных шахтах”, вып.10, Макеевка, изд.МакНИИ, 1974.
5. Верзилов М.И. Исследование местных скоплений метана при столбовых системах разработки угольных лав Донбасса и способов их ликвидации. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Макеевка, МакНИИ, 1982.
6. Руководство по проектированию вентиляции угольных шахт. Киев, “Основа”, 1994.
7. Руководство по дегазации угольных шахт. “Недра”, 1975.

УДК 622.02:531

В.С. Кулинич, В.Г. Перепелица, С.А. Курносов
С.Я. Иванчишин, А.М. Шумейко, С.В. Кулинич

ГАЗОВАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ ГОРНЫХ ПОРОД В РАЗНОКОМПОНЕНТНОМ ПОЛЕ СЖИМАЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЙ

Викладені результати досліджень газової проникливості гірських порід при різнокомпонентному полі стислюючих напружень

THE GAS PERMEABILITY OF ROCKS IN DIFFERENT COMPONENT FIELD OF CONTRACTING STRESSES

The results of investigation of the gas permeability of rocks in different component field contracting stresses are described.

Одним из важных показателей, интегрально характеризующих фильтрационные свойства газовых коллекторов при различном геомеханическом состоянии трещинно-поровой среды, является газовая проницаемость, определяющая свойство горных пород пропускать газы и их смеси при наличии градиента давления. Количественно проницаемость оценивают коэффициентом проницаемости K_{np} , устанавливающим характер пропорциональности скорости фильтрации флюида V градиенту давления (dP/dL), вызывающего фильтрацию (уравнение Дарси) [1-3]:

$$V = K_{np} \frac{dP/dL}{\mu}, \quad (1)$$

где μ - вязкость флюида, сПз.

Практической единицей измерения проницаемости является Дарси (Д). Проницаемость горных пород измеряется меньшей единицей - миллидарси (мД), составляющей 10^{-3} Д, или в системе СИ фм^2 (фемто м^2).

В статье приведены результаты экспериментальных исследований газопроницаемости газоносных песчаников глубоких шахт Донбасса, выполненных с

целью оценки влияния объемного (в том числе разнокомпонентного) напряженно-деформированного состояния газовых коллекторов на параметры их газоотдачи.

Изучение газопроницаемости горных пород в лабораторных условиях, моделирующих натурные, выполняли стандартными и специально созданными экспериментальными методами [1-4].

В частности, на цилиндрических образцах, изготовленных из kernового материала породных скважин угольных шахт, определяли коэффициенты газопроницаемости газоносных песчаников, используя установку УИПК-1м [1-3]. Пределы гидробожима в кернодержателе изменяли от 1 до 60 МПа, а давление газа на входе (азот, метан, углекислый газ) от 0,5 до 1 МПа.

Для расчета коэффициентов газопроницаемости испытуемых образцов использовали известное уравнение Дарси для одномерной ламинарной фильтрации флюидов [2-5].

$$K_{np} = \frac{2\mu Q l P_0}{S(P_{вх}^2 - P_{вых}^2)}, \text{ м}^2 \quad (2)$$

где μ - динамическая вязкость газа, сПз; Q - количество газа, проходящего через образец, м³/с; P_0 - барометрическое давление, МПа; l - длина образца, м; S - площадь поперечного сечения образца, м²; $P_{вх}$ и $P_{вых}$ - давление газа на входе и выходе из образца, МПа.

В табл. 1 и на рис. 1а приведены некоторые осредненные результаты определения коэффициентов проницаемости газоносных песчаников, шахт Донецко-Макеевского и Центрального районов Донбасса.

Таблица 1 - Проницаемость по метану образцов песчаника цилиндрической формы при равнокомпонентном напряженном состоянии

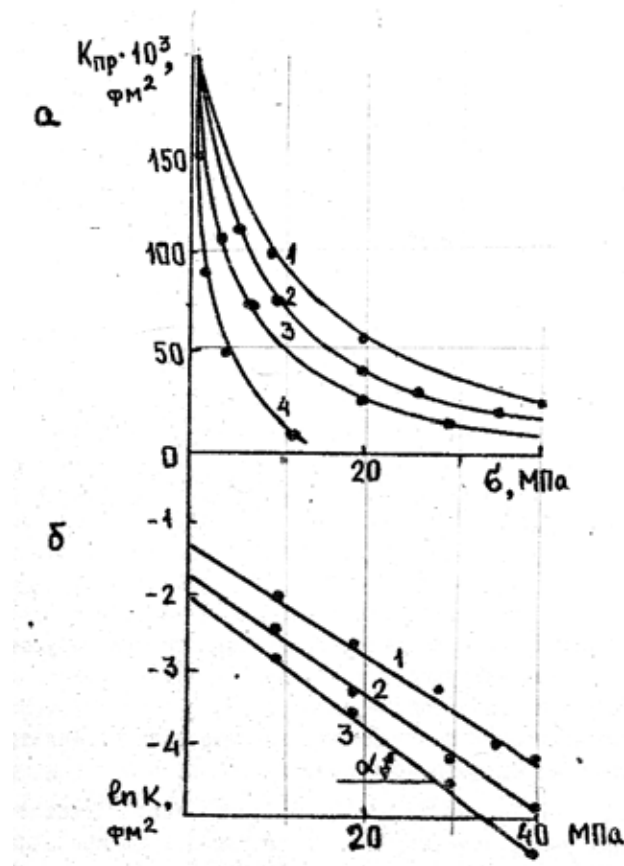
№ обр.	Без внешней нагрузки $K_0 \cdot 10^3, \text{ фм}^2$	$K_{np} \cdot 10^3, \text{ фм}^2$, при $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z$, МПа					С
		1	10	20	40	60	
1	200	183	100	64	25	14	0,62
2	180	160	75	40	20	8	0,70
3	165	140	50	25	11	0	0,75
4	250	175	12	0	0	0	0,84

Как видно из приведенных данных, газопроницаемость породных образцов различна и в функции равнокомпонентного напряженного состояния среды закономерно изменяется по экспоненциальной зависимости, достигая при гидробожме 60 МПа величины $(0 - 14) \cdot 10^{-3} \text{ фм}^2$.

Математической обработкой экспериментальных данных определено, что изменение коэффициентов газовой проницаемости при увеличении равнокомпонентной сжимающей нагрузки удовлетворительно описывается зависимостью вида

$$K_{np} = K_0 \cdot e^{-c\sigma}, \quad (3)$$

где K_0 - величина коэффициента проницаемости при отсутствии внешней нагрузки; σ - давление гидрообжима, МПа; c - эмпирический коэффициент, характеризующий фильтрационные свойства образца.



1-4 – номера образцов.

Рис. 1а – изменение проницаемости песчаников при равнокомпонентной внешней нагрузке; б – определение эмпирических коэффициентов (c) с логарифмической системе координат.

В табл. 1 приведены численные значения коэффициентов проницаемости при различном давлении гидрообжима и эмпирические коэффициенты C , определенные методами математической статистики. Для наглядности на рис. 1б представлены экспоненциальные зависимости, линеаризованные в логарифмической системе координат

$$\ln K = \ln K_0 - C\sigma, \quad (4)$$

откуда видно, что каждый эмпирический коэффициент численно равен тангенсу угла наклона соответствующей линеаризирующей прямой к оси абсцисс.

Из анализа приведенных экспериментальных данных следует, что с увеличением гидростатической внешней нагрузки численные значения коэффици-

ентов проницаемости снижаются на несколько порядков, а при определенном напряженном состоянии породные образцы становятся по газу практически непроницаемыми. Физически это обуславливается уплотнением среды в условиях всестороннего сжатия и уменьшением сечений магистральных трещинно-поровых каналов.

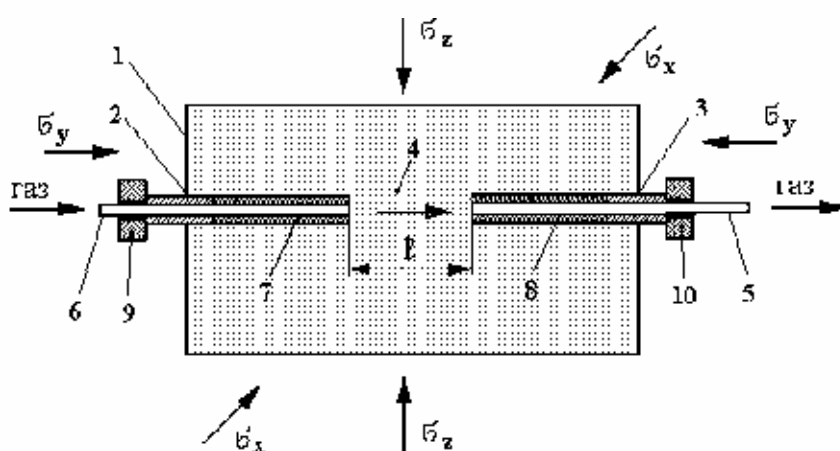
Анализ существующих лабораторных способов оценки газовой проницаемости горных пород, в том числе с использованием установки УИПК-1м, показывает, что они обладают существенными недостатками. К ним следует отнести трудоемкость изготовления и механической обработки контактных поверхностей испытываемых цилиндрических породных образцов сравнительно малых диаметров (до 3-х см), ограниченность диапазона изменения величины и распределения внешней нагрузки при определении численных значений коэффициентов проницаемости испытываемых горных пород [3]. В частности, отсутствует экспериментальная возможность количественной оценки изменения газовой проницаемости трещинно-пористых сред при разнокомпонентном поле главных сжимающих напряжений, что характерно для условий геомеханического состояния углепородных массивов глубоких горизонтов шахт Донбасса [4].

С целью устранения указанных недостатков и упрощения технологии выполнения лабораторных исследований в широком диапазоне изменения напряженного состояния коллекторов, в условиях моделирующих натурные, авторами разработаны способ и методика определения газовой проницаемости крупногабаритных образцов горных пород [4]. В отличие от известных способов породные образцы 1 (см. рис. 2) изготавливают в виде прямоугольных параллелепипедов, в которых по одной из осей бурят соосно входную (2) и выходную (3) скважины с оставлением между их торцевыми поверхностями породного целика (4) заданной длины l . Скважины герметизируют соосно расположенными на толстостенных трубках (5, 6) резиновыми манжетами (7, 8), сжимаемыми в осевом направлении прижимными гайками (9, 10). Подключив входную и выходную трубки соответственно к газовому баллону и расходомеру, определяют количество газа (Q , м³), прошедшее при заданном входном давлении (P_{ex} , МПа) через породный целик за период времени (t , с).

Для снижения возможных утечек газа через боковые грани образцов осуществляют покрытие их внешних поверхностей изоляционными составами (эпоксидный клей, полимеры и др.). После определения дебита фильтрующегося газа и расчета по зависимости [2] исходной газовой проницаемости образца (K_0) при отсутствии внешней нагрузки выполняют серию подобных испытаний при заданном (в том числе разнокомпонентном) напряженном состоянии.

В лабораторных условиях выполнены исследования фильтрационных свойств образцов газоносных песчаников параллелепипедных форм размером 15x10x10 (см). С боковых граней образцов (см. рис. 2) в направлении продольной оси бурили соосно встречные скважины диаметром 1,1 см, длиной, обеспечивающей заданную длину породных целиков ($l = 2 \div 5$ см). Для обеспечения корректности сопоставительного анализа результатов испытаний разработанным и стандартным (на установке УИПК-1м) способами осуществляли одно-

временное изготовление образцов параллелепипедной и цилиндрической ($d = 3$ см, $l = 2 \div 5$ см) форм из кусков породы одной литологической разности. Герметизация входной и выходной скважин и основные технологические операции по определению проницаемости параллелепипедных образцов выполняли в приведенной выше последовательности. Испытания выполняли при постоянном давлении газа на входе (метан, азот) $P_{вх} = 1$ МПа. Методикой выполнения работ предусматривали определение начальной газовой проницаемости (отсутствие внешней нагрузки), при равнокомпонентном и разнокомпонентном внешнем сжимающем нагружении. Внешнее нагружение осуществляли на установке трехосного сжатия, созданной в ИГТМ НАН Украины. Внешнюю нагрузку осуществляли по следующей программе.



1 – испытуемый образец; 2, 3 – входная и выходная скважины; 4 – породный целик; 5, 6 – металлические трубки; 7, 8 – резиновые манжеты; 9, 10 – прижимные гайки; σ_x , σ_y , σ_z – главные компоненты внешней нагрузки.

Рис. 2 - Продольное сечение параллелепипедного породного образца:

Вначале создавали равнокомпонентное напряженное состояние заданного уровня ($\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z \leq 0,5 / \sigma_{сж}$), а затем при неизменной осевой компоненте (σ_y), параллельной направлению движения газового потока, осуществляли изменение величины и соотношения боковых составляющих σ_x и σ_z в пределах $\lambda = \sigma_x / \sigma_z$ от 1,0 до 0,1. Для исключения влияния неупругих деформаций в образце его боковые нагружения осуществляли при значениях σ_x и σ_z , меньших половины предела сопротивления испытуемой породы одноосному сжатию. Результаты определения коэффициентов начальной проницаемости K_0 и при различном уровне равнокомпонентного нагружения, полученные разработанным и стандартным способами, сопоставляли с целью оценки степени их сходимости.

В табл. 2 приведены осредненные результаты определения проницаемости по метану образцов параллелепипедной формы, изготовленных из газоносного песчаника $l_5Sl_4^4$ шахты им. Ю.А. Гагарина ГХК «Артемуголь». Для удобства сопоставления эти образцы и аналогичные по вещественному составу цилинд-

рические образцы (см. табл. 1) обозначены одинаковыми порядковыми номерами.

Таблица 2 - Проницаемость по метану образцов песчаника параллелепипедной формы при равнокомпонентной внешней нагрузке

№ обр.	$K_{np} \cdot 10^{-3}$, фм	$\sigma_{x, y, z}$, МПа			
		1	10	20	40
1	220	190	105	50	22
2	195	180	60	30	10
3	140	120	40	18	1

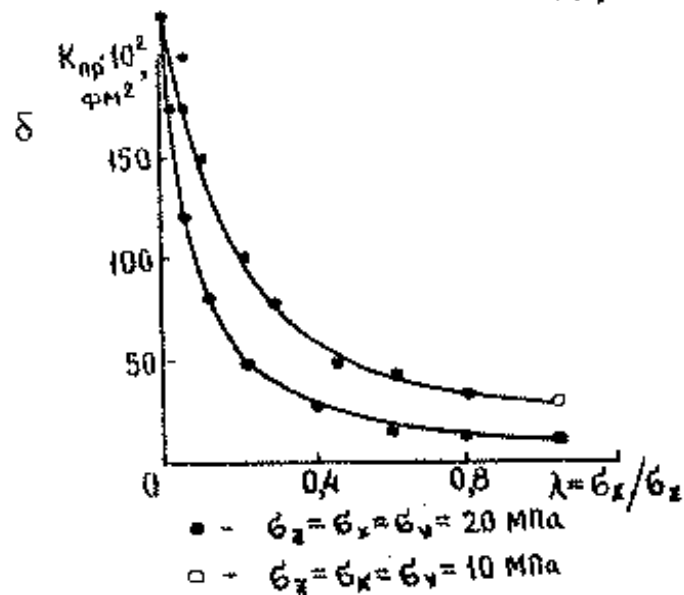
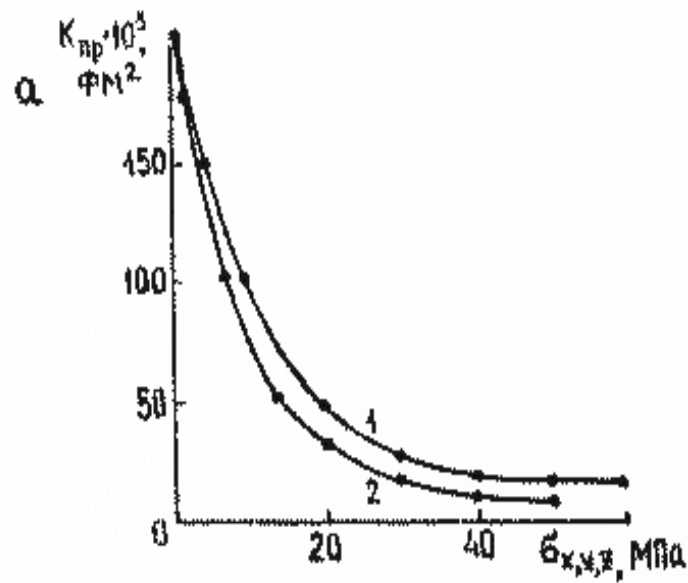
Из сопоставления экспериментальных данных, приведенных в табл. 1 и 2, видно, что численные значения коэффициентов проницаемости песчаника, определенные разработанным и стандартным методами при равных граничных условиях, имеют удовлетворительную сходимость (расхождение не превышает 20 %).

В табл. 3 приведены результаты определения величины коэффициентов проницаемости по метану параллелепипедного образца при разнокомпонентной внешней нагрузке, а на рис. 3 представлен характер их изменения в функции соотношения компонент, ортогональных направлению газового потока.

Таблица 3 - Газовая проницаемость по метану песчаника при разнокомпонентной внешней нагрузке

Компоненты нагрузки	Напряжения, Мпа											
	10	8	12	14	6	3	20	16	15	14	8	4,5
σ_x	10	8	12	14	6	3	20	16	15	14	8	4,5
σ_y	10	10	10	10	10	10	20	20	20	20	20	20
σ_z	10	10	20	35	30	30	20	20	25	35	40	45
λ	1	0,8	0,6	0,4	0,2	0,1	1	0,8	0,6	0,4	0,2	0,1
Коэффициент проницаемости, $K \cdot 10^3$, фм ²	10,5	32	41	52	100	150	7,2	10	20	25	50	75

Анализ приведенных экспериментальных данных показывает, что изменение величины и соотношения главных компонент внешней нагрузки в различной степени влияет на параметры фильтрационных свойств газоносных горных пород. Общей тенденцией в объемном разнокомпонентном поле сжимающих напряжений является следующая закономерность изменения газовой проницаемости фильтрующей среды. Минимальной при заданном уровне внешнего нагружения является газовая проницаемость пород в равнокомпонентном поле сжимающих напряжений. Разнокомпонентность боковой внешней нагрузки при постоянстве осевой составляющей увеличивает пропускную способность по газу породных образцов (см. табл. 3). Превалирующее влияние при этом оказывает степень разнокомпонентности боковых главных напряжений, ортогональных направлению движения фильтрующегося газового потока.



а – равнокомпонентной; б – разнокомпонентной.

Рис. 3 - Проницаемость породных образцов при внешней нагрузке:

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Физика газовых пластов (коллекторские свойства).- Л.: Недра, 1964.- 228 с.
2. Ржевский В.В., Новак Г.Я. Основы физики горных пород. - М.: Недра, 1973.- 285 с.
3. Калинин М.К. Методика исследования коллекторских свойств кернов. - М.: Гостопиздат, 1963. - 224 с.
4. Кулинич В.С., Шевелев Г.А., Егоров С.И. Методы и средства определения параметров геомеханического состояния газоносного породного массива. - Донецк: ЦБНТИ угольной промышленности, 1994.202 с.
5. Абрамов Ф.А., Шевелев Г.А. Свойства выбросоопасных песчаников как породы-коллектора. - Киев: Наук. думка, 1972.- 98 с.