

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИРОДНОЙ ГАЗОВОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ГАЗОНОСНЫХ ПОРОД И УГЛЕЙ

Вдосконалено спосіб визначення газової проникності вуглепородного масиву методом відновлення тиску після його короткочасного скидання зі свердловини та за величиною градієнту тиску газу за часом в закритій свердловині. Проведено порівняльний аналіз різних варіантів способу визначення газової проникності

THE DETERMINATION OF NATURAL GAS PERMEABILITY OF ROCKS AND COALS

The way for determining of gas permeability by the method of pressure recovery after short-term relief from the well and using the parameter of pressure gradient in close well was improved. A comparative analysis of different variants of such method for determining the gas permeability was analyzed.

При выборе способа интенсификации выделения метана из неразгруженного от горного давления угольного пласта важно на первом этапе произвести оценку степени газоотдачи угля. О степени его газоотдачи можно судить по коэффициенту природной газовой проницаемости неразгруженного от горного давления углепородного массива. Известно, что коэффициент газовой проницаемости можно определить разными способами: 1) лабораторным, когда коэффициент проницаемости функционально зависит только от давления гидрообжима или экспериментально-аналитическим методом с использованием какой-либо схемы фильтрации, как правило, одномерной линейной [1]; 2) в натуральных условиях, когда коэффициент газовой проницаемости определяется экспериментально-аналитическим методом [2,3] и 3) теоретическим [4–6]. Способы определения газовой проницаемости подробно изложены в работах [6,7]. Однако даже в лабораторных условиях разброс значений коэффициента газовой проницаемости может отличаться в 2-3 раза [6]. В ИГТМ НАН Украины экспериментально определялся коэффициент газовой проницаемости с учетом разнокомпонентного поля напряжений на образцах песчаника [8]. Установлено, что проницаемость в направлении действия максимальных напряжений больше, чем в направлении минимальной компоненты напряжений [8]. Наибольшее распространение в шахтных условиях получили, так называемые, экспресс-методы определения газовой проницаемости [5]. Из подземной гидравлики наиболее известен способ определения проницаемости по кривой восстановления давления в скважине после кратковременного его сброса [5,7]. Используя эту идею, Кригман Р.Н. и Волошин Н.Е. разработали способ определения природной газовой проницаемости и апробировали его на газоносном нагруженном песчанике [4]. В методе использовался квазистационарный подход, который допускал определение дебита газа по формуле для стационарного процесса и использование формулы, аналогичной формуле Веригина Н. Н. для одномерной стационарной фильтрации [1]. Способ достаточно простой, но в нем не учитывалось

изменение радиуса дренирования. В шахтных условиях для открытой скважины проницаемость песчаника измерялась в работе [2], в которой дебит газа из скважины измеряли в течение продолжительного времени и фиксировали участки, где дебит газа стабилизировался. Объем выделившегося газа во времени был крайне неравномерен, а установившийся объемный расход газа достигался при 200-х часах наблюдения. Общее время проведения эксперимента превышало 900 часов. Объем зоны дренирования определялся с использованием экспериментально замеренного объема газа из скважины по приближенному усредненному способу [2]. Величина условного радиуса дренирования определялась косвенным способом применительно к разным схемам фильтрации газа из массива [2]. Газовую проницаемость измеряли в закрытой скважине [4] и в открытой скважине [2], но предпочтение отдается варианту с закрытой скважиной. Наиболее простым на практике считают определение газовой проницаемости по методу восстановления давления газа после кратковременного его сброса из скважины по методу, разработанному Кригман Р. Н и Волошиным Н.Е, в виде [4]:

$$k = \frac{\mu}{2\pi} \cdot \frac{V \cdot \ln \frac{1,47 \cdot \ell}{2 \cdot r_0}}{\ell \cdot p_0 \cdot t} \cdot \ln \frac{(p_0 - p_1) \cdot (p_0 + p)}{(p_0 + p_1) \cdot (p_0 - p)}, \quad (1)$$

где k – коэффициент газовой проницаемости, м^2 ; μ – динамическая вязкость газа, $\text{Па} \cdot \text{с}$; p – текущее давление, Па ; p_0 – установившееся давление в скважине, близкое к пластовому, Па ; p_1 – начальное давление в скважине после кратковременного сброса, Па ; V – объем скважины, заполняемый газом, фильтрующим из массива, м^3 ; t – текущее время, отсчитываемое после сброса давления и соответствующее давлению p , с ; l – длина фильтрующей части скважины, м ; r_0 – внутренний радиус скважины, м . Используя тот же самый прием, представленный в работе [4], запишем формулу (1) с учетом переменного условного радиуса дренирования r_i в виде:

$$k = \frac{\mu}{2\pi} \cdot \frac{V \cdot \ln \frac{r_i}{r_0}}{\ell \cdot p_0 \cdot t} \cdot \ln \frac{(p_0 - p_1) \cdot (p_0 + p)}{(p_0 + p_1) \cdot (p_0 - p)} \quad (2)$$

Чтобы воспользоваться формулой (2) необходимо иметь уравнение связи, для открытой или закрытой скважины, между условным радиусом дренирования r_i и текущей величиной давления p в скважине ($p > p_1$). Применительно к плоско радиальной схеме фильтрации для закрытой скважины запишем уравнение изотермического состояния газонасыщенной среды при линейном законе изменения давления при переходе от массива к скважине в виде (модель усреднения давления по зоне дренирования) [2]:

$$(p_0 + p)/2 \cdot \pi (r_i^2 - r_0^2) \cdot \ell \cdot m = p \cdot z \cdot V \quad (3)$$

где m – коэффициент трещинно-пористой структуры газоносной среды; z – коэффициент сжимаемости газа, равный единице.

После кратковременного сброса давления из скважины на ее поверхности образуется значительный градиент давления газа, который будет способствовать интенсивной фильтрации газа из массива и восстановлению первоначального давления p_0 . Для установления связи условного радиуса дренирования, с динамическими параметрами газа в скважине, рассмотрим давление газа как результат смеси газа в скважине после сброса давления и газа, находящегося в массиве (модель парциального смешения газов). В случае изотермического процесса уравнение состояния при парциальном смешивании газов запишется так:

$$p_1 \cdot V + p_0 \cdot \pi \cdot (r_i^2 - r_0^2) \cdot \ell \cdot m = p \cdot (V + \pi \cdot (r_i^2 - r_0^2) \cdot \ell \cdot m) \quad (4)$$

По осредненной величине давления газа в массиве и в скважине условный радиус дренирования будет таким [2]:

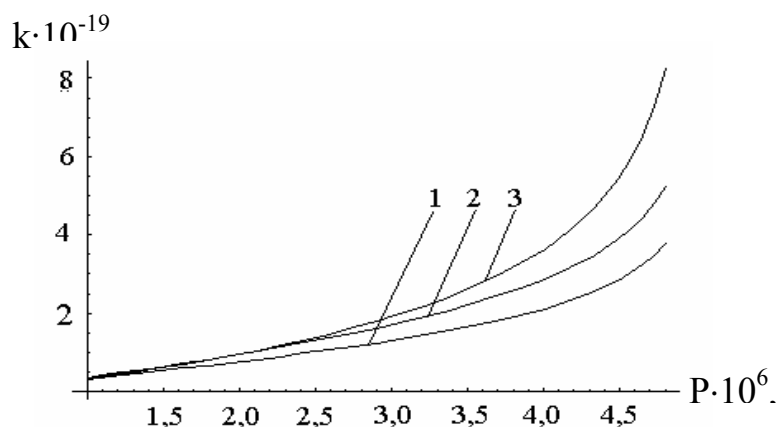
$$r_i = \sqrt{r_0^2 + \frac{p \cdot V}{\frac{p_0 + p}{2} \cdot \pi \cdot \ell \cdot m}} \quad (5)$$

По модели парциального смешивания газов условный радиус дренирования из уравнения (4) запишем в виде:

$$r_i = \sqrt{r_0^2 + \frac{(p - p_1) \cdot V}{\pi \cdot \ell \cdot m \cdot (p_0 - p)}} \quad (6)$$

Подставляя поочередно выражения (5) и (6) в формулу (2) определим коэффициент газовой проницаемости для случая, когда принимается осреднение давления в массиве и в скважине [2] и для случая, когда давление в скважине определяется по сумме парциальных давлений в скважине и в массиве.

В качестве примера промоделируем условно эксперимент для трех выше-рассмотренных случаев определения радиуса дренирования при следующих исходных данных: $p_0 = 50 \cdot 10^5$ Па; $p_1 = 2 \cdot 10^5$ Па; $V = 0,157$ м³; $l = 1$ м; $r_0 = 0,1$ м; $\mu = 10 \cdot 10^{-6}$ Па·с; $m = 0,02$. Пусть время, в течение, которого стабилизировалось давление равно $t = 10^6$ с. Результаты расчета, проведенные по формулам (1) и (2) по трем разным моделям представления условного радиуса дренирования показаны на рис. 1.



1 – по модели Кригман Р.Н. - Волошина Н.Е.; 2 – по модели парциального смешения газов; 3 – по модели осредненного давления газа в массиве и в скважине.

Рис.1 – Изменение коэффициента газовой проницаемости в зависимости от величины давления газа в скважине для различных радиусов условного дренирования.

В качестве расчетной величины k можно брать либо его значение перед полным восстановлением давления или брать среднее арифметическое значение на участке линейного нарастания коэффициента газовой проницаемости. Судя по величине искусственно принятой газоносной среды, была определена газовая проницаемость, подходящая к газоносным песчаникам[2].

Вывод: из рис. 1 видно, что полное восстановление давления до величины близкой к исходному достигается при $p=50 \cdot 10^5$ Па при фиксированном времени наблюдения равном $t=10^6$ с. При $m=0,02$ в момент полного восстановления давления величина коэффициента газовой проницаемости, определяемого по методу Кригмана Р.Н. и Волошина Н.Е., в 1,2 раза меньше, чем по модели парциального смешения газов и в 2 раза меньше, по сравнению с моделью, использующей усреднение давления газа по объему зоны дренирования [2].

Можно так же определить коэффициент природной газовой проницаемости используя известное соотношение для массового расхода газа, полученное из закона изменения массы в замкнутом постоянном объеме [4-5]:

$$m_p = \frac{\rho_a \cdot V}{p_a} \cdot \frac{dp_c}{dt}; \quad (7)$$

где ρ_a и p_a – соответственно, барометрические плотность и давление газа.

Из формулы (7) видно, массовый расход газа в скважину определяется только величиной градиента изменения давления газа в скважине во времени. Если давление газа во времени не меняется, то массовый расход равен нулю. Если же он постоянный, то и массовый расход постоянный. Следовательно, в закрытой скважине по кривой изменения давления газа во времени можно сразу определить следующие параметры: статическое давление газа и характер его изменения во времени (величину градиента давления газа по времени), массовый рас-

ход газа в любой момент времени по данным экспериментальных измерений в натуральных условиях, ориентировочную величину пластового давления газа. С другой стороны массовый расход газа можно записать в виде [7]:

$$mp = \rho \cdot v \cdot F; \quad (8)$$

где ρ – плотность газа в массиве в зоне условного радиуса дренирования r_i , кг/м³; v – скорость фильтрации газа в массиве, м/с; F – поверхность фильтрации газа, м². Заменяя в формуле (8) скорость v фильтрации по формуле Дарси для линейного закона фильтрации [7] и используя плоско радиальную схему фильтрации для поверхности фильтрации F получим

$$mp = \rho \cdot \frac{k}{\mu} \cdot \frac{dp}{dr} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \ell \cdot m \quad (9)$$

Приравнявая выражения для массовых расходов газа в массиве (9) и в скважине (7) получим:

$$\rho \cdot \frac{k}{\mu} \cdot \frac{dp}{dr} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \ell \cdot m = \frac{\rho a \cdot V}{pa} \cdot \frac{dp_c}{dt}; \quad (10)$$

Считая процесс расширения газа в скважине изотермическим [7], заменим плотность ρ в формуле (10) через выражение

$$\rho = \rho_0 \cdot p / p_0 \quad (11)$$

$$\frac{\rho a \cdot V}{pa} \cdot \frac{dp_c}{dt} = \rho_0 \cdot \frac{p}{p_0} \cdot \frac{k}{\mu} \cdot \frac{dp}{dr} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot m \cdot \ell \quad (12)$$

Разделяя переменные и интегрируя выражение (12) по r в пределах от r_0 до r_i , а давление p от p до p_0 получим:

$$\frac{\rho a \cdot V}{pa} \cdot \frac{dp_c}{dt} \cdot \int_{r_0}^{r_i} \frac{dr}{r} = \frac{k}{\mu} \cdot \frac{\rho_0}{p_0} \cdot 2 \cdot \pi \cdot m \cdot \ell \cdot \int_p^{p_0} p \cdot dp; \quad (13)$$

$$\frac{\rho a \cdot V}{pa} \cdot \frac{dp_c}{dt} \cdot \ln \frac{r_i}{r_0} = \frac{k}{\mu} \cdot \frac{\rho_0}{p_0} \cdot 2 \cdot \pi \cdot m \cdot \ell \cdot \frac{1}{2} (p_0^2 - p^2); \quad (14)$$

Из выражения (14) определяем отношение коэффициента газовой проницаемости к динамической вязкости газа:

$$\frac{k}{\mu} = \frac{\frac{\rho a \cdot V}{pa} \cdot \frac{dp_c}{dt} \cdot \ln \frac{r}{r_0}}{\rho_0 / p_0 \cdot \pi \cdot m \cdot \ell \cdot (p_0^2 - p_c^2)} \quad (15)$$

Или тоже самое в другом виде

$$\frac{k}{\mu} = \frac{\frac{\rho a \cdot V}{pa} \cdot \frac{p_{c2i} - p_{cli}}{t_{c2i} - t_{cli}} \cdot \ln \frac{r}{r_0}}{\rho_0 / p_0 \cdot \pi \cdot m \cdot \ell \cdot (p_0^2 - p_c^2)} \quad (16)$$

где p_{c1}, p_{c2} – статические давления на прямолинейных участках кривой нарастания статического давления во времени для закрытой скважины (берутся по данным натурального эксперимента) соответственно, для моментов времени t_{cli} и t_{c2i} .

Для того, чтобы определить газовую проницаемость примем характер зависимости (связи) радиуса условного дренирования с давлением газа в приемной камере V . Заменяя в формуле (16) величину условного радиуса дренирования r_i в представлении (5) или (8) можем определять коэффициент газовой проницаемости экспериментально-аналитическим методом. Учитывая, что замеры газовой проницаемости производят в скважинах с малой фильтрующей поверхностью заменим выражение для постоянного замкнутого объема V по формуле [4]:

$$V = \pi \cdot (r_0^2 \cdot \ell + r_i^2 \cdot \ell_i)$$

где ℓ_i и r_i – длина и половина внутреннего диаметра манометрической трубки.

Скорость фильтрации приближенно определим по формуле (8)

$$v = mp / \rho_i \cdot F_i = mp / \rho_i \cdot 2\pi \cdot r_i \cdot \ell \cdot m; \quad (17)$$

Согласно закону постоянства расхода можно записать [7]:

$\rho_i \cdot v_i \cdot F_i = \rho_c \cdot v_c \cdot F_c = mp$. Площадь внутренней поверхности скважины будет равна $F_c = 2\pi \cdot r_0 \cdot \ell \cdot m$. Тогда скорость газа окончательно запишется в виде:

$$v = mp / \rho_c \cdot 2\pi \cdot r_0 \cdot \ell \cdot m; \quad (18)$$

Заменяя величину плотности ρ_c газа в скважине, полагая процесс истечения изотермическим: $\rho_c = \rho_0 \cdot p_c / p_0$ и подставляя ее в формулу (21) получим окончательно выражение для определения скорости фильтрации газа в закрытую скважину

$$v = mp / \rho_0 \cdot \frac{p_c}{p_0} \cdot 2\pi \cdot r_0 \cdot \ell \cdot m; \quad (19)$$

Вывод: в закрытой скважине можно приближенно рассчитать: коэффициент газовой проницаемости по величине градиента изменения давления газа во времени, величину пластового давления, массовый расход газа и скорость фильтрации газа в любой момент времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Веригин Н.Н. Методы определения фильтрационных свойств горных пород / Н.Н. Вериги. – М.: Госстройиздат, 1962.–182с.
2. Шевелев Г.А. Методика расчета и результаты определения газопроницаемости выбросоопасных песчанников / Г.А. Шевелев // Разработка месторождений полезных ископаемых. – Вып. 25. – 1970. – С. 60 - 64.
3. Коллекторские свойства, газопроницаемость выбросоопасных пород / В.Е. Забигаило, Г.А. Шевелев, В.И. Мякенький [и др.] // Выбросы породы и газа. – К.: Наукова думка, 1971. – С. 141 – 146.
4. Кригман. Р.Н.. Исследование в массиве гапроницаемости выбросоопасных пород / Р.Н. Кригман, В.Е. Волошин // Уголь Украины, 1969. – № 3. – С. 44 - 45.
5. Кузнецов С.В. Природная проницаемость угольных пластов и методы ее определения / С.В. Кузнецов, Р.Н. Кригман. М.: Наука. –1978. – 122с.
6. Петухов И.М. Механизм развязывания и протекания выбросов угля (породы) и газа / И.М. Петухов, Линьков А.М. // Основы теории внезапных выбросов угля, породы и газа. – М., Недра, 1978.–С. 3-16.
7. Чарный И.А. Подземная гидромеханика / И.А. Чарный. – М-Л.: Гостехиздат, 1948. – 250 с.
8. Перепелица В.Г. Изменение газовой проницаемости в напряженных горных порода / В.Г. Перепелица, В.С. Кулинич, Г.А. Шевелев // Уголь Украины. – 2006. – №3. – С.33-35.

К ВОПРОСУ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕНОСА ПРИ ДВИЖЕНИИ ВОЗДУХА В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ

Розглянуто процеси переносу тепла, імпульсу та примішок під час турбулентного руху, взаємозв'язані між собою, при цьому основні рівняння переносу мають ідентичну основу. Визначено розподілення швидкості у турбулентному потоці і розрахунок тертя під час стабілізованого руху повітря. Спрогнозовано аеродинамічний опір на основі завдання функцій шорховатості гірничих виробок.

TO THE QUESTION OF RESEARCH OF PROCESSES OF TURBULENT TRANSFER AT MOVEMENT OF AIR IN MOUNTAIN MAKING

The processes of transfer of heat, impulse and admixtures during turbulent motion are considered, associate between itself, here basic equalizations of transfer have identical basis. Distributing of speed in a turbulent stream and calculation of friction during the stabilized motion of air is certain. Aerodynamic resistance on the basis of task of functions of the roughness mountain making forekasting.

Горная промышленность, включающая ряд добывающих отраслей, обеспечивает сырьем и топливом остальные отрасли народного хозяйства и является основой экономики нашей страны. Современные горнодобывающие предприятия характеризуются большими производственными мощностями, высокой концентрацией горных работ, исключительно разветвленной сетью горных выработок и высокими скоростями подвигания забоев. Основными тенденциями развития горной промышленности является интенсификация добычи полезных ископаемых и повышение безопасности ведения горных работ на основе широкого внедрения новой техники и технологии. Применение прогрессивных производственных процессов, переход горных работ на более глубокие горизонты требует решения ряда сложных задач рудничной вентиляции, так как возможности интенсификации горных работ во многих случаях ограничиваются в связи с аэродинамическими, тепловыми и газовыми проявлениями.

Термоаэрогазодинамические процессы в шахтах и рудниках чрезвычайно многообразны, так как определяются природными условиями и характером производственных процессов, связанных с технологией ведения горных работ и применяемой механизацией. В то же время эти процессы имеют единую физико-механическую основу ввиду их тесной взаимосвязи между собой, что определяет единообразие математического моделирования их физической природы. Описание процессов переноса тепла, импульса и примесей при турбулентных течениях основано на решении краевых задач для общего уравнения диффузии [1-3], в связи с чем при изучении этих процессов используются общие методы анализа.

Разработка теоретических методов анализа процессов переноса в шахтах требует привлечения аппаратов математической физики, гидродинамики и тепломассопереноса. Основная трудность, которую стремится преодолеть автор, состоит в том, что теория диффузии тепла, импульса и примесей при турбулен-