

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ПРОНИЦАЕМОСТИ ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД С УЧЕТОМ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ФЛЮИДА

Жариков А.В. vil@igem.ru, Мальковский В.И. (ИГЕМ РАН),
 Шмонов В.М., Витовтова В.М., Графчиков А.А. (ИЭМ РАН)

Проницаемость горных пород – один из основных параметров, определяющих динамику движения природных флюидов. Сложность состоит в том, что проницаемость пород даже принадлежащих одному литологическому типу может варьировать на многие десятичные порядки. Поэтому экстраполяция имеющихся данных на другие типы пород или РТ параметры не является корректной. В настоящей работе представлена методика и аппаратура и для высокоточных измерений проницаемости образцов в диапазоне $10^{-22} - 10^{-15} \text{ м}^2$ при нормальных и высоких РТ-параметрах. Методика основывается на одномерной нестационарной модели фильтрации аргона через образец цилиндрической формы. Эксперимент проводился следующим образом. Входное сечение образца соединяется с газовой камерой малого объема. В отличие от традиционной техники Брейса [1] выходное сечение образца открыто в атмосферу (рис.1). В начальный момент времени газовая камера соединяется с газовым баллоном высокого давления. В результате в камеру подается некоторое количество газа при повышенном давлении. Затем вентиль, соединяющий камеру с баллоном, закрывается, и давление газа в камере начинает медленно уменьшаться в результате фильтрации газа через образец, причем скорость уменьшения давления зависит от проницаемости образца.

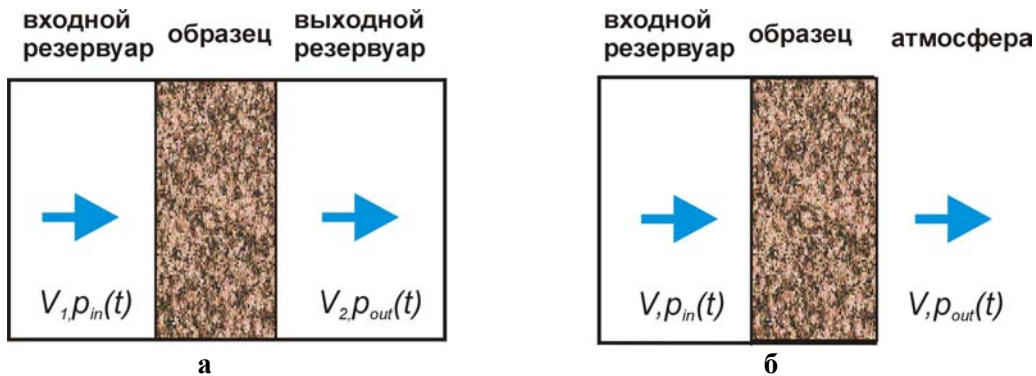


Рис.1. Концепция нестационарного метода измерения проницаемости в традиционном (а) и модифицированном (б) вариантах.

На основании закона Дарси и уравнения неразрывности с учетом зависимости проницаемости от давления газа (эффект Клинкенберга) [2,3] нестационарное распределение давления аргона по длине образца описывается нелинейным уравнением параболического типа и граничными условиями во входном и выходном сечениях образца следующего вида

$$\varphi \frac{\partial p}{\partial t} = k_w \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{1}{\mu} \left(1 + \frac{b}{p} \right) \frac{\partial p}{\partial x} \right], \quad 0 < x < L; \quad \frac{dp_{ax}}{dt} = \frac{S p_{ax} k_w}{V \mu} \left(1 + \frac{b}{p_{ax}} \right) \frac{\partial p}{\partial x} \Big|_{x=0}; \quad p_{вых} = p_{атм}.$$

Здесь p – давление газа; p_{ax} и $p_{вых}$ – давления во входном и выходном сечениях образца; φ – пористость; S – поперечное сечение образца; L – длина образца; μ – динамическая вязкость газа; k_w и b – параметры, характеризующие зависимость проницаемости от давления газа, V – объем газовой камеры, соединенной с входным сечением образца, в которую в начале каждого опыта подается некоторое количество газа при повышенном давлении.

В соответствии с условиями эксперимента начальное распределение давления в образце полагалось однородным.

В исследуемом диапазоне температур и давлений фильтрующийся через образец аргон можно считать идеальным газом. Значения динамической вязкости газа при заданных параметрах состояния определялись по известным аппроксимационным соотношениям для вязкостных вириальных коэффициентов аргона [4].

В общем случае приведенное уравнение фильтрации интегрировалось численно методом Кранка-Никольсона второго порядка точности относительно шагов разностной сетки по x и t [5]. Если пористость образца не превышает нескольких процентов, можно предположить, что изменением плотности газа в поровом пространстве образца можно пренебречь по сравнению с изменением плотности газа во входной газовой камере (объем которой, как правило, значительно больше объема порового пространства образца). В этом случае рассматриваемая краевая задача была сведена к задаче Коши для уравнения Риккати. Аналитическое решение этой задачи Коши с удовлетворительной для проводимых измерений точностью согласовалось с численным решением исходной задачи.

Полученная расчетным путем зависимость $p_{вх}(t)$ сравнивалась с измеренной. На основании этого сравнения подбирались такие значения параметров k_w и b (определяющие значение проницаемости в общем случае), при которых рассогласование вычисленных и измеренных значений $p_{вх}(t)$ было минимальным. Подборка осуществлялась путем пошаговой процедуры на основании минимизации функции невязки модифицированным градиентным методом. Аналитическое решение упрощенной задачи использовалось для выбора начального приближения и оценки точности метода. Пошаговое определение параметров проницаемости градиентным методом проводилось на основе численных решений.

Метод позволяет по результатам одного опыта с фильтрацией газа определить проницаемость образца по воде (k_w) и значение константы Клинкенберга (b), характеризующей поровое пространство породы.

Для реализации данной методики в ИЭМ РАН разработана экспериментальная установка, позволяющая проводить измерения при температурах до 300°C и эффективных давлениях 50 МПа (способ нагружения: $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z$ - всесторонний изотропный стресс) на образцах диаметром до 25 мм и длиной до 40 мм.

Таблица 1.

Результаты измерений проницаемости различными методами

Образец	Порода	Проницаемость (м ²)			Константа Клинкенберга (МПа)	
		Нестационарный метод с фильтрацией аргона	Стационарный метод с фильтрацией аргона	Стационарный метод с фильтрацией воды	Нестационарный метод с фильтрацией аргона	Стационарный метод с фильтрацией аргона
СЗ	песчаник	1,32E-15	1,89E-15		2,13E+05	1,26E+05
НЗ	песчаник	1,01E-15	1,63E-15		2,68E+05	3,06E+05
ИЗ	кварцевый диорит	2,62E-19	2,35E-19		2,82E+05	3,84E+05
ПЛ 360	Гнейс	3,86E-20	2,20E-20	2,97E-20	6,91E+05	2,05E+06

На этой установке были проведены измерения проницаемости образцов различных типов пород: как высоко-, так и низкопроницаемых с использованием модифицированного нестационарного и стационарного метода с фильтрацией аргона и воды. Полученные результаты (Табл. 1.) показывают хорошую сходимость, что свидетельствует о корректности и достоверности нового метода измерений проницаемости.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 02-05-64906)

Литература

1. *Brace W.F., Walsh J.B., Frangos W.T.* Permeability of granite under high pressure // J. Geophys. Res. 1968. V.73. N 6. PP. 2225-2236.
2. *Bear J.* Dynamics of fluids in porous media // NY.: Am. Elsevier 1972.
3. *Klinkenberg L.J.* The permeability of porous media to liquids and gases // Am. Petroleum Inst. Drilling and Production Practice. 1941. PP.200-211.
4. Теплофизические свойства технически важных газов при высоких температурах и давлениях: Справочник // Зубарев В.Н., Козлов А.Д., Кузнецов В.М. и др. // М.: Энергоатомиздат. 1989. 232 с.
5. *Роч П.* Вычислительная гидродинамика // М.: Мир. 1980. 616 с.

Вестник Отделения наук о Земле РАН - №1(22) 2004

Информационный бюллетень Ежегодного семинара по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии 2004 года (ЕСЭМПГ-2004)

URL: http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dgggms/1-2004/informbul-1/geomaterial-1.pdf

Опубликовано 1 июля 2004 г

© Вестник Отделения наук о Земле РАН, 1997 (год основания), 2004

При полном или частичном использовании материалов публикаций журнала, ссылка на "Вестник Отделения наук о Земле РАН" обязательна