

НОВЫЙ МЕТОД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОНИЦАЕМОСТИ ОБРАЗЦОВ АНИЗОТРОПНЫХ ПОРОД ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ

Жариков А.В., Мальковский В.И. (ИГЕМ РАН), Шмонов В.М. (ИЭМ РАН)

vil@igem.ru, malk@igem.ru, shmonov@iem.ac.ru

Ключевые слова: эксперимент, анизотропия проницаемости, модель фильтрации

Проницаемость является одним из основных параметров, определяющих динамику движения флюидов в Земной коре. Изучению влияния температуры и давления на проницаемость образцов горных пород посвящены многие экспериментальные исследования [1], однако в большинстве этих работ изучались образцы изотропных пород. Между тем анизотропия транспортных свойств является весьма распространенным свойством пород. С практической точки зрения наиболее важным представляется случай, когда анизотропия обусловлена слоистой структурой пород. Проницаемость таких пород является тензором второго ранга, две главные компоненты которого (соответствующие плоскости слоистости) равны друг другу. Экспериментальные работы по изучению влияния температуры на проницаемость в породах этого типа очень немногочисленны. Результаты таких исследований приведены, например, в [2]. Как правило, эти эксперименты осуществляются на двух цилиндрических образцах, ось одного из которых лежит в плоскости слоистости, а ось другого перпендикулярна плоскости слоистости. При различных значениях температуры одним из традиционных методов определяется проницаемость каждого из цилиндров в направлении их осей. Подобный метод, имеет существенный недостаток, связанный с возможностью значительных локальных вариаций проницаемости, обусловленных случайными вариациями текстуры пород. Вследствие этого характеристики анизотропии в разных цилиндрах могут быть различными. Поэтому величины обеих компонент проницаемости пород со слоистой анизотропией предпочтительно определять на одном и том же образце породы.

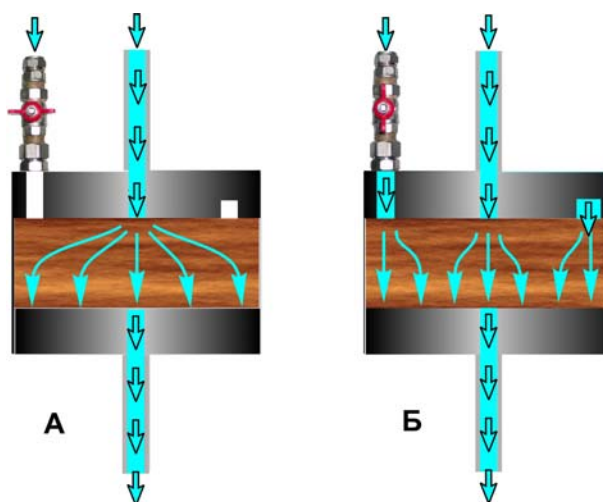


Рис.1. Ввод газа при измерении анизотропной проницаемости на образце
а – первый режим, б – второй режим

Лабораторные методы определения проницаемости пород на образцах основаны на измерении параметров фильтрации флюида через образец. Рассмотрим теперь такой процесс фильтрации через образец породы со слоистой анизотропией, выполненный в виде цилиндра, ось которого перпендикулярна плоскости слоистости, а основания служат входным и выходным сечениями (рис.1). В первом режиме (рис. 1а) флюид вводится в образец лишь через круг малого радиуса r_0 на оси образца (остальная часть входного сечения является непроницаемой для флюида). Во втором режиме (рис. 1б) флюид вводится не только через тот же круг, но и через тонкую кольцевую область на периферии входного сечения. Влияние анизотропии проницае-

мости на характеристики течения в этих двух случаях будет различным. Сопоставляя характеристики течения, измеренные в двух режимах, можно определить продольную и поперечную компоненты проницаемости. С учетом эффекта Клинкенберга [3] компоненты проницаемости описываются выражениями:

$$k_l = k_l^0 (1 + b/p), \quad k_t = k_t^0 (1 + b/p),$$

где k_l, k_t – продольная и поперечная компоненты проницаемости соответственно; k_l^0, k_t^0 – продольная и поперечная проницаемости для жидкости; p – давление газа; b – константа Клинкенберга.

Газы, используемые в качестве флюида при измерении проницаемости, в диапазоне температур, представляющем практическое значение, можно считать идеальными. Тогда в стационарном режиме фильтрация газа через образец в цилиндрических координатах r, z описывается уравнением

$$k_l^0 \frac{\partial}{\partial z} \left[(p + b) \frac{\partial p}{\partial z} \right] + \frac{k_t^0}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r(p + b) \frac{\partial p}{\partial r} \right] = 0. \quad (1)$$

Из решения этого уравнения при соответствующих граничных условиях $p(r, z)$ можно определить массу газа, проходящего через образец в единицу времени (массового расхода газа)

$$w = \frac{2\pi k_l^0 \rho_0}{\mu} \left(1 + \frac{b}{p_0} \right) \int_0^{r_b} \left. \frac{\partial p}{\partial z} \right|_{z=0} r dr, \quad (2)$$

где p_0 – давление в выходном сечении образца (описываемом уравнением $z = 0$); ρ_0 – плотность газа в выходном сечении; r_b – радиус основания образца.

Обозначим w_1 и w_2 массовые расходы в режимах 1 и 2 соответственно. Введем переменную относительного массового расхода $G = w_2/w_1$ и параметр анизотропии $K = k_l^0 / k_t^0$. Имея теоретически определенную зависимость $G(K)$, по измеренному значению G можно определить K .

Решение уравнения (1) было получено методом конечных элементов на основе метода Галеркина [4]. Расчеты показали, что зависимость $G(K)$ является монотонно убывающей (см. рис.2). Поскольку $G \rightarrow 1$ при $K \rightarrow \infty$, точность определения больших K по зависимости $G(K)$ падает при $G \cong 1$. Следовательно, точность определения K тем выше, чем больше G отличается от единицы. Из рис.2а следует, что уменьшение $R_0 = r_0/r_b$ и увеличение $\Delta = \delta/r_b$ приводят к увеличению G , однако это увеличение незначительно (см. рис.2а). В значительно большей степени величина G зависит от соотношения размеров образца l/r_b , где l – высота образца (см. рис.2б). Так при $l/r_b = 0.5$ и $K \leq 10$ выполняется неравенство $G - 1 \geq 0.2$, т.е. при таком соотношении размеров образца точность предлагаемой методики является вполне достаточной для определения анизотропной проницаемости вплоть до $K = 10$.

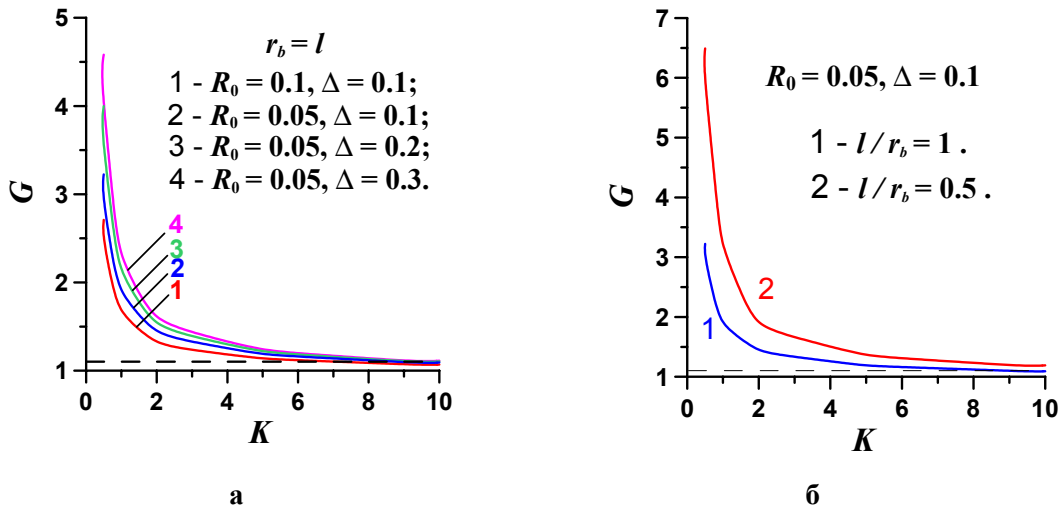


Рис.2. Зависимость относительного расхода от анизотропии проницаемости: а – при различных размерах участков ввода газа во входном сечении, б – при различных соотношениях размеров образца.

Существенным преимуществом предлагаемой методики по сравнению с существующими является отсутствие необходимости в повторении цикла изменения температуры для проведения измерений обеих главных компонент проницаемости.

Работа поддержана РФФИ, грант 05-05-65136

Литература

1. Шмонов В.М., Витовтова В.М., Жариков А.В. Флюидная проницаемость пород земной коры // М.: Научный мир. 2002. 216с.
2. Zharikov A.V., Vitovtova V.M., Shmonov V.M., Grafchikov A.A. Permeability of the rocks from the Kola superdeep borehole at high temperature and pressure: implication to fluid dynamics in the continental crust // Tectonophysics. 2003. PP. 177-191.
3. Коллинз Р. Течение жидкостей через пористые материалы // М.: Мир. 1964. 350с.
4. Зенкевич О., Морган К. Конечные элементы и аппроксимация // М.: Мир. 1986. 318с.

Вестник Отделения наук о Земле РАН - №1(24) 2006

Информационный бюллетень Ежегодного семинара по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии 2004 года (ЕСЭМПГ-2006)

URL: http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dgggms/1-2006/informbul-1_2006/elaborat-2.pdf

Опубликовано 1 июля 2006 г

© Вестник Отделения наук о Земле РАН, 1997 (год основания), 2006

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