

ТЕХНИКА ИЗМЕРЕНИЯ ПРОНИЦАЕМОСТИ ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД МЕТОДОМ ЗАТУХАНИЯ ИМПУЛЬСА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОДЫ В КАЧЕСТВЕ ФИЛЬТРУЮЩЕГОСЯ ФЛЮИДА

Жариков А.В. (ИГЕМ РАН, ИЭМ РАН), **Мальковский В.И.** (ИГЕМ РАН, РХТУ),

Шмонов В.М. (ИЭМ РАН)

malk@igem.ru, vil@igem.ru

Ключевые слова: *проницаемость, метод измерения, образцы пород, газ, жидкость, давление, вязкость, сжимаемость, течение, закон Дарси, аналитическое решение*

Метод затухания импульса давления (pulse decay method) является одним из наиболее эффективных способов измерения проницаемости образцов горных пород. Как правило, при использовании этого метода в качестве фильтрующей среды используется газ. Это связано с тем, что газ имеет значительно меньшую динамическую вязкость, чем жидкость при тех же параметрах состояния. В связи с этим измерение проницаемости занимает меньшее время. Недостатком такого подхода является то, что измеренная таким образом проницаемость зависит от давления газа (т.н. эффект Клинкенберга), и для перехода от полученных измерений к определению проницаемости пород для воды необходимо провести несколько измерений проницаемости для газа при различных давлениях [1].

При переходе от измерений проницаемости для газа к определению проницаемости для воды обычно используется модель Клинкенберга, учитывающая влияние конденсированного состояния на фильтрацию в поровом пространстве образца [2]. Однако необходимо иметь в виду, что молекулы воды являются полярными. Вследствие этого в твердой и жидкой фазах (т.е. в матрице породы и в водном флюиде) вблизи поверхности раздела фаз на процесс фильтрации значительное влияние может оказывать коллоидное состояние вещества (т.е. особая структура вещества в обеих фазах, обусловленная межфазным взаимодействием) [3]. Такие эффекты не учитываются моделью Клинкенберга. В связи с этим измерения проницаемости для газа следует в некоторых случаях дополнять непосредственным измерением проницаемости для воды. Необходимо иметь в виду, что при использовании метода затухания импульса давления такие измерения наряду с упоминавшимся выше недостатком (относительно высокая динамическая вязкость воды) имеют и существенное преимущество: относительно малую сжимаемость водного флюида вне околокритической области параметров [4]. Значение этого свойства объясняется следующими причинами.

Измерение методом затухания импульса давления основано на убывании первоначально повышенного давления флюида в замкнутом малом резервуаре, соединенном с входным сечением образца вследствие фильтрации флюида через образец к его выходному сечению (понятия входного и выходного сечений условны и связаны только с организацией процесса измерения проницаемости, рис.1) [5]. Длительность измерения определяется временем затухания первоначального импульса давления во входном резервуаре. Вследствие более высокой вязкости вода медленнее, чем газ, уходит из резервуара. Однако за счет гораздо меньшей сжимаемости воды давление в резервуаре снижается гораздо быстрее, чем в газовой фазе. Таким образом, при надлежащем выборе параметров процедуры измерения можно добиться практически реализуемых условий непосредственного измерения проницаемости образцов пород для воды.

При использовании метода затухания импульса давления проницаемость измеряется косвенно путем сопоставления расчетных и измеренных зависимостей давления флюида во входном резервуаре от времени. Расчетные зависимости давления от времени могут быть получены при использовании следующей модели.

В случае одномерной фильтрации скорость течения воды в образце определяется уравнением Дарси [6]

$$w = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x}, \quad (1)$$

где k – проницаемость, μ – динамическая вязкость, w – скорость, p – давление, x – координата, направленная от входного сечения образца к выходному.

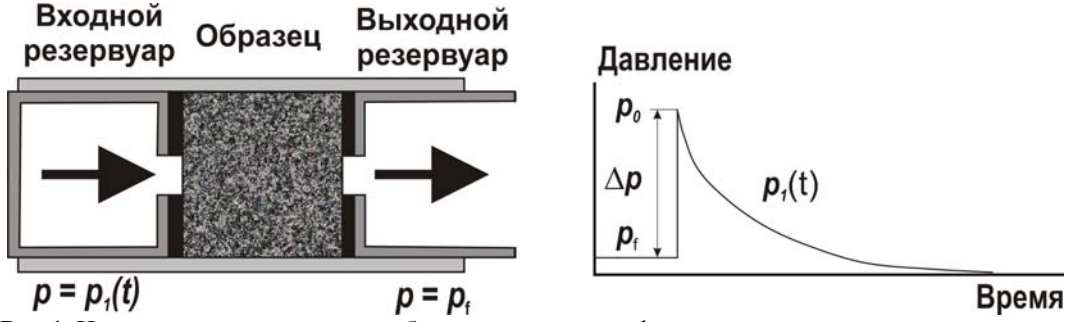


Рис.1. Измерение проницаемости образца породы модифицированным методом затухания импульса

Поскольку пористость образца мала, уравнение неразрывности запишется в виде

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho w) = 0, \quad (2)$$

где ρ – плотность воды.

Подставляя выражение скорости (1) в уравнение неразрывности (2), получим (с учетом того, что пористость образца мала, а вязкость воды вне околоскритической области параметров состояния слабо зависит от давления)

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = 0.$$

Следовательно распределение давления по длине образца является линейным.

Условие материального баланса воды во входном резервуаре запишется в виде

$$V d\rho_1 = -S(\rho w)|_{x=0} dt, \quad (3)$$

где V – объем резервуара, S – сечение образца, t – время, ρ_1 – плотность воды во входном резервуаре.

Согласно таблицам данных из [4], плотность воды в изотермическом образце в интервале давлений 0.1 – 2 МПа при температурах, меньших температуры насыщения, может приближенно описываться зависимостью

$$\rho = \rho_f \left[1 + A(T) \left(\frac{p}{p_f} - 1 \right) \right], \quad (4)$$

где ρ_f , p_f – плотность и давление воды у выходного сечения образца; $A(T)$ – безразмерный коэффициент сжимаемости, зависящий от температуры.

Вследствие линейности распределения давления по x , с учетом предложенной приближенной зависимости плотности от давления (4), уравнение баланса воды в резервуаре (3) запишется в виде

$$V\rho_f \frac{A}{p_f} \frac{dp_1}{dt} = -\frac{Sk}{\mu} \frac{p_1 - p_f}{L} \rho_f [1 + A(p_1/p_f - 1)], \quad (5)$$

где p_1 – давление во входном резервуаре.

Введем безразмерные переменные

$$\tau = \frac{tSkp_f}{AV\mu L}, \quad P = \frac{p_1 - p_f}{p_f}.$$

В безразмерной форме полученное уравнение баланса (5) запишется в виде:

$$\frac{dP}{d\tau} = -P[1 + AP]. \quad (6)$$

Это уравнение первого порядка с разделяющимися переменными. Его общее решение имеет вид:

$$\frac{P}{(1 + AP)^A} = Ce^{-\tau},$$

где C – константа, определяемая из начальных условий.

Однако при умеренных температурах $AP \ll 1$, следовательно:

$$P = P_0 e^{-\tau},$$

где P_0 – начальное значение P .

Отсюда получаем непосредственное выражение для проницаемости в каждый момент времени

$$k = \frac{1}{t} \frac{AV\mu L}{S\rho_f} \ln \left(\frac{p_0 - p_f}{p_1 - p_f} \right), \quad (7)$$

где p_0 – начальное (повышенное) давление во входном резервуаре.

Измеряемыми величинами в выражении (7) являются время t и давление во входном резервуаре p_1 в этот момент времени. В течение одного эксперимента при изменении давления от p_0 до $p_f + \theta(p_0 - p_f)$, где θ – безразмерная величина ($0 < \theta < 1$), задаваемая экспериментатором, можно получить несколько значений проницаемости (k_n , $n = 1, \dots, N$, где N – число измерений). Поскольку k – постоянная, истинное значение определяется путем осреднения всех k_n :

$$k = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N k_n,$$

а среднеквадратическая ошибка измерения k определяется как

$$\sigma_k = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (k_n - k)^2}.$$

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 08-05-00855) а также Программ 16 РАН и 8 ОНЗ РАН

Литература

1. Пэк А.А. О динамике ювенильных растворов // М.: Наука. 1968. 147с.
2. Шмонов В.М., Витовтова В.М., Жариков А.В. Флюидная проницаемость пород земной коры // М.: Научный мир. 2002. 216с.
3. Фролов Ю.Г. Курс коллоидной химии. 2-е изд. // М.: Химия. 1988. 464с.
4. Ривкин С.Л., Александров А.А. Термодинамические свойства воды и водяного пара // М.: Энергия. 1975. 78с.
5. Brace W.F., Walsh J.B., Frangos W.T. Permeability of granite under high pressure // J. Geophys. Res. 1968. V. 73. № 6. P. 2225-2236.
6. Бэр Я., Заславски Д., Ирмей С. Основы фильтрации воды // М.: Мир. 1971. 452с.

Вестник Отделения наук о Земле РАН - №1(27) 2009

Информационный бюллетень Ежегодного семинара по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии 2009 года (ЕСЭМПГ-2009)

URL: http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dgggms/1-2009/informbul-1_2009/geomaterial-3.pdf

Опубликовано 1 сентября 2009 г.

© Вестник Отделения наук о Земле РАН, 1997 (год основания), 2009

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