

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Ухтинский государственный технический университет»
(УГТУ)

**ФИЛЬТРАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
АБСОЛЮТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ,
ПОРИСТОСТИ И УДЕЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ
ГОРНОЙ ПОРОДЫ**

Методические указания
2 издание, исправленное

Ухта, УГТУ, 2012

УДК 622.276.031(075.8)

ББК 33.36я7

М 75

Воронина, Н. В.

В 75 Фильтрационные методы определения проницаемости, пористости и удельной поверхности горной породы [Текст]: метод. указания / Н. В. Воронина, А. А. Мордвинов. – 2-е изд., исправ. – Ухта : УГТУ, 2012. – 12 с., ил.

Методические указания предназначены для студентов нефтегазовых специальностей и направления подготовки «Нефтегазовое дело» с целью практического закрепления лекционного материала по разделу «Изучение коллекторских свойств пород».

Методические указания содержат введение, основные теоретические положения, схему установки для определения проницаемости породы, порядок проведения работы, таблицы результатов измерений, требования к написанию отчета по лабораторной работе.

УДК 622.276.031(075.8)

ББК 33.36я7

Методические указания рассмотрены, одобрены и предложены для издания выпускающей кафедрой РЭНГМ и ПГ (протокол №05 от 23 марта 1998 года).

Рецензент: Э И Каракчиев, доцент кафедры РЭНГМ и ПГ, к.т.н.

Редактор: А. А. Мордвинов, доцент кафедры РЭНГМ и ПГ, к.т.н.

Корректор: К. В. Коптяева.

Технический редактор: Л. П. Коровкина.

В методических указаниях учтены замечания рецензента и редактора.

План 2012 г., позиция 258.

Подписано в печать 31.10.2012. Компьютерный набор.

Объем 12 с. Тираж 50 экз. Заказ №268.

© Ухтинский индустриальный институт, 1998

© Ухтинский государственный технический университет, 2012

169300, Республика Коми, г. Ухта, ул. Первомайская, д. 13.

Типография УГТУ.

169300, Республика Коми, г. Ухта, ул. Октябрьская, д. 13.

ВВЕДЕНИЕ

Современные методы контроля, анализа и прогнозирования разработки нефтяных, газовых и газоконденсатных месторождений основаны на использовании обширной информации о характеристиках пластовых процессов.

Способность горных пород накапливать и пропускать через себя жидкости и газы определяет возможность разработки нефтяных и газовых месторождений. В результате отбора жидкости и газа через скважины при разработке месторождений в пласте возникает процесс движения флюидов (нефти, газа и воды), называемый процессом фильтрации, который выражается в просачивании жидкостей и газа через систему взаимосвязанных мельчайших пустот в породе.

К числу важнейших свойств горных пород, определяющих закономерности процессов фильтрации, относятся проницаемость, пористость, удельная поверхность.

Для определения этих свойств существует многочисленный набор лабораторных и промысловых методов. Большинство лабораторных методов определения указанных характеристик основано на изучении стационарной фильтрации жидкости или газа с известными свойствами через керн или модель горной породы при задаваемых термодинамических условиях.

С целью определения проницаемости и связанной с ней удельной поверхностью породы создаются лабораторные установки различной сложности, но использующие один и тот же физический принцип. Сложность установок определяется величинами давлений, температур, а также требуемой точностью определения этих характеристик.

Настоящие лабораторные работы преследуют цель ознакомить студентов с основными принципами определения проницаемости и удельной поверхности горной породы.

1. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Проницаемостью называют свойство горных пород пропускать через себя жидкости и газы. Это свойство определяется наличием в породе системы взаимосвязанных пустот – пор, величиной коэффициента пористости, размерами пор.

Абсолютно непроницаемых тел в природе нет. Однако при существующих в нефтяных и газовых пластах сравнительно небольших градиентах давлений многие породы (глины, сланцы и др.) оказываются практически мало или совсем непроницаемыми для жидкостей и газов из-за малых размеров пор в этих породах.

Большая часть осадочных пород обладает той или иной проницаемостью. Поровое пространство осадочных пород согласно экспериментальным данным имеет размеры пор, превышающие 1 мкм, которые обеспечивают возможность движения в них жидкостей и газов при характерных для разработки месторождений нефти и газа градиентах давлений.

В реальных пластах, насыщенных одновременно флюидами, в различных фазовых состояниях проницаемость породы для этих фаз определяется соотношением их количеств в поровых каналах, т. е. по сути дела в этом случае проницаемость отражает как свойства самой породы, так и взаимодействие фильтрующихся фаз. Универсальность свойства проницаемости породы проявляется при фильтрации через нее не взаимодействующей с ней однородной жидкости или газа в том, что величина коэффициента проницаемости не зависит от свойств жидкости, а определяется только геометрическими свойствами порового пространства. Благодаря этой особенности проницаемость породы при фильтрации однородной жидкости или газа называется **абсолютной проницаемостью**.

Описать геометрические свойства реальной пористой среды невозможно ввиду чрезвычайной сложности и невоспроизводимости поровых структур. Тем не менее при описании рассматриваемых свойств горных пород возможна идеализация геометрической структуры, позволяющая определить эти свойства на основе общеизвестных представлений.

Наиболее важные результаты основаны на так называемых моделях *идеального* и *фиктивного* грунтов.

Идеальный грунт – это гипотетическая пористая среда, поровые каналы которой представляют собой капилляры одинакового диаметра.

Фиктивным грунтом называется гипотетическая пористая среда, образованная частицами в форме шариков одинакового диаметра.

Обе эти модели можно использовать для анализа фильтрационных свойств пород, если допустить, что сопротивление движению жидкости и газа модель породы и реальный образец породы оказывают одинаковое. При малых скоростях

фильтрации в области существования закона Дарси это условие равносильно условию равенства удельных поверхностей модели и реальных грунтов.

Удельной поверхностью породы называют площадь поверхности поровых каналов в единице объема породы.

В настоящее время известно значительное число формул, полученных на основе модельных представлений о структуре грунтов, в которых величина удельной поверхности связывается с геометрическими характеристиками поровых каналов.

Для фиктивного грунта эта формула может быть получена из следующих соображений.

В единице объема породы доля, занимаемая твердыми частицами, составляет величину $(1 - m)$, где m – коэффициент пористости. Число частиц в этом объеме можно определить как $n = \frac{1 - m}{V_{ш}}$, где $V_{ш} = \frac{\pi D^3}{6}$ – объем шарообразной частицы, имеющей диаметр D . Тогда удельную поверхность можно определить как $S_{y\partial} = n \cdot S_{ш}$, где $S_{ш} = \pi \cdot D^2$ – площадь поверхности частицы.

В итоге удельная поверхность выражается через коэффициент пористости и размер частиц как

$$S_{y\partial} = \frac{6(1 - m)}{D}. \quad (1)$$

При оценке этой величины для реальных пород под D понимают эффективный диаметр частицы ($D_{эф}$).

Согласно экспериментальным исследованиям К. Т. Оркина, величина удельной поверхности породы выше оцененной по формуле (1) в результате нешарообразной формы зерен, а также наличия глинистых частиц. Для учета этого эффекта в формулу (1) вводят эмпирический коэффициент η , величина которого изменяется в пределах от 1,2 (для окатанных зерен) до 1,4 (для угловатых зерен). В итоге формула для определения удельной поверхности принимает вид:

$$S_{y\partial} = \eta \cdot \frac{6(1 - m)}{D_{эф}}. \quad (2)$$

Аналогичные соображения в рамках моделей идеального и фиктивного грунтов позволяют установить связь проницаемости породы с ее геометрическими характеристиками.

Общепринятая форма записи линейного закона фильтрации может быть получена из анализа движения жидкости в капилляре модели идеального грунта. Допуская, что режим движения ламинарный, согласно известной из общей гидравлики формулы Пуазейля:

$$U = \frac{d^2 \Delta P}{32\mu l}, \quad (3)$$

где U – средняя объемная скорость движения жидкости в капилляре;
 d – диаметр капилляра;
 μ – динамическая вязкость жидкости;
 ΔP – перепад давления между концами капилляра;
 l – длина капилляра.

Переходя к понятию средней скорости фильтрации, связанной со скоростью U соотношением $V = m \cdot U$, формула (3) может быть записана в виде:

$$V = \frac{md^2 \Delta P}{32\mu l}. \quad (4)$$

К аналогичному закону фильтрации экспериментальным путем пришел французский инженер А. Дарси в 1856 году. Этот закон принято записывать в форме:

$$\bar{V} = -\frac{k}{\mu} \text{grad}P, \quad (5)$$

где V – вектор скорости фильтрации;
 k – коэффициент абсолютной проницаемости;
 μ – коэффициент динамической вязкости;
 $\text{grad}P$ – вектор градиента давления P .

В простейшем случае одномерной фильтрации, согласно соотношению (5), модуль скорости фильтрации может быть приближенно записан в виде:

$$V = \frac{k \Delta P}{\mu l}. \quad (6)$$

Из сопоставления формул (4) и (6) видно, что в рамках модели идеального грунта коэффициент проницаемости связан только с геометрическими свойствами системы поровых каналов.

$$k = \frac{md^2}{32}. \quad (7)$$

Отсюда можно заключить, что размерность коэффициента проницаемости $[k] = L^2$, где L – размерность длины.

Все рассуждения о связи между геометрическими характеристиками и проницаемостью любой другой модели приводят к усложнению этой зависимости, которая, однако, всегда может быть представлена в виде:

$$k = Sl \cdot d^2,$$

где Sl – так называемое число Слихтера, представляющее собой функцию пористости;

d – эффективный размер пор (либо зерен) породы.

С помощью моделей идеального и фиктивного грунтов легко устанавливается связь между коэффициентом абсолютной проницаемости породы и ее удельной поверхностью.

Рассматривая удельную поверхность породы как основной фактор из определяющих величину сопротивления при фильтрации жидкости и газа, принимается равенство этой характеристики для реальной породы и ее моделей.

Удельная поверхность идеального грунта:

$$S_{y\partial} = \frac{4m}{d}, \quad (8)$$

где d – диаметр поровых каналов.

Из формул (1) и (6) при условии равенства удельных поверхностей получается

$$d = \frac{3}{2} \cdot \frac{m}{1-m} D. \quad (9)$$

Связь между коэффициентом проницаемости и размерами частицы породы устанавливается после постановки (9) и (7):

$$k = \frac{m^3}{72(1-m)} D^2. \quad (10)$$

После подстановки D из формулы (9) в формулу (2) вместо $D_{эф}$ получается:

$$S_{y\partial} = \psi \frac{m^{3/2}}{\sqrt{k}}, \quad (11)$$

где $\Psi = 0,85 \div 0,99$.

Меньшие значения функции Ψ соответствуют окатанным зернам, большие – для угловатых.

Формула (11) дает возможность оценки величины удельной поверхности породы по величине коэффициентов пористости, проницаемости, которые, в свою очередь, могут определяться как лабораторными, так и промышленными исследованиями скважин.

Одним из основных методов определения проницаемости в лабораторных условиях является метод фильтрации газа через цилиндрический образец породы. В основе данного метода лежит формула расхода газа при плоскопараллельной фильтрации:

$$Q_0 = \frac{kF}{2\mu P_0} \frac{P_{вх}^2 - P_{вых}^2}{l}, \quad (12)$$

где Q_0 – объемный расход газа при стандартных условиях;

F – площадь живого сечения образца;

P_0 – стандартное давление;

$P_{вх}$ и $P_{вых}$ – давление в начале и в конце образца;

l – длина образца.

Применимость этой формулы ограничена условиями изотермической фильтрации и величинами давлений, когда значение коэффициента сверхсжимаемости газа незначительно отличается от единицы.

В лабораторной практике данным методом изучают образцы, изготовленные из керна, отобранного при бурении скважины.

В настоящей лабораторной работе выполняется определение проницаемости искусственной пористой среды по воздуху.

2. СХЕМА УСТАНОВКИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОНИЦАЕМОСТИ

Для проведения экспериментов в лабораторных условиях часто необходимо определить абсолютную проницаемость модели пористой среды – колонки, набитой измельченной горной породой (например кварцевым песком). Такие колонки обычно используются исследователями для изучения реологических свойств нефтей или газоконденсатных смесей. Схема такой установки приведена на рис. 1. Основными узлами установки являются: баллон высокого давления 1, наполненный газом (воздухом); редуктор 2, позволяющий регулировать расход и давление выпускаемого из баллона газа; модель пористой среды 6, состоящей из металлической трубы и колонки, регистрирующий объемный расход газа при с внутренней резьбой на концах, набитой кварцевым песком; газовый счетчик 8, регистрирующий объемный расход газа при атмосферных условиях; образцовые манометры 4, позволяющие регистрировать с высокой точностью давление на входе и выходе колонки.

Колонка набивается заранее приготовленной смесью различных фракций кварцевого песка. На концы колонки навертываются соединительные головки. На эти головки крепятся образцовые манометры.

Установка работает следующим образом. Газ из баллона высокого давления редуцируется при помощи редуктора и по соединительной трубке 3 направляется в модель пористой среды. Количество газа (объем) фиксируется газовым счетчиком. Для этого на счетчике имеется циферблат, по которому можно определить объем газа при атмосферных условиях, прошедшего через него. Время фильтрации фиксируется секундомером.

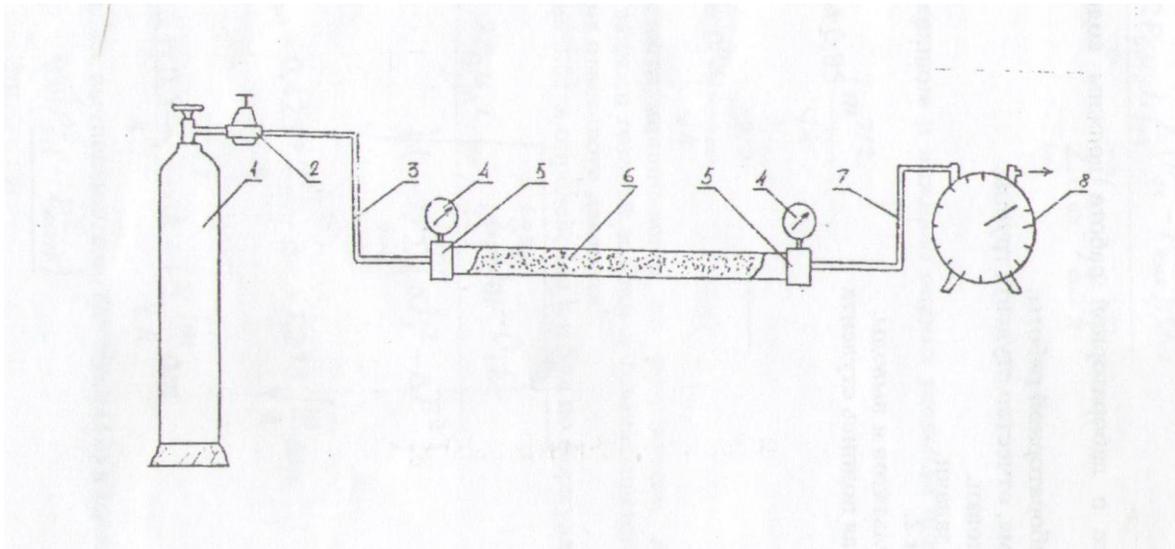


Рис. 1. Схема установки для определения проницаемости

3. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

1. Проверить герметичность соединений установки путем опрессовки.
 2. Открыть вентиль баллона с воздухом.
 3. Приоткрыть редуктор на необходимую величину, в результате чего воздух попадает в колонку, где будет фильтроваться через пористую среду. Давление на входе регулируется редуктором.
 4. С помощью редуктора установить необходимое давление на входе колонки. Образцовый манометр показывает точную величину давления – $P_{\text{вх}}$.
 5. Подождать, когда фильтрация воздуха в колонке будет установившейся.
 6. Включить секундомер и одновременно взять отчет на газовом счетчике.
 7. Через определенный промежуток времени, зависящий от проницаемости пористой среды в колонке и величины перепада давления на ее концах, остановить секундомер и одновременно зафиксировать показания на газовом счетчике.
 8. Значения давлений на входе и выходе по образцовым манометрам, время фильтрации по секундомеру и объем профильтрованного воздуха (по газовому счетчику) занести в таблицу 1.
- В расчетах используется абсолютное давление.
9. Изменить режим фильтрации при помощи редуктора. Повторить все операции. Всего снять показания на 5 режимах, все данные занести в таблицу 1.

Результаты измерений

№ режима	P_{ex} , Па	$P_{вых}$, Па	Объем воздуха $V \cdot 10^{-6}$ м ³	Время опыта t , с	Расход $Q_0 = \left(\frac{V}{t}\right) \cdot 10^{-6}$ м ³ /с
1					
2					
3					
4					
5					

10. В расчетах принимать следующие значения параметров установки и газа:
длина колонки $L = 1$ м;

сечение пористой среды $F = 5,13 \cdot 10^{-4}$ м²;

динамическая вязкость воздуха $\mu = 1,8 \cdot 10^{-5}$ Па · с.

11. Нанести результаты измерений на миллиметровку в координатах $Q \rightarrow (P_{ex}^2 - P_{вых}^2)$.

12. Для получения величины средней проницаемости k следует воспользоваться методом наименьших квадратов. Метод наименьших квадратов дает следующую формулу для определения средней проницаемости:

$$k = \frac{2P_0 \mu_2 L \sum_{i=1}^{i=n} (P_{ex}^2 - P_{вых}^2)_i Q_{oi}}{F \sum_{i=1}^{i=n} (P_{ex}^2 - P_{вых}^2)_i^2}.$$

13. Вычислить верхнюю и нижнюю оценки удельной поверхности по формулам:

$$\bar{S}_{y\partial} = 0,85 \frac{m^{3/2}}{\sqrt{k}}.$$

$$\underline{S}_{y\partial} = 0,99 \frac{m^{3/2}}{\sqrt{k}}.$$

Величина пористости принимается по результатам лабораторной работы «Определение запасов газовой залежи и газонасыщенного порового объема методом падения пластового давления».

14. Оценить погрешности определения k и $S_{y\partial}$ по формулам:

$$\Delta k = \frac{2P_0 \mu_2 L}{F} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} (Q_{0i} - \hat{Q}_i)^2}{(n-2) \sum_{i=1}^{i=n} (\Delta P_i^2 - \Delta \bar{P}^2)}};$$

$$\Delta \bar{S}_{y\partial} = 0,425 \cdot \frac{m^{3/2}}{k^{3/2}} \Delta k + 1,275 \sqrt{\frac{m}{k}} \Delta m;$$

$$\Delta \underline{S}_{y\partial} = 0,5 \frac{m^{3/2}}{k^{3/2}} \Delta k + 1,5 \sqrt{\frac{m}{k}} \Delta m,$$

где \hat{Q}_i – значения дебитов, вычисленные по формуле (12) в точках ΔP_i^2 ,

$$\Delta \bar{P}^2 = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{(P_{exi}^2 - P_{выxi}^2)}{n}.$$

15. Результаты расчетов заносятся в табл. 2.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА О ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

В отчете о лабораторной работе должны содержаться следующие сведения:

1. Название лабораторной работы.
2. Фамилия, имя, отчество студента группы.
3. Схема установки.
4. Постановка задачи.
5. Таблицы 1 и 2.
6. Анализ результатов и выводы.
7. Дата и личная подпись студента.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гиматудинов, Ш. К. Физика нефтяного и газового пласта : учеб. для вузов / Ш. К. Гиматудинов, А. И. Ширковский. – 4-е изд., стереотип. – М. : Недра, 2005. – 311 с.
2. Зельдович, Я. Б. Элементы прикладной математики / Я. Б. Зельдович, А. Д. Мышкис. – М. : Наука, 1972. – 592 с.
3. Михайлов, Н. Н. Физика нефтяного и газового пласта. Т. 1 : учеб. пособие / Н. Н. Михайлов. – М. : МАКС Пресс, 2008. – 448 с.

Таблица 2

Результаты обработки эксперимента

№ режима	$P_{ex}^2 - P_{блх}^2, \text{МПа}^2$	$(P_{ex}^2 - P_{блх}^2) \cdot Q \cdot 10^{-3},$ $\text{МПа}^2 \cdot \text{м}^3$	$(P_{ex}^2 - P_{блх}^2)^2,$ МПа^4	$(\Delta P^2 - \Delta \bar{P}^2)^2,$ МПа^4	$(Q_0 - \hat{Q}) \cdot 10^3,$ м^3	$k,$ МКМ^2	$\Delta k,$ МКМ^2	$\bar{S}_{y\vartheta},$ $\text{м}^2/\text{м}^3$	$\Delta \bar{S}_{y\vartheta},$ $\text{м}^2/\text{м}^3$	$S_{y\vartheta},$ $\text{м}^2/\text{м}^3$	$\Delta S_{y\vartheta},$ $\text{м}^2/\text{м}^3$

