

СТАТЬЯ

УДК 55:549.08:622.276.5
DOI 10.17513/use.38381

СВОЙСТВА ФИЛЬТРАЦИИ ГАЗА ДЛЯ ОБРАЗЦОВ ПОЛЕВЫХ ШПАТОВ, КАЛЬЦИТА И КВАРЦА

Песков А.В.

ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»,
Самара, e-mail: rednakel@ya.ru

Цель этого исследования – провести оценку значений параметров фильтрации газа через образцы полевых шпатов, кальцита и кварца обломочного и магматического генезиса, определить параметры фильтрации для смесей обломочного кварца. Минералы измельчали, зерна помещали в искусственную кювету. Исследовали полевые шпаты, кальцит и кварц обломочного и магматического генезиса с размером зерен 40 мкм, 63 мкм, 80 мкм, 106 мкм, 125 мкм, а также фракцию менее 40 мкм. На образцах зерен рассматриваемых минералов по микрофотографиям определяли коэффициенты округлости и сферичности по диаграмме Крумбьена–Шлосса. Формы выделения минералов преимущественно полигональная, уплощенная, треугольная, ромбическая неправильно изометричная, овальная. Сферичность зерен кварца обломочного генезиса составила 0,53, а для полевых шпатов – 0,66. Окатанность зерен кварца обломочного генезиса – 0,5–0,7, а полевых шпатов и магматического кварца – 0,1–0,2. Найдено, что при фильтрации через образцы полевых шпатов, кальцита коэффициент проницаемости ниже, чем при фильтрации через частицы кварца обломочного генезиса. Коэффициент проницаемости образцов полевых шпатов и кальцита составляет от 10 до 30% от коэффициента проницаемости образцов обломочного кварца. Коэффициенты проницаемости образцов магматического кварца ниже, чем образцов обломочного кварца и полевых шпатов. Это обусловлено различной формой частиц кварца, полевых шпатов, кальцита в матрице породы. Также исследовали смеси зерен кварца обломочного генезиса. Выявлено, что для двухкомпонентных смесей при увеличении среднеквадратичного отклонения размера зерен коэффициент проницаемости смеси снижался. Проведенные исследования могут способствовать прогнозированию значений проницаемости на основе известного гранулометрического анализа пород и анализа формы зерен минералов. Проведенные исследования выполнены автором настоящей статьи.

Ключевые слова: коэффициент проницаемости, нелинейные зависимости, кварц, полевой шпат, кальцит, фракции

GAS FILTRATION PROPERTIES OF FELDSPAR, CALCITE AND QUARTZ SAMPLES

Peskov A.V.

Samara State Technical University, Samara, e-mail: rednakel@ya.ru

The aim of this study is to evaluate the values of gas filtration parameters through samples of feldspars, calcite and quartz of detrital and magmatic genesis. To determine the filtration parameters for mixtures of detrital quartz. The minerals were crushed and the grains were placed in an artificial cuvette. Feldspars, calcite and quartz of detrital and magmatic genesis with grain sizes of 40 μm , 63 μm , 80 μm , 106 μm , 125 μm , and a fraction of less than 40 μm were studied. The roundness and sphericity coefficients were determined on the samples of grains of the minerals under consideration using microphotographs using the Krumbien-Schloss diagram. The forms of mineral allocation are predominantly polygonal, flattened, triangular, rhombic irregularly isometric, oval. The sphericity of quartz grains of detrital genesis was 0.53, and for feldspars 0.66. The roundness of detrital quartz grains is 0.5–0.7, while that of feldspars and igneous quartz is 0.1–0.2. It was found that the permeability coefficient is lower for filtration through feldspar and calcite samples than for filtration through detrital quartz particles. The permeability coefficient of feldspar and calcite samples is 10–30% of the permeability coefficient of detrital quartz samples. The permeability coefficients of igneous quartz samples are lower than those of detrital quartz and feldspar samples. This is due to the different shapes of quartz, feldspar, and calcite particles in the rock matrix. Mixtures of detrital quartz grains were also studied. It was found that for two-component mixtures, the permeability coefficient of the mixture decreased with an increase in the standard deviation of the grain size. The conducted studies can contribute to the prediction of permeability values based on the known granulometric analysis of rocks and the analysis of the shape of mineral grains. The conducted studies were carried out by the author of this article.

Keywords: permeability coefficient, nonlinear dependencies, grain, quartz, feldspar, calcite, fractions

Введение

Фильтрационно-емкостные и иные свойства терригенных пород коллекторов нефти и газа главным образом определяются содержанием в породе кварца, полевых шпатов и карбонатных минералов. Исследование газопроницаемости пород коллекторов остается актуальной задачей. Количество измеряемых литологических пара-

метров, оказывающих влияние на проницаемость, может измеряться десятками, и учет их – сложная задача, поэтому возможно выделить один из основных параметров – гранулометрический состав пород [1].

Согласно исследованию, была описана возможность использования гранулометрического состава на количественном уровне для моделирования петрофизических

свойств, в том числе и проницаемости [2]. Газопроницаемость образцов кварца закономерно снижается с уменьшением размера зерен по квадратичному закону [3]. Известно, что на проницаемость пород влияет форма частиц. Разные минералы могут обладать разной формой частиц.

Цели настоящего исследования: провести оценку значений параметров фильтрации газа через зерна полевых шпатов, кальцита и кварца обломочного и магматического генезиса, определить параметры фильтрации для смесей обломочного кварца.

Материалы и методы исследования

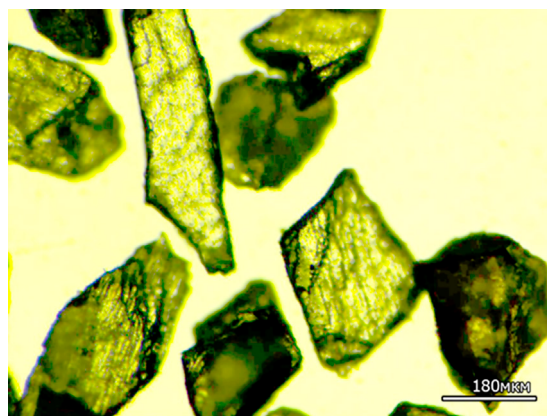
В данной работе использовались кюветы, выполненные из оргстекла, с внутренним отверстием, заполняемым изучаемыми зернами полевых шпатов, кальцита и кварца размером частиц 40–63 мкм, 45–63 мкм, 63–80 мкм, 80–106 мкм, 106–125 мкм, 125–150 мкм и менее 40 мкм. Калиевый полевой шпат был представлен образцом амазонита, а щелочной полевой шпат – образцами альбита и олигоклаза. Образцы обломочного кварца – кварцевый песок – отобраны на Чапаевском месторождении. Кварц магматического генезиса – низкотемпературный кварц – отобран в Свердловской области. Образец кальцита исландского шпата отобран на Водинском месторождении. Образцы истирали в агатовой ступке и просеивали через серию сит с размером ячеек 40, 45, 63, 80, 106, 125, 150 мкм на виброустановке. Размер, форма – окатанность и сферичность зерен – изучались по микрофото, полученному на микроскопе марки «Альтами» (рисунк). Для расчета проницаемости может применяться выражение:

$$k = d^2 / 96 \sigma \quad [4],$$

где d – диаметр зерен с идеальной сферической поверхностью;

σ – коэффициент, зависящий от открытой пористости материала и меняющийся в зависимости от укладки зерен друг относительно друга.

Проницаемость определяется величиной пористости и просветности между сферическими зернами фиктивного грунта. Однако очевидно, что реальные зерна, имеющие форму с определенной окатанностью или наличием угловатости и менее сферичные, будут обладать иной просветностью, расположением поровых каналов. В итоге проницаемость будет зависеть и от формы частиц, слагающих породу, и от их взаимного расположения.



Микрофотография зерен плагиоклаза фракции 150 мкм

Экспрессным визуальным методом определения сферичности и окатанности является диаграмма Крумбьена-Шлосса, используемая для исследования формы зерен алюмосиликатных проппантов. Зерна кварца, полевых шпатов имеют ширину, длину, высоту по осям x , y , z . Размеры по длине и ширине ограничиваются периметром ячейки сита и несколько отличаются друг от друга. В работе были измерены размеры 154 зерен полевых шпатов, кварца. Размер зерен по оси z составил от 0,8 до 2,15 от размера длины или ширины. Формы выделения преимущественно полигональная, уплощенная, треугольная, ромбическая неправильно изометричная, овальная.

Сферичность зерен кварца по диаграмме Крумбьена-Шлосса составила 0,53, а для полевых шпатов – 0,66. Окатанность зерен обломочного кварца из кварцевого песка – 0,5–0,7, для магматического кварца – 0,1–0,2, для полевых шпатов – 0,1–0,2. Эквивалентный диаметр зерен для зерен КППШ составил 1,28. Окатанность зерен – это один из показателей их формы, она изучалась в исследовании авторов [5].

В ходе исследования изучались фракции полевых шпатов, кварца и кальцита. Также изучались смеси кварца при размере зерен, равном 102–122 мкм, и среднеквадратичном отклонении размера зерен от 18 до 77 мкм.

Связи между расходом газа и перепадом давления могут быть представлены линейным законом Дарси. В случае течения газа при высоких градиентах давления закон Дарси не выполняется, и можно использовать нелинейные законы Форхгеймера [6] или Дарси-Форхгеймера [7].

В [8] приводятся данные, что коллекторские свойства снижаются в случаях возрастания контактности обломков между собой,

их упаковки. Установлена корреляция проницаемости и содержания породообразующих минералов кварца и полевых шпатов, в отличие от глинистого материала.

В настоящем исследовании получены степенные связи $Q = k\Delta p^n$, которые ранее применялись автором в работе [9], где Q – расход газа, Δp – перепад давления. Также рассчитывали коэффициенты проницаемости и расход газа при давлении 1 атм. Исследования выполнены на фильтрационной установке по определению газопроницаемости «Дарсиметр». Оценку значений показателей фильтрации проводили по газопроницаемости, расходу газа при давлении 1 атм, зависимости расхода газа от давления $Q = k\Delta p^n$.

Определяли изменения показателей фильтрации для двухкомпонентных, трехкомпонентных, четырехкомпонентных, семикомпонентных смесей зерен обломочного кварца в зависимости от среднеквадратичного отклонения размера зерен. Устанавливали, как меняется проницаемость для фракций менее 40 мкм для зерен полевых шпатов, кальцита, кварца.

Результаты исследования и их обсуждение

Рассмотрим полученные результаты.

В зависимости $Q=f(\Delta p)^n$ для фракции более 106 мкм (табл. 1, строки 1–2) показатель степени для калиевого полевого шпата (КПШ) несколько выше, чем для обломочного кварца, и n составил 0,705. Расход газа для этого интервала размера частиц более 106 мкм при давлении 1 атм для обломочного кварца на 33% выше, чем у калиевого полевого шпата, а величина проницаемости для кварца на 33% выше.

Для фракций обломочного кварца и КПШ более 63 мкм показатель степени в зависимости $Q=f(\Delta p)^n$ для КПШ выше, чем для кварца (табл. 1). Расход газа для КПШ в 3,5 раза ниже, чем для обломочного кварца, а проницаемость ниже в 3,65 раза. Для фракции более 45 мкм показатель степени n в зависимости $Q=f(\Delta p)^n$ для КПШ выше, чем для обломочного кварца, на 0,1, Расход газа в 3,8 раза меньше, чем для кварца, а коэффициент фильтрации меньше в 4,1 раза.

Таблица 1

Зависимость $Q=f(\Delta p)^n$, расход газа, коэффициент проницаемости k полевых шпатов, кварца и кальцита

№	Описание образца	$Q=f(\Delta p)^n$	Расход, см ³ /с, при P=1 атм.	К, Д
1	Кварц обломочный более 106 мкм, менее 125 мкм	$10^{-8}x^{0,703}$	64	4
2	Калиевый полевой шпат (КПШ) более 106 мкм, менее 125 мкм	$10^{-8}x^{0,705}$	50	3,09
3	Кварц обломочный более 63 мкм, менее 45 мкм	$7*10^{-10}x^{0,907}$	45,2	2,79
4	КПШ более 63 мкм, менее 45 мкм	$10^{-10}x^{0,95}$	13	0,76
5	Кварц обломочный более 45 мкм, менее 63 мкм	$7^{-10}x^{0,906}$	32	2,15
6	КПШ более 45 мкм, менее 63 мкм	$3*10^{-11}x^{1,05}$	8,4	0,52
7	Кварц обломочный менее 40 мкм	$2*10^{-8}x^{0,39}$	2,5	0,15
8	КПШ менее 40 мкм	$10^{-7}x^{0,206}$	1,94	0,1
9	Плагиоклаз более 125 мкм, менее 150 мкм	$10^{-8}x^{0,705}$	63	3,44
10	Плагиоклаз более 80 мкм, менее 125 мкм	$5*10^{-10}x^{0,82}$	9,6	0,54
11	Плагиоклаз более 63 мкм, менее 60 мкм	$2*10^{-10}x^{0,85}$	4,7	0,27
12	Плагиоклаз более 45 мкм, менее 63 мкм	$10^{-7}x^{0,188}$	1,86	0,11
13	Кварц обломочный более 80 мкм, менее 63 мкм	$5*10^{-9}x^{0,77}$	53	3,27
14	Кальцит более 125 мкм, менее 150 мкм	$3*10^{-10}x^{0,92}$	20	1,22
15	Кальцит более 80 мкм, менее 125 мкм	$3*10^{-9}x^{0,77}$	17	1,04
16	Кальцит более 63 мкм, менее 80 мкм	$2*10^{-10}x^{0,85}$	4,7	0,27
17	Кальцит менее 40 мкм	$2*10^{-7}x^{0,166}$	2	0,13
18	Кальцит менее 63 мкм	$10^{-7}x^{0,23}$	2,05	0,131
19	Кварц более 63 мкм магматический	$2*10^{-12}x^{1,29}$	8,6	0,42
20	Кварц более 45 мкм магматический	$7*10^{-10}x^{0,713}$	4,3	0,23

Рассмотрим изменение показателя степени n в зависимости $Q=f(\Delta p)^n$ от размера зерен для изученных минералов. Для КППШ при уменьшении размера зерен от 106 мкм до 45 мкм показатель степени n изменяется от 0,705 до 1,05. Для плагиоклазов при уменьшении размера зерен от 125 мкм до 63 мкм показатель степени n изменяется от 0,705 до 0,85. Для обломочного кварца изменение размера зерен от 106 мкм до 45 мкм привело к возрастанию n от 0,703 до 0,906. Для кальцита изменение размера зерен от 125 мкм до 63 мкм привело к снижению показателя степени n от 0,92 до 0,85.

Фильтрация через фракции 80 мкм обломочного кварца, плагиоклаза, кальцита показала, что расход газа через обломочный кварц существенно выше, чем через другие минералы. Расход газа через плагиоклаз в 5,5 раза ниже, чем для обломочного кварца, а проницаемость ниже в 6 раз. Расход газа через кальцит в 3,1 раза меньше, чем для обломочного кварца, а проницаемость меньше в 3 раза.

Для фракции менее 40 мкм показатель степени n для обломочного кварца почти в 2 раза отличается от значения для КППШ, и n для КППШ составило 0,206. Газопроницаемость для КППШ в 1,5 раз ниже, чем для обломочного кварца, а расход ниже

в 1,3 раза. Этот параметр для КППШ, обломочного кварца и кальцита фракции менее 40 мкм резко падает до значений 0,1–0,15. Фильтрация газа через образцы магматического кварца фракций 63 и 45 мкм показала, что проницаемость этих образцов ниже, чем проницаемость образцов обломочного кварца, КППШ, она составила 0,42 Д и 0,27 Д соответственно.

Фильтрация через зерна фракции размером 63 мкм плагиоклаза или кальцита выявила, что расход для этих компонентов почти в 10 раз меньше, чем для обломочного кварца. Газопроницаемость КППШ в 10 меньше, для чем для обломочного кварца. Для фракции 80 мкм плагиоклаза расход флюида в 5 раз меньше, чем для обломочного кварца, а проницаемость в 6 раз меньше. Для фракции 80 мкм кальцита проницаемость в 3 раза меньше, чем для обломочного кварца. Для фракции 45 мкм плагиоклаза проницаемость в 5 раз ниже, чем для обломочного кварца. Для фракции менее 40 мкм показатель n снижается до 0,4–0,2.

Были рассмотрены исследования смесей фракций обломочного кварца при разном количестве фракций и разных значениях среднеквадратичного отклонения и матожидании размера зерен – M (табл. 2).

Таблица 2

Коэффициент проницаемости – k , зависимость $Q=f(\Delta p)^n$,
среднеквадратичное отклонение размера зерен σ ,
матожидание – M , мкм, образцов кварца

№	Описание образца	$Q=f(\Delta p)^n$	Расход газа, см ³ /с	k , Д	σ , мкм	M , мкм
1	Смесь 80 мкм + 125 мкм (50% + 50%)	$10^{-8} x^{0,69}$	57	3,59	22,5	102
2	Смесь 63 мкм + 150 мкм (50% + 50%)	$5 \cdot 10^{-9} x^{0,77}$	47,6	2,98	43	106
3	Смесь 45 мкм + 200 мкм (50% + 50%)	$2 \cdot 10^{-9} x^{0,81}$	32	1,97	77	122
4	Смесь 80 мкм + 106 мкм + 125 мкм (33% + 33% + 33%)	$10^{-8} x^{0,82}$	81	4,7	18	103
5	Смесь 63 мкм + 106 мкм + 150 мкм (33% + 33% + 33%)	$3 \cdot 10^{-9} x^{0,80}$	52,6	3,25	35	105
6	Смесь 45 мкм – 63 мкм – 150 мкм – 200 мкм (25% + 25% + 25% + 25%)	$6 \cdot 10^{-9} x^{0,74}$	43	2,65	63	114
7	Смесь 45 мкм, 63 мкм, 80 мкм, 106 мкм, 125 мкм, 150 мкм, 200 мкм (14% + 14% + 14% + 14% + 14% + 14% + 14%)	$2 \cdot 10^{-9} x^{0,81}$	44,6	2,79	51	107
8	Смесь 150 мкм – 5% + 125 мкм – 5% + 106 мкм – 20% + 10 мкм – 70%	$2 \cdot 10^{-8} x^{0,4}$	2,64	0,17	–	–
9	Смесь 150 мкм – 5% + 125 мкм – 5% + 40 мкм – 40% + 10 мкм – 50%	$4 \cdot 10^{-9} x^{0,49}$	2	0,12	–	–

Для двухкомпонентных смесей фракций обломочного кварца при увеличении среднеквадратичного отклонения σ от 18 мкм до 77 мкм газопроницаемость снижается от 3,59 Д до 1,97 Д, а расход – от 57 до 32 см³/с (табл. 2). Для трехкомпонентной смеси при $\sigma = 35$ мкм проницаемость снижается до 3,25 Д, а для четырехкомпонентной при $\sigma = 63$ мкм проницаемость составила 2,65 Д.

Для семикомпонентной смеси при $\sigma = 51$ мкм проницаемость составила 2,79 Д.

Для многокомпонентных смесей № 8, № 9 (табл. 2), содержащих от 50 до 70% фракции кальцита менее 10 мкм, проницаемость составила 0,17 Д и 0,12 Д.

Заключение

На образцах полевых шпатов, кальцита, кварца в диапазоне размера частиц от 45 до 125 мкм и меньше 40 мкм рассчитаны зависимости расхода газа от перепада давления $Q=f(\Delta p)^n$, коэффициенты проницаемости k , расходы газа для давления 1 атм. Выявлено, что во всех образцах КПШ и плагиоклазах проницаемость ниже, чем для моделей обломочного кварца, в 3,5–10 раз. Расходы газа через образцы полевых шпатов для давления 1 атм ниже, чем в образцах обломочного кварца, в 3,5–10 раз. При снижении размера частиц от 106 мкм до 45 мкм степень n в зависимости расхода газа от перепада давления для полевых шпатов возрастает с 0,7 до 1, тогда как для размера частиц меньше 40 мкм показатель степени варьирует в пределах 0,2–0,4. Фильтрация газа через образцы магматического кварца показала, что проницаемость этих образцов ниже, чем проницаемость образцов обломочного кварца и КПШ. На образцах кальциево-натриевых полевых шпатов найдено, что при снижении размера частиц от 125 до 63 мкм степень n увеличивается от 0,7 до 0,85, тогда как для размера частиц 45 мкм она становится меньше. При уменьшении размера частиц кальцита от 125 до 63 мкм обнаружено уменьшение коэффициента проницаемости k в 5 раз.

Проницаемость газа и расход газа через изученные образцы полевых шпатов и кальцита значительно ниже, чем через образцы обломочного кварца. Это объясняется разницей формы частиц кварца, полевых шпатов, кальцита. Зерна обломочного кварца окатанные. Проницаемость образцов зави-

сит от размера и формы частиц определенного минерала и их окатанности.

Исследование двухкомпонентных смесей обломочного кварца показало обратную пропорциональную зависимость среднеквадратичного отклонения размера частиц от коэффициента проницаемости.

Для размера частиц полевых шпатов и обломочного кварца менее 45–40 мкм проницаемость образцов резко уменьшается – в 20–30 раз, до значения около 0,1 Д.

Выполненные исследования могут помочь при прогнозе значений проницаемости по известному гранулометрическому анализу пород и при исследовании формы зерен минералов.

Список литературы

1. Черданцева Д.А., Кравченко Г.Г., Краснощекова Л.А. Песчаные породы Пур-Тазовской Нефтегазоносной области. Литологические особенности и их влияние на фильтрационно-емкостные параметры коллектора // Успехи современного естествознания. 2021. № 10. С. 81–88. DOI: 10.17513/use.37702.
2. Мухидинов Ш.В., Шпар А.С. Возможности моделирования петрофизических свойств терригенных пород на основе их литологической характеристики // Нефтяное хозяйство. 2024. № 3. С. 26–29. DOI: 10.24887/0028-2448-2024-3-26-29.
3. Голиков Т.А., Якушенко Т.А. Исследования влияния размера зерен на петрофизические свойства и ЯМР характеристики искусственных образцов // Сборник материалов Международной научной конференции «Интерэкспо ГЕО-Сибирь». 2021. Т. 2, № 2. С. 26–31. DOI: 10.33764/2618-981X-2021-2-2-26-31.
4. Щелкачев В.Н., Лапук Б.Б. Подземная гидравлика. Ижевск: НИЦ «Регулярная хаотическая динамика», 2001. 736 с. URL: <https://bookmix.ru/book.phtml?id=349161&ysclid=m67r167tzip67654975> (дата обращения: 13.12.2024).
5. Синицына В.М. Автоматизированный анализ структуры микротекстуры шлифа песчаника // Актуальные проблемы нефти и газа. 2019. Вып. 3(26). URL: <http://oilgasjournal.ru> (дата обращения: 18.12.2024). DOI: 10.29222/ipng.2078-5712.2019-26. art10.
6. Толпаев В.А., Ахмедов К.С., Гоголева С.А. Нелинейные законы фильтрации при больших скоростях потока // Нефть и газ. 2015. № 5. С. 83–89. DOI: 10.31660/0445-0108-2015-5-3-89.
7. Колесов А.Е., Захарова М.Н. Моделирование течения газа с применением уравнения Дарси-Форхгеймера // Вестник СВФУ. № 3. (23) 2021. С. 73–80. DOI: 10.25587/SVFU.2021.23.3.004.
8. Недоливко Н.М., Ежова А.В., Перевертайло Т.Г., Полумогина Е.Д. Влияние гранулометрического и минералогического состава на формирование коллекторских свойств песчаников пласта Ю13 Западно-Моисеевского участка Двуреченского месторождения (Томская область) // Известия Томского политехнического университета. 2004. Т. 307, № 5. С. 48–54. URL: <http://izvestiya.tpu.ru/> (дата обращения: 13.12.2024).
9. Песков А.В. Нелинейные зависимости при фильтрации газа через образцы расклинивающего материала // Успехи современного естествознания. 2022. № 11. С. 118–123. DOI: 10.17513/use.37938.