

УДК 55:549.08:622.276.5
DOI 10.17513/use.38268

НЕЛИНЕЙНЫЕ СВЯЗИ ПРИ ФИЛЬТРАЦИИ ГАЗА ЧЕРЕЗ КОМПОЗИЦИИ ГЛИНИСТЫХ МИНЕРАЛОВ И КВАРЦА

Песков А.В., Песков И.А.

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

В настоящей статье исследовалась фильтрация газа через насыпные образцы, заполненные композициями фракций кварца и глинистых минералов, таких как каолинит, монтмориллонит, хлорит и мусковит. Исследования проводились на отечественной установке «Дарсиметр» в диапазонах перепада давлений от 0,3 до 1,6 атм. Исследовались смеси фракций кварца размером 40, 63, 75, 150, 250 мкм и глинистых минералов при содержании 13, 25, 34, 50%. Для каждой композиции определен степенной закон зависимости расхода от перепада давления. Основой для полученной зависимости выбрана эмпирическая связь, которую использовали при фильтрации флюида через образцы песка. Также исследовались композиции одного и того же состава, представленные двумя образцами. В одном компоненте перемешаны хаотически, а в другом представлены слоями, в каждом из которых присутствует компонент или смесь. Для ряда образцов с большим содержанием глинистых минералов построены графики Клинкенберга для определения истинной проницаемости. Для смесей каолинита с кварцем возрастание содержания каолинита в 2–3 раза приводит к такому же снижению коэффициентов проницаемости и пропорциональности и показателя степени. Коэффициенты проницаемости и пропорциональности в смесях для кварца и монтмориллонита ориентировочно в два раза больше, чем для смесей каолинита и кварца. Исследования на образцах одинакового состава разных фракций с хаотическим распределением частиц и слоистым показали, что в образцах со слоистым расположением коэффициенты пропорциональности и проницаемости приближенно в 2 раза меньше, чем для хаотического. По ряду образцов с большой долей глины определены истинные коэффициенты проницаемости.

Ключевые слова: коэффициент пропорциональности, проницаемость, нелинейные зависимости, зерно, кварц, глинистые минералы, фракции

NONLINEAR DEPENDENCES IN GAS FILTRATION THROUGH COMPOSITIONS OF CLAY MINERALS AND QUARTZ

Peskov A.V., Peskov I.A.

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

In this article, gas filtration through bulk samples filled with compositions of quartz fractions and clay minerals such as kaolinite, montmorillonite, chlorite and muscovite was investigated. The research was carried out on the domestic Darsimeter installation in the pressure drop ranges from 0.3 to 1.6 atm. Mixtures of quartz fractions of 40 microns, 63 microns, 75 microns, 150 microns, 250 microns and clay minerals with a content of 13%, 25%, 34%, 50%. For each composition, a power law of dependence of the flow rate on the pressure drop is determined. The basis for the obtained dependence is an empirical relationship, which was used when filtering fluid through sand samples. Compositions of the same composition presented by 2 samples were also studied. In one, the components are mixed chaotically, and in the other they are represented by layers in each of which there is a component or mixture. For a number of samples with a high content of clay minerals, Klinkenberg graphs were constructed to determine the true permeability. For mixtures of kaolinite with quartz, an increase in the content of kaolinite by 2–3 times leads to the same decrease in permeability coefficients and proportionality and degree index. The coefficients of permeability and proportionality in mixtures for quartz and montmorillonite are approximately twice as large as for mixtures of kaolinite and quartz. Studies on samples of the same composition of different fractions with a chaotic particle distribution and a layered one have shown that in samples with a layered arrangement, the coefficients of proportionality and permeability are approximately 2 times less than for a chaotic one. True permeability coefficients have been determined for a number of samples with a large proportion of clays.

Keywords: proportionality coefficient, permeability, nonlinear dependencies, grain, quartz, clay minerals, fractions

Фильтрационно-емкостные свойства и многие другие физические свойства терригенных пород коллекторов нефти и газа главным образом зависят от содержания в породе глинистых минералов, их состава, свойств и распределения в объеме породы. Изучение газопроницаемости пород коллекторов остается актуальной задачей, так как этот важный параметр используется для построения гидродинамических моделей залежи углеводородов. В настоящее время имеются интересные и основательные ис-

следования газопроницаемости пород с глинистыми составляющими [1, 2]. Глинистые минералы – это сложные объекты, обладающие широкими вариациями изоморфных замещений, структурными дефектами и большим разнообразием политипных модификаций. Разновидности глинистых минералов с присущими им кристаллохимическими свойствами характерны для конкретного месторождения. Газопроницаемость пород с глинистой составляющей зависит от размера и укладки глинистых частиц

в агрегаты между собой, а также от размера и распределения зерен основного компонента-кварца. Одним из лучших методов лабораторной оценки надежности и экранирующих свойств пород-покрышек является измерение их газопроницаемости [3].

Цель исследования – определить вид степенной зависимости между расходом газа и перепадом давления на композициях фракций зерен кварца и глинистых минералов: каолинита, монтмориллонита, хлорита, мусковита при определенном их содержании. Также провести исследования для смесей одинакового состава при хаотическом и слоистом распределении компонентов. Оценить, как будут различаться параметры фильтрации газа при хаотическом распределении компонентов и слоистом. Для ряда образцов с большим содержанием глинистых минералов определить истинную проницаемость с учетом скольжения газа при использовании графика Клинкенберга.

Материалы и методы исследования

В данной работе используются искусственные образцы зерна с заданным содержанием и размером частиц кварца и глинистых минералов, позволяющих установить изменение фильтрационных свойств при изменении перепада давления. Зерна кварца представляют собой частицы оваловидной или полигональной формы, имеющие разный размер по длинной и короткой оси. Под глинистостью пород понимают наличие в породе минералов размером менее 10 мкм. В этой фракции находятся частицы глинистых минералов (алюмосиликатов), кварц, полевой шпат, карбонаты, сульфаты. Размер частиц глины меняется от 0,1 до 4 мкм. Содержание глинистых минералов варьирует от 13 до 50% в смеси. Проницаемость пород с глинистыми компонентами может зависеть от агрегатной текстуры компонентов. В исследовании образцы глинистых минералов были представлены диоктаэдрическим монтмориллонитом $(\text{Na,Ca})_{0,33}(\text{Al,Mg})_2(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, клинохлором $\text{Mg}_5\text{Al}(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_8$, мусковитом $\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$, каолинитом. Зависимости между расходом газа и перепадом давления могут быть представлены линейным законом Дарси или нелинейными законами Форхгеймера и Барри-Конвея [4]. В данном исследовании определялись степенные связи $Q = k_c \Delta p^n$, где n может принимать значение в пределах от 1 до 0,5 [5, 6], Q – расход газа, Δp – перепад давления.

Исследования проводили с использованием установки «Дарсиметр».

Результаты исследования и их обсуждение

Исследование проведено в текущий год. Диапазон изменения проницаемости от самой максимальной к минимальной варьирует от 0,03 до 2,41. Минимальной проницаемостью обладают образцы кварца фракции 10 мкм, 20 мкм, смеси кварца фракции 20 мкм и каолинита образцов № 21, 22. В работе рассчитывался коэффициент проницаемости и число Рейнольдса для образцов, заполненных частицами размером 63 мкм. Коэффициент проницаемости составил $2,8-3,1 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$. Число Рейнольдса по Щелкачеву варьировало от 3 до 8. Тогда как критическое значение числа Рейнольдса [6] изменяется от 1 до 12. Для данного размера частиц показатель числа Рейнольдса находится на границе, когда возможно использовать линейный закон Дарси с учетом определенной погрешности либо применять нелинейный закон. Степенной закон связи расхода газа от перепада давления имел вид $6 \cdot 10^{-10} x^{0,905}$. Для ряда изучаемых образцов с диаметром зерен 63, 75, 150, 250 мкм показатели степени зависимости расхода газа от перепада давления варьируют от 0,45 до 1,1. Это обусловлено как размером частиц основного компонента кварца, так и количеством глинистой составляющей и ее видом: каолинитом, монтмориллонитом, хлоритом-клинохлором и мусковитом. Для образца смеси кварца размером частиц 250–300 мкм и 13% каолинита степенная зависимость имела вид $17,1x^{0,52}$. Показатель степени этой зависимости близок к показателю для образца кварца с таким же размером зерен без примеси каолинита [7]. С увеличением содержания каолинита с 13 до 30% в смесях каолинита и кварца фракции 63 мкм показатель степени зависимости снижается от 0,82 до 0,25. Коэффициент проницаемости снижается от 0,38 до 0,1 Д. Далее исследовались смеси кварца фракции 63 мкм и монтмориллонита при его содержаниях: 13, 20, 30, 50%. В смесях использовались две кристаллохимические разновидности монтмориллонита: монтмориллонит 1 и монтмориллонит 2. С увеличением содержания монтмориллонита 1 от 13 до 50% показатель степенной зависимости снижается от 0,75 до 0,45, коэффициент пропорциональности k_c уменьшается с 6,4 до 1,9, а коэффициент проницаемости снижается с 0,58 до 0,18 Д.

Таблица 1

Параметры фильтрационных зависимостей образцов, состоящих из смеси фракции кварца и глинистой компоненты

№	Описание смеси	$Q = k_c(\Delta p)^n$	Коэффициент проницаемости k , м ² при $P = 1$ атм
1	87% 63 мкм кварца + 13% каолинита	$4,2x^{0,74}$	0,38
2	87% 63 мкм кварца + 13% каолинита	$3,9x^{0,83}$	0,35
3	63 мкм кварц	$17,1x^{0,77}$	2,41
4	75% 63 мкм кварц + 25% каолинита	$1,84x^{0,49}$	0,16
5	70% 63 мкм кварца + 30% каолинита	$1,2x^{0,25}$	0,1
6	87% 150 мкм кварца + 13% каолинита	$5,9x^{1,09}$	0,86
7	87% 250-300 мкм кварца + 13% каолинита	$17,1x^{0,52}$	1,65
8	87% 63 мкм кварца + 13% монтмориллонита 1	$6,4x^{0,75}$	0,58
9	87% 63 мкм кварца + 13% монтмориллонита 2	$12,54x^{0,83}$	1,2
10	80% 63 мкм кварц + 20% монтмориллонит 2	$4,2x^{0,8}$	0,42
11	70% 63 мкм кварца + 30% монтмориллонита	$3,4x^{0,67}$	0,31
12	Смесь 50% кварца – 75 мкм + 50% монтмориллонита 1	$1,9x^{0,45}$	0,18
13	87% кварца 75 мкм + 13% клинохлора	$16,1x^{0,84}$	1,51
14	70% кварца 75 мкм + 30% клинохлора	$11,1x^{0,72}$	1,04
15	70% 63 мкм кварц + 30% доломита	$3,2x^{0,64}$	0,30
16	87% 63 мкм кварца + 13% доломита	$8,97x^{0,82}$	0,76
17	75% мкм кварц + 25% доломита	$3,89x^{1,033}$	0,37
18	100% монтмориллонит	$0,91x^{-0,179}$	0,07
19	50% каолинит + 50% 75 мкм кварц	$0,95x^{-0,179}$	0,1
20	25% каолинит + 75% 75 мкм кварц	$1,27x^{0,0047}$	0,1
21	20 мкм кварц	$1,055x^{-0,088}$	0,03
22	10 мкм кварц	$1,01x^{-0,122}$	0,03
23	более 20 мкм кварц	$2,91x^{0,55}$	0,01
24	9 мкм Al_2O_3	$0,957x^{-0,167}$	0,08
25	66% 20 мкм кварц + 34% каолинита	$0,98x^{-0,18}$	0,03
26	80% кварца 40 мкм + 20% каолинита	$1,04x^{-0,143}$	0,1
27	87% кварца 40 мкм + 13% каолинита	$1,4x^{0,175}$	0,11

Таблица 2

Параметры фильтрационных зависимостей образцов со слоистыми компонентами

№	Описание	$Q = k_c(\Delta p)^n$	Коэффициент проницаемости, м ² при 1 атм
28	Слой смеси (75% 63 мкм кварца + 25% монтмориллонита) и слой 35% монтмориллонита	$1,35x^{0,13}$	0,13
29	Слой 34% кварца 75 мкм и слой 66% монтмориллонита – (толщиной 13 мм)	$1,77x^{0,33}$	0,16
30	Слой 65% кварца 75 мкм + слой 35% кварца 5 мкм	$1,66x^{0,26}$	0,14
31	Состав тот же, что и в образце 30 – фракции 5 мкм и 75 мкм кварца перемешаны	$2,77x^{0,55}$	0,24
32	Слой смеси из 63% кварца 63 мкм и 37% каолинита и слой 10% каолинита	$3,2x^{-0,74}$	0,44
33	Слой смеси (63% кварца 63 мкм + 37% каолинита) и слой 30% каолинита	$1,01x^{-0,126}$	0,15
34	Слой 75% кварца 75 мкм + слой 25% мусковита	$3,79x^{0,75}$	0,34
35	Состав тот же, что в образце 34. Фракции кварца и мусковита перемешаны	$7,6x^{0,85}$	0,7

Таблица 3

Линейные зависимости, полученные при аппроксимации кривых Клинкенберга, и истинная проницаемость К

№ образца	Линейная зависимость $k = f(1/\Delta P_{ср})$	К – истинная проницаемость
Эталон корунда 5 мд	$0,63x+4,57$	4,573
3	$1,99x+0,33$	0,328
5	$0,55x+0,086$	0,087
21	$0,0232x+0,0368$	0,368
22	$0,022x+0,037$	0,369
25	$0,02x+0,038$	0,038

В сравнении со смесью кварца и каолинита смесь с монтмориллонитом обладает большими значениями коэффициента проницаемости и пропорциональности – приблизительно в 3 раза большими. В смесях кварца фракции 63 мкм с доломитом 13, 25, 30% также наблюдается снижение величин коэффициента проницаемости и коэффициента пропорциональности. При увеличении содержания доломита показатель степени зависимости расхода газа от перепада давления снижается с 1 до 0,64. Изучалось влияние диаметра частиц кварца в смесях с одинаковым содержанием каолинита 13%. При изменении диаметра зерен от 63 к 150 мкм и далее до 250 мкм коэффициент проницаемости повышается от 0,38 до 1,65 Д. Коэффициент пропорциональности k_c в степенной зависимости $Q = k_c p^n$ (табл. 1) повышается от 3,9 до 17,1. Для образца 1 определялась относительная погрешность коэффициента проницаемости, которая составила не более 10% для семи повторных исследований. Далее были проведены опыты на образцах со значительной долей глинистой компоненты. Для образцов, представленных 100% содержанием монтмориллонита – образец 18 и смесью 50% каолинита и кварца 75 мкм – образец 19 коэффициенты пропорциональности k_c близки соответственно 0,95 и 0,91, коэффициенты проницаемости 0,07 и 0,1 Д имеют низкие значения. Показатель степени в зависимости расхода газа от перепада давления для обоих образцов имеет значение -0,179. Близкие значения коэффициента пропорциональности и показателя степени имеет образец 25 смеси кварца фракции 20 мкм и каолинита. Для образцов кварца 10 и 20 мкм показатель степени в зависимости имеет значение -0,122 и -0,088, а коэффициент пропорциональности 1,05 и 1,01 при коэффициенте проницаемости 0,03 Д. Далее

проводились исследования по определению проницаемости в образцах имеющих двухслойное строение с прослоем тонкодисперсного материала – каолинита, монтмориллонита, гидрослюды, тонкодисперсного кварца и слоя кварца фракций 63–75 мкм. Так, образец 32 состоит из двух слоев: из каолинитового толщиной 6 мм и слоя смеси кварца фракции 63 мкм и каолинита. В образце 33 каолинитовый слой имеет толщину в 3 раза большую, чем слой в образце 32. Поэтому коэффициенты пропорциональности и проницаемости образца 33 в 3 раза меньше, чем для образца 32, а показатель степени изменяется от -0,74 до -0,126. Образцы 34 и 35 представлены одинаковым составом веществ 25% мусковита и кварцем. В образце 35 эти составляющие равномерно перемешаны, а в образце 34 имеются два слоя – с чистым кварцем и с мусковитом. Коэффициент проницаемости и пропорциональности образца 34 со слоистым расположением веществ в 2 раза ниже, чем для образца 35. В образцах 28 и 29 имеются прослой с монтмориллонитом, и в образце 29 этот слой в 2 раза больше, чем в 28 образце. Слой в 29 образце состоит из чистого кварца, а в 28 образце в слое кварца присутствует 25% монтмориллонита. Коэффициенты пропорциональности и проницаемости для 28 образца на 25% меньше, чем для образца 29. В образцах 30 и 31 содержатся две фракции кварца размером частиц 5 мкм при содержании 35% и фракция кварца 75 мкм. Однако в образце 31 обе фракции равномерно распределены друг относительно друга, а в образце 30 имеются два отдельных слоя, состоящих из фракции 5 мкм и фракции 75 мкм. Коэффициенты пропорциональности и проницаемости образца 31 с хаотическим распределением фракций в 1,7 раза больше, чем для образца 30 со слоистым распределением фракций.

Показатель степени в зависимости расхода газа от перепада давления в образце 31 больше, чем в образце 30, в 2,1 раза. Для ряда образцов с большой долей глинистого вещества находилась истинная проницаемость по графикам Клинкенберга [7]. Графики Клинкенберга – это зависимости кажущейся проницаемости от обратной величины среднего давления (табл. 3). Полученные значения истинной проницаемости сопоставимы с данными, полученными при перепаде давления 1 атм.

Заключение

Изучена газопроницаемость композитных смесей, состоящих из фракции кварца 63, 75, 150, 300 мкм и глинистых минералов. С увеличением содержания глинистых минералов в смеси с кварцем фильтрационные параметры: коэффициенты проницаемости, пропорциональности и показатель степени – снижаются в зависимости от перепада давления. В частности, для смесей каолинита с кварцем возрастание содержания каолинита в 3 раза приводит к такому же снижению коэффициентов проницаемости и пропорциональности. Коэффициенты проницаемости и пропорциональности в смесях для кварца и монтмориллонита ориентировочно в 2 раза выше, чем для смесей каолинита и кварца. Для образцов смесей хлорита и кварца коэффициенты проницаемости и пропорциональности ориентировочно в 4 раза выше, чем для смесей каолинита и кварца. Данные фильтрационные показатели получены для конкретных глинистых минералов в данном исследовании. С увеличением размера зерен кварца в определенное число раз в смеси

с каолинитом приближенно увеличиваются во столько же раз коэффициенты пропорциональности и проницаемости. Показатель степени для последних зависимостей расхода газа от перепада давления снижается. Опыты на образцах одинакового состава разных фракций с хаотическим и слоистым распределением частиц показали, что в образцах со слоистым расположением коэффициенты пропорциональности и проницаемости приближенно в 2 раза меньше, чем для хаотического. По ряду образцов с большой долей глин определены истинные коэффициенты проницаемости.

Список литературы

1. Михалкина О.Г., Семёнов Е.О., Коновалов В.А. Влияние глинистых минералов на газопроницаемость пород-коллекторов дагинской свиты Охотской нефтегазоносной провинции (шельф о. Сахалин) // Вести газовой науки. 2018. № 5 (37). С. 72–80.
2. Чувилин Е.М., Гребенкин С.И., Жмаев М.В. Влияние гидрато- и льдообразования на газопроницаемость песчаных пород // Вести газовой науки. 2018. № 3 (35). С. 264–270.
3. Троицкий В.М., Рассохин С.Г., Соколов А.Ф., Мизин А.В., Ваньков В.П., Рассохин А.С. О результатах исследования фильтрационных свойств пористых сред с ультранизкой газопроницаемостью // Вести газовой науки. 2021. № 2 (47). С. 118–124.
4. Толпаев В.А., Ахмедов К.С., Гоголева С.А. Нелинейные законы фильтрации при больших скоростях потока // Нефть и газ. 2015. № 5. С. 83–89.
5. Щелкачев В.Н., Лапук Б.Б. Подземная гидравлика. Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. 736 с.
6. 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.
7. Песков А.В. Особенности измерения абсолютной проницаемости горных пород // Вестник Самарского государственного технического университета. 2020. Т. 28, № 2. С. 73–81.