

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СТРУКТУРЫ ПОРОВОГО ПРОСТРАНСТВА

А. Ф. Богомолова, Н. А. Орлова

(Москва)

При изучении многих физических явлений и процессов (фильтрация, диффузия, конденсация и т. п.), происходящих в пористых средах, приходится вводить в рассмотрение структуру порового пространства.

В современной литературе для характеристики структуры порового пространства используются понятия размера, радиуса, формы пор, которым даются различные определения [1-6].

Ниже делается попытка подойти к изучению строения порового пространства путем статистического анализа степени сближения частиц твердой фазы. В качестве характеристики структуры предлагается использовать функцию плотности распределения расстояний между стенками пор $F(l)$.

Расстояние l между стенками пор рассматривается как случайная величина, равная длине отрезка прямой между любыми двумя точками, расположенными на поверхности твердой фазы таким образом, что указанный отрезок имеет с твердой фазой общими только эти две точки. Функция плотности распределения $F(l)$ позволяет установить связь между возможными значениями l и соответствующими им вероятностями.

Определение функции $F(l)$ может быть произведено с большой степенью точности при увеличении общего числа измерений l . Для практических целей достаточно ограничиться таким числом измерений, которое обеспечит воспроизводимость кривой плотности распределения, найденной при условии, что порядок измерения носил случайный характер и возможность повторных замеров была исключена.

Рассмотрим вначале однородное изотропное пористое тело зернистого строения, плоское сечение которого схематически изображено на фиг. 1. Для однородного изотропного пористого тела все сечения равнозначны и строение пор в любом сечении статистически одинаково. Поэтому для изотропного пористого тела измерение расстояний l может проводиться между контурами частиц твердой фазы в любой плоскости, секущей тело.

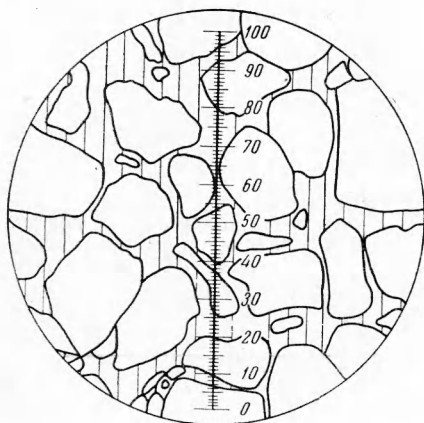
Закон распределения $F(l)$, определенный в этом случае на основании измерения величины l в плоском сечении, будем принимать за закон распределения этой величины по объему.

Измерение расстояний l между контурами частиц в плоском сечении производится на плоских шлифах и на аншлифах пористого тела при помощи окулярной шкалы микроскопа или на фотографиях их при помощи обычной масштабной линейки.

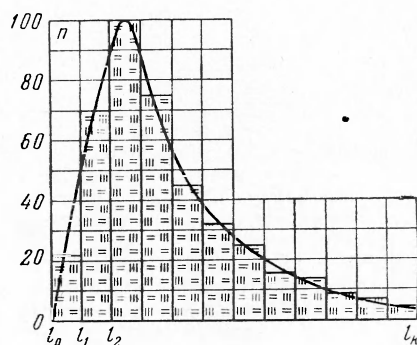
§ 1. Измерение расстояний между контурами частиц в плоском сечении и построение кривой плотности распределения. Для нахождения закона распределения можно измерять l между любой случайной парой точек на стенках пор, лишь бы число измерений обеспечило воспроизводимость кривой распределения. Однако для того чтобы исключить возможность повторных замеров одного и того же расстояния, методически удобнее производить измерение l вдоль параллельных прямых любого случайного направления, лежащих в плоскости шлифа. При этом плотность расположения линий не имеет значения, так как точность кривой распределения зависит лишь от общего числа замеров.

Проведем мысленно в плоскости сечения породы (в плоскости шлифа) произвольную систему параллельных прямых, для удобства равноотстоящих одна от другой, и будем последовательно при помощи окулярной шкалы измерять расстояния между контурами зерен вдоль этих прямых так, как это показано на фиг. 1. Охват измерением всей площади шлифа достигается параллельным перемещением шлифа.

Обработку результатов измерения удобно проводить одновременно с процессом измерения следующим образом. Разобьем весь диапазон L возможных значений l , выраженный в целых делениях окулярной шкалы, на k интервалов одинаковой величины $\Delta l = l_1 - l_0 = l_2 - l_1 = \dots = l_i - l_{i-1} = \dots = l_k - l_{k-1}$ и будем только фиксировать факт попадания l в интервал $l_i - l_{i-1}$. Для определенности правый конец интервала будем относить к данному интервалу, а левый — к предыдущему.



Фиг. 1



Фиг. 2

При этом левый конец первого интервала следует исключить из рассмотрения и учитывать только $l > 0$. Таким образом, в i -й интервал попадут все значения l , удовлетворяющие условию

$$l_{i-1} < l \leq l_i$$

Пусть на фиг. 2 одно деление по оси x соответствует величине выбранного интервала Δl , а одно деление по оси y соответствует Δn измеренных значений l . Результаты каждого замера в делениях окулярной шкалы будем фиксировать в соответствующем квадрате сетки в виде черточки таким образом, чтобы каждая клетка содержала только Δn измерений (черточек), как это показано на фиг. 2, где $\Delta n = 10$.

При таком способе записи происходит постепенное построение гистограммы в координатах $n = f(l)$ (l — в делениях окулярной шкалы), которую нетрудно перестроить в координатах



Фиг. 3

$$\frac{n}{N\Delta l} = f_1(l) \quad (N = \sum n)$$

с соответствующим пересчетом Δl и l в линейные единицы метрической системы.

Кривая, проведенная через середины вершин прямоугольников гистограммы, представляет собой статисти-

ческую кривую $F(l)$ плотности распределения расстояний между частями твердой фазы изотропного пористого тела.

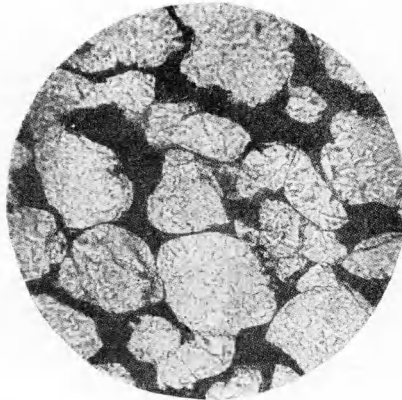
Для характеристики структуры порового пространства анизотропных пористых тел надо построить кривые распределения расстояний соответственно осям анизотропии, т. е. для плоскостей, секущих пористое тело перпендикулярно этим осям.

§ 2. Распределение расстояний между зернами в песчаниках. Пользуясь изложенным способом были построены гистограммы и статистические кривые распределения расстояния между зернами для ряда образцов песчаников, взятых из продуктивных горизонтов нефтяных месторождений. При этом



оказалось удобным полагать $\Delta n = 10$, а $\Delta l = 1$ делению окулярной шкалы. Все измерения проводились при одном и том же увеличении микроскопа (одно деление окулярной шкалы микроскопа = 8.6μ), поэтому для сравнительной характеристики распределения достаточно пользоваться кривыми $n/N = f_2(l)$.

Фиг. 4 а



Фиг. 4 б

Было установлено, что для получения воспроизводимых результатов вполне достаточно произвести порядка 1000 замеров на одном шлифе, о чем свидетельствует кривая распределения, построенная для случаев $N = 425$ и $N = 846$ и приведенная на фиг. 3. Увеличение количества замеров более 1000 не целесообразно, так как не приводит к изменению и уточнению характера кривой распределения.

Полученные гистограммы или кривые распределения позволяют определить наиболее существенные характеристики закона распределения, выражаемые конкретными числовыми параметрами: среднеарифметическим

$$l_s = \frac{1}{N} \sum n_i l_i$$

модальным (наиболее вероятным) l_m , соответствующим максимуму кривой, и максимальным L значениями расстояний между зернами, а также дисперсией

$$D = \frac{1}{N} \sum (l_i - l_s)^2$$

Указанные параметры, определенные для разных шлифов одного и того же образца породы при различной цене деления окулярной шкалы

микроскопа совпадали в пределах ошибки измерения, равной ± 0.5 делений окулярной шкалы.

По существу эти параметры и надо рассматривать как структурные параметры порового пространства, которые позволяют количественно характеризовать структуру пористых тел.

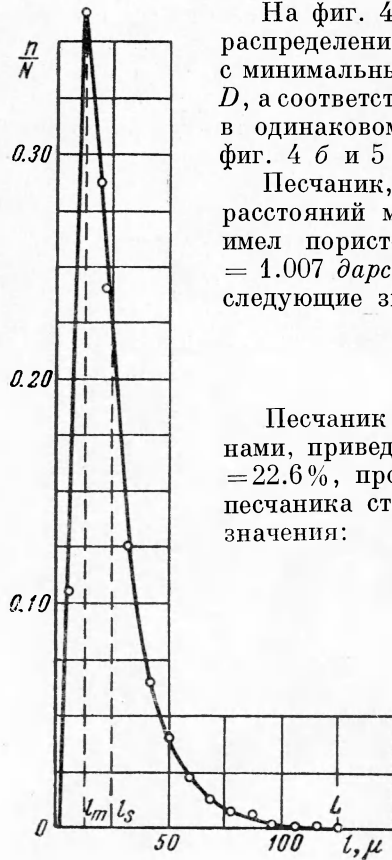
На фиг. 4 а и 5 а приведены статистические кривые распределения расстояний между зернами песчаников с минимальным и максимальным значениями дисперсии D , а соответствующие фотографии шлифов, выполненные в одинаковом масштабе (увеличение в ~ 50 раз) на фиг. 4 б и 5 б.

Песчаник, которому соответствует распределение расстояний между зернами, приведенное на фиг. 4, имел пористость $m = 18.4\%$ и проницаемость $K = 1.007$ *дарси*. Для этого песчаника были получены следующие значения структурных параметров:

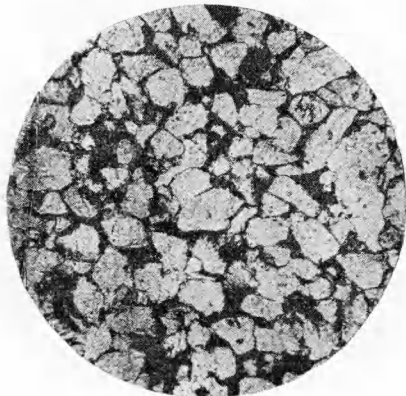
$$l_s = 50.7 \mu, \quad l_m = 25.8 \mu \\ L = 500 \mu, \quad D = 1764 \mu^2$$

Песчаник с распределением расстояний между зернами, приведенным на фиг. 5, имел пористость $m = 22.6\%$, проницаемость $K = 0.450$ *дарси*. Для этого песчаника структурные параметры имели следующие значения:

$$l_s = 23.9 \mu, \quad l_m = 13.8 \mu \\ L = 124 \mu, \quad D = 269 \mu^2$$



Фиг. 5 а



Фиг. 5 б

Сравнение приведенных кривых и сопоставление соответствующих им фотографий шлифов показывает, что различным структурам порового пространства соответствует различная форма кривых распределения расстояний между зернами. Очевидно, меньшему значению дисперсии D кривых соответствует более однородная структура.

Исследование полученных кривых распределения расстояния между зернами песчаников показало, что закон распределения этой величины не является нормальным, о чем свидетельствует несимметричный характер кривой

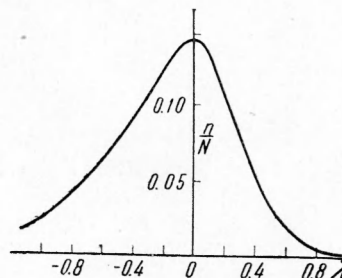
$$n/N = F_1(\lambda), \quad \lambda = \ln(l/l_m)$$

приведенной на фиг. 6. Эта кривая была построена на основании гистограммы для песчаника, распределение расстояний между зернами которого приведено на фиг. 4. Такой же несимметричный характер имели аналогичные кривые и для других образцов песчаников. Поэтому параметры l_s , l_m , L , D не дают исчерпывающего представления

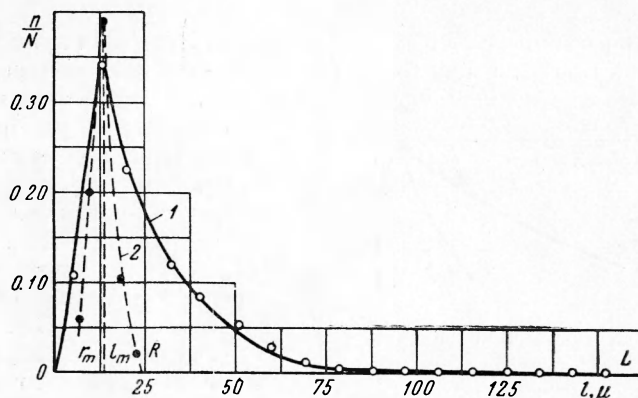
о законе распределения l и задачей дальнейшей работы является установление аналитического вида кривых распределения.

Известный теоретический интерес представляет сопоставление кривых распределения расстояний между зернами с кривыми распределения пор по «радиусам», которые рассчитываются на основании эмпирической зависимости остаточной насыщенности пористой среды водой или какой-либо другой жидкостью от капиллярного давления и предположения о том, что пористое тело состоит из цилиндрических капилляров разного радиуса [2,4].

Как видно из фиг. 7, на которой приведены распределение расстояний между стенками пор (кривая 1) и распределение пор по радиусам (кривая 2) для одного и того же образца, наблюдается хорошая корреляция между максимумами обеих кривых. Однако общий характер кривых существенно различен. Если модальное значение радиуса пор r_m , определенное методом капиллярного вытеснения, практически совпадает с модальным значением расстояния



Фиг. 6



Фиг. 7

L_m между стенками пор, то максимальная величина радиуса пор $R \approx 25 \mu$ значительно меньше максимального расстояния L между стенками пор, равного в данном случае $\sim 152 \mu$.

Поступила 4 VI 1961

ЛИТЕРАТУРА

1. Ишкин И. П., Каганер М. Г. Распределение пор по их размерам в пористых телах. ЖФХ, № 24, 1950.
2. Оркин К. Г., Кучинский П. К. Лабораторные работы по курсу «Физика нефтяного пласта», Гостоптехиздат, 1953.
3. Фигуровский Н. А. Методы полного дисперсионного анализа полидисперсных тел. Заводск. лаборатория, 1949, № 4.
4. Методы исследования структуры высокодисперсных и пористых тел. Тр. совещания, 1953.
5. Электрокинетические свойства капиллярных систем. Монографический сб. АН СССР, 1956.
6. Scheidegger A. E. Statistical approach to miscible displacement in porous media Annual Meeting Petr. and nat. gas Division Calgary, 1958, may.