

Исследование гранулометрического состава битуминозных песчаников Ашальчинского месторождения методом рентгеновской микротомографии

X-ray microtomography and grain size analysis of bituminous sandstones from Ashalchinskoye oil field

T.R. Zakirov (Kazan (Volga Region) Federal University, RF, Kazan; Institute of Mechanics and Engineering, Kazan Science Center of RAS, RF, Kazan),
A.A. Galeev, N.I. Zharkova, E.O. Statsenko, E.A. Korolev,
L.I. Khaidarova
(Kazan (Volga Region) Federal University, RF, Kazan)

E-mail: tirzakirov@kpfu.ru

Key words: X-ray micro-CT, grain size distribution, image processing, Kozeny's formula

X-ray microtomography on 4.6 mm long 4.7 mm diameter samples of bituminous sandstones from Ashalchinskoye oil field was performed with a spatial resolution of 5.8 μm . The representative elementary volumes for grain size distribution were estimated along with porosity and permeability coefficients for digital cube geometry ranged between 0.3 and 3.5 mm (0.03–43 mm³). The representative elementary volume for grain size distribution was achieved at cube edge length of 2.3 mm (12.2 mm³). This value is almost 2 times higher than the estimation of representative elementary volume for absolute permeability tensor and almost 4 times higher than the estimation for porosity coefficient.

It is shown that Kozeny's formula characterizing the dependence of the effective permeability coefficient on the grain diameter and the porosity gives lower values, compared with the permeability coefficients obtained by modelling flow processes on digital images.

Гранулометрический состав и структура порового пространства терригенных отложений являются важными характеристиками условий их формирования. В последние годы для анализа структуры горных пород все более широко используется метод рентгеновской компьютерной микротомографии. Преимуществом данного неразрушающего метода является возможность одновременного анализа геометрических размеров зерен и пор породы с одинаковой точностью. Целью данной работы является показать связь представительных элементов объема гранулометрического состава с физическими характеристиками, определенными по цифровым трехмерным образам структуры песчаников Ашальчинского битумного месторождения.

Объекты и методы исследования

В качестве образцов для исследования были выбраны песчаники пермского и каменноугольного возраста Ашальчинского месторождения [1, 2]. Гранулометрический состав породы определяли с применением ситового и ареометрического методов по ГОСТ 12536-2014. Для микротомографических измерений были изготовлены три цилиндрических образца диаметром 30 мм и

Т.Р. Закиров, к.ф.-м.н.
(Казанский (Приволжский) федеральный университет, Институт механики и машиностроения КазНЦ РАН),
А.А. Галеев, к.ф.-м.н.,
Н.И. Жаркова, к.г.-м.н.,
Е.О. Стаценко,
Э.А. Королев, к.г.-м.н.,
Л.И. Хайдарова
(Казанский (Приволжский) федеральный университет)

Адрес для связи: tirzakirov@kpfu.ru

Ключевые слова: рентгеновская микротомография, гранулометрический состав, обработка изображений, формула Козени

Работа выполнена частично при поддержке гранта Российского научного фонда (rscf) 15-11-10015 и гранта РФФИ мол_а 16-35-00155, а также за счет средств субсидии, выделенной в рамках государственной поддержки Казанского (Приволжского) федерального университета в целях повышения его конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров.

длиной 35 мм. Далее из них вырезали три фрагмента в форме цилиндров диаметром 4,7 мм и длиной 4,6 мм. Микротомографические измерения с разрешениями 5,8 мкм выполнялись на приборе GE Phoenix v|tome|x s.

Цифровые образы внутренней структуры образцов и результаты исследования их фильтрационно-емкостных свойств представлены в работах [1, 2]. В песчаниках, как правило, гранулы (зерна, частицы) имеют множество точек соприкосновения друг с другом, что отчетливо видно как в шлифах, так и на томографических изображениях. Для анализа объема частиц с использованием цифровых данных необходимо отделить зерна друг от друга в изображении. Для этого была использована программа Avizo Fire Edition (Visualization Sciences Group), в которой эта процедура может проводиться с использованием разных алгоритмов и состоит из нескольких этапов.

На первом этапе выполняется бинаризация исходного полутонового томографического изображения (рис. 1, а), в результате воксели (или ячейки), соответствующие твердым фазам скелета (обозначим их цифрой 1), отделяются от вокселей, соответствующих порам (обозначим их цифрой 0). В качестве примера бинаризованного изображения

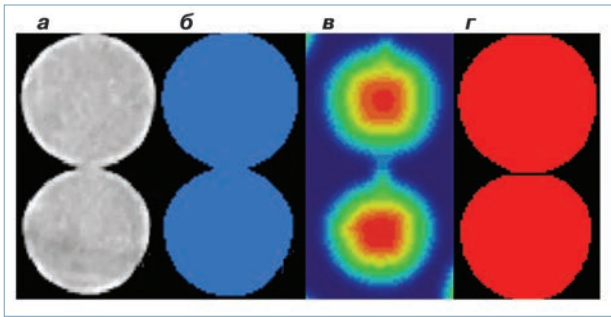


Рис. 1. Процесс разделения двух зерен:
 а, б – фрагмент томографического изображения соответственно исходного и после бинаризации; в – карта расстояний для двух частиц; г – два разделенных зерна

на рис. 1, б твердые фазы показаны синим, а поры – черным цветом. Далее определяются внешние границы частиц. Для этого выбираются ячейки, относящиеся к твердым фазам, и анализируются примыкающие к ним 26 (в случае 3D изображения) или 8 (в случае 2D изображения) вокселей. Анализ подразумевает суммирование соответствующих ячейкам значений (0 или 1). Если сумма составляет 26 (или 8), то данный воксель не является пограничным, если сумма меньше 26 (или 8), ячейка идентифицируется, как граница зерна. На следующем этапе строится карта расстояний (distance map), которая характеризует расстояние от каждой ячейки (с координатами x_1, y_1, z_1), соответствующей твердой частице, до ближайшей к ней граничной ячейке (с координатами x_2, y_2, z_2). Карта расстояний строится согласно следующей формуле:

$$D = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}. \quad (1)$$

На рис. 1, в синим цветом показаны границы зерен, а красным – так называемые «локальные максимумы», или «маркеры» частиц.

Дальнейшая процедура разделения гранул основана на так называемом процессе заводнения (filling process). Зерна представляются в виде водосборных бассейнов (catchment basins), где уровень воды зависит от карты расстояний. Так, области, выделенные на рис. 1, в красным цветом, соответствуют максимальному уровню, а синим – минимальному. Далее на основе рассчитанной по формуле (1) карте расстояний определяется градиент уровня. Ячейка, в окрестности которой градиент меняет свой знак, обозначается как разделительная, а совокупность ячеек – «линией водораздела» (watershed line). Два разделенных зерна показаны на рис. 1, г. Подобная процедура разделения гранул применялась в работах [3–5].

Геометрические параметры гранул описываются численной величиной, характеризующей эквивалентный диаметр частицы [6]

$$d_i = 6 \cdot \left(\frac{V_i}{S_i} \right), \quad (2)$$

где V_i – объем i -й частицы; S_i – площадь i -й частицы поверхности.

На рис. 2 показано томографическое изображение песчаника после процедуры разделения частиц. Гранулы

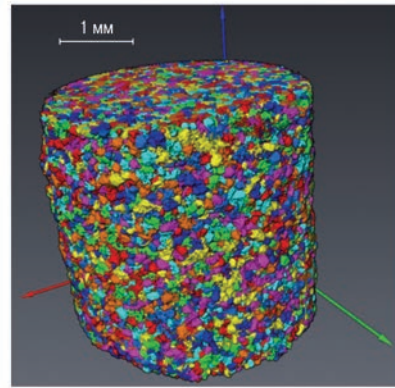


Рис. 2. Томографическое изображение песчаника после процедуры разделения зерен

различных размеров на данном рисунке выделены разными цветами.

Для получения представительного элемента объема частиц REV (representative elementary volume) выполнено последовательное определение распределения зерен по размерам для кубических цифровых фрагментов породы от 50 до 650 вокселей (от 0,3 до 3,5 мм) с шагом 50 вокселей.

Обсуждение результатов

Результаты определения гранулометрического состава традиционным методом по ГОСТ 12536-2014 и по данным обработки томографических изображений показали, что размер более 70 % зерен породы при использовании как первого, так и второго метода измерений находится в сравнительно узком диапазоне – от 0,05 до 0,10 мм.

Распределение зерен по размерам в серии микротомографических измерений для кубических цифровых фрагментов со стороной 100, 250, 400 и 600 вокселей для образца № 1 представлено на рис. 3. Проверку однородности полученных распределений проводили по критерию χ^2 при уровне значимости $\alpha = 0,05$ для числа интервалов разбиения $n = 20$. Поскольку различия в этих распределениях для кубических цифровых фрагментов со стороной 400 вокселей и более являются статистически незначимыми, объем породы 2,3 мм³, соответствующий кубу со стороной 400 вокселей, может быть принят за REV. Общее число зерен в объеме данного размера составляет почти 5000.

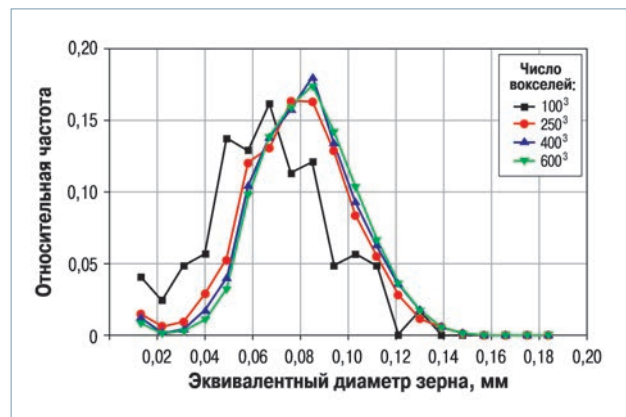


Рис. 3. Распределение эквивалентных диаметров зерен, полученное по томографическим изображениям

Образец	Пористость	Эффективный диаметр пор, мм	$k_{\text{Козени}}$, МКМ ²	k_{exp} , МКМ ²	$\Delta = 100 \cdot \frac{(k_{\text{Козени}} - k_{\text{exp}})}{k_{\text{Козени}}}$, %
S1	0,304	0,109	5,72	7,05	-23,2
S2	0,311	0,104	5,66	8,30	-46,2
S3	0,307	0,116	6,76	8,66	-27,9
S4	0,295	0,109	5,21	7,07	-35,8
S5	0,390	0,074	7,23	11,92	-64,7
S6	0,390	0,080	8,55	11,98	-40,0
S7	0,395	0,079	8,87	11,82	-33,1
S8	0,395	0,070	6,92	11,62	-67,8

Описанная процедура была применена также для образцов № 2 и 3. Рассчитанные для них величины REV, как и для образца № 1, составляют 400 ячеек, что коррелирует с результатами работы [2]. В данной работе показано, что значения REV для коэффициентов пористости и компонент тензора абсолютной проницаемости в главных осях исследуемых образцов также находятся в узком диапазоне, однако размеры REV не превышают 250 вокселей.

Для того, чтобы оценить связь коэффициента абсолютной проницаемости с распределением частиц по размерам, И. Козени была предложена методика определения эффективного диаметра зерна d_{eff} . Согласно работе [7] этот параметр рассчитывается по формуле

$$d_{\text{eff}} = \frac{100}{\left(\sum_{i=2}^N \frac{\Delta f_i}{d_i} + \frac{3}{2} \cdot \frac{\Delta f_1}{d_1}\right)}, \quad (3)$$

где Δf_i – содержание частиц i -й фракции, %; Δf_1 – содержание фракции частиц минимального размера, %; d_i – диаметр фракции, мм.

Диаметр d_i вычисляется по следующей формуле [7]:

$$\frac{1}{d_i} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{1}{d_i^1} + \frac{1}{d_i^2}\right), \quad (4)$$

где d_i^1, d_i^2 – соответственно верхняя и нижняя граница i -го диапазона.

Коэффициент абсолютной проницаемости рассчитывается по формуле [7]

$$k_{\text{Козени}} = \frac{d_{\text{eff}}^2 m^3}{120 \cdot (1-m)^2}, \quad (5)$$

где m – пористость образца.

В таблице приведены результаты расчетов абсолютной проницаемости $k_{\text{Козени}}$ по формуле (5) и абсолютная проницаемость k_{exp} , полученная при выполнении вычислительных экспериментов на восьми цифровых образах песчаников Ашальчинского месторождения различных горизонтов (математическая модель течения жидкости в цифровых моделях пористых сред была подробно рассмотрена в работах [1, 2]). Из нее видно, что формула Козени дает заниженные на 20–70 % значения коэффициента абсолютной проницаемости по сравнению с величинами, полученными при проведении вычислительных экспериментов.

Выводы

1. REV для гранулометрического состава песчаников составляет 2,3 мм³, что почти в 2 раза превышает значения REV для главных компонент тензора абсолютной проницаемости и в 4 раза – для коэффициента пористости.

2. Формула Козени, характеризующая зависимость коэффициента проницаемости от эффективного диаметра зерен и пористости, дает заниженные коэффициенты проницаемости по сравнению со значениями, полученными при моделировании фильтрационных процессов в цифровых образах.

Список литературы

1. Исследование фильтрационно-емкостных свойств песчаников Ашальчинского месторождения методом рентгеновской компьютерной томографии / Т.Р. Закиров, А.А. Галеев, Э.А. Королев (и др.) // Нефтяное хозяйство. – 2015. – № 8. – С. 36–40.
2. Анализ «представительного элемента объема» фильтрационно-емкостных свойств песчаников Ашальчинского месторождения с использованием метода рентгеновской компьютерной томографии / Т.Р. Закиров, А.А. Галеев, А.А. Коновалов, Е.О. Стаценко // Нефтяное хозяйство. – 2015. – № 10. – С. 54–57.
3. Dale S., Wassgren C., Litster J. Measuring granule phase volume distributions using X-ray microtomography // Powder Technology. – 2014. – V. 264. – P. 550–560.
4. Al-Raoush R., Alshibli Kh. A. Distribution of local void ratio in porous media systems from 3D X-ray microtomography images // Physica A. – 2006. – V. 361. – P. 441–456.
5. Kaur A., Aayushi. Image Segmentation Using Watershed Transform // International Journal of Soft Computing and Engineering. – 2014. – V. 4. – № 1. – P. 5–8.
6. Grain Shape Effects on Permeability, Formation Factor, and Capillary Pressure from Pore-Scale Modeling / T. Torskaya, V. Shabro, C. Torres-Verdin (et al.) // Transport in Porous Media. – 2014. – V. 102. – P. 71–90.
7. Ромм Е.С. Структурные модели пористого пространства горных пород. – А.: Недра, 1985. – 240 с.

References

1. Zakirov T.R., Galeev A.A., Korolev E.A. et al., Estimation of sandstone reservoir properties using X-ray CT studies in Ashalchinskoye oil field (In Russ.), Neftyanoe khozyaystvo = Oil Industry, 2015, no. 8, pp. 36–40.
2. Zakirov T.R., Galeev A.A., Konovalev A.A., Statsenko E.O., Analysis of the "representative elementary volume" sandstones reservoir properties using the method of X-ray computed tomography in Ashalchinskoye oil field (In Russ.), Neftyanoe khozyaystvo = Oil Industry, 2015, no. 10, pp. 54–57.
3. Dale S., Wassgren C., Litster J., Measuring granule phase volume distributions using X-ray microtomography, Powder Technology, 2014, V. 264, pp. 550–560.
4. Al-Raoush R., Alshibli Kh. A., Distribution of local void ratio in porous media systems from 3D X-ray microtomography images, Physica A, 2006, V. 361, pp. 441–456.
5. Kaur A., Aayushi, Image segmentation using watershed transform, International Journal of Soft Computing and Engineering, 2014, V. 4, no. 1, pp. 5–8.
6. Torskaya T., Shabro V., Torres-Verdin C. et al., Grain Shape effects on permeability, formation factor, and capillary pressure from pore-scale modeling, Transport in Porous Media, 2014, V. 102, pp. 71–90.
7. Romm E.S., Strukturnye modeli poristogo prostranstva gornykh porod (Structural models of the pore space of rocks), Leningrad: Nedra Publ., 1985, 240 p.