

А. А. Пономарев, М. Д. Заватский

A. A. Ponomarev, M. D. Zavatsky

Тюменский государственный нефтегазовый университет, г. Тюмень

Ключевые слова: компьютерная микротомография; цифровой керн; нефтенасыщенность; минеральный состав; геология

Key words: computerized microtomography; digital core; oil saturation; mineral composition; geology

В настоящее время большинство месторождений Западной Сибири истощено, ситуация требует новых методов увеличения нефтеотдачи и высокого качества практикуемых мероприятий. В последнее десятилетие в геологии активно внедряются методы неразрушающего контроля образцов керна: томография полноразмерного керна, микротомография. Обусловлено это тем, что стандартные методики определения фильтрационно-емкостных свойств не учитывают техногенных нарушений структуры образца при поднятии керна на поверхность и при распиловке керна; нередко, особенно при изучении нестандартных коллекторов, дают ошибочные результаты.

В настоящей работе рассмотрены примеры применения компьютерной микротомографии в геологии, а также проведены исследования с цилиндрическими образцами керна (диаметр 30 мм и 8 мм).

Компьютерная микротомография или микро-КТ — это реконструкция бинарных моделей рентгеновских изображений в трехмерное пространство [1]. Представлен принцип действия прибора (рис. 1).

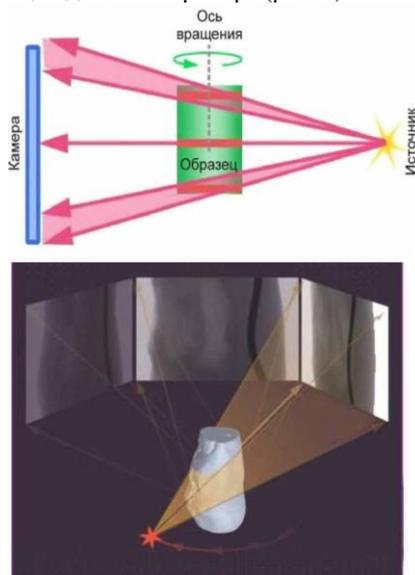


Рис. 1. Принцип работы микротомографа

Образец устанавливается в сканер, на предметный столик, который в ходе сканирования вращается, в этот момент через образец проходят рентгеновские лучи, испускаемые источником, оставляя на приемнике (камере) теневые проекции. При каждом повороте фиксируется отдельная проекция (отдельное двухмерное изображение, отвечающее интенсивности рентгеновского излучения после прохождения последнего через изучаемый образец, называется *теневой проекцией*).

Яркость (различные градации серого) на рентгеновской теневой проекции отражает ослабление рентгеновского излучения за счет эффектов рассеивания и поглощения сигнала, прошедшего через образец.

Ослабление будет зависеть от плотности и толщины изучаемого объекта, а также от эффективного атомного номера

(Zэф), из которого состоит исследуемый образец. Описывается этот эффект законом Ламберта-Бера, определяющим ослабление монохроматического пучка света при распространении его в поглощающей среде. Закон выражается формулой

$$I(x) = I_0 e^{-\mu x}, \quad (1)$$

где I_0 — начальная интенсивность рентгеновского излучения; x — толщина слоя вещества, через которое проходит излучение; μ — показатель поглощения среды. В случае, когда сканируемый объект не гомогенен по своему составу, а таковы практически все горные породы, то уравнение приобретает вид

$$I(x) = I_0 e^{-\sum_i \mu_i x_i}, \quad (2)$$

где каждому инкременту i соответствует отдельный материал с определенным показателем поглощения μ_i и линейной длиной x_i . При прохождении рентгеновского излучения через какой-либо материал уровень поглощения излучения может быть сопряжен с четырьмя видами взаимодействия: фотоэлектрическим поглощением, комптоновским рассеянием, образованием электрон-позитронных пар и когерентным рассеянием Релея. При изучении геологических объектов, когда применяются источники излучения с энергией до 100 кэВ, основным процессом, определяющим ослабление рентгеновского излучения, будет фотоэлектрическое поглощение.

После сканирования в ходе реконструкции проекции преобразуются в срезы толщиной один воксель, из которых затем строится и анализируется 3D-модель образца. Максимальный размер образца для системы SkyScan 1172 по длине/ширине не должен превышать 64 мм. Максимальная высота — 70 мм [2].

Начало внедрения метода компьютерной микротомографии в комплекс исследований по определению фильтрационно-емкостных свойств сложных, трещиноватых и кавернозных коллекторов обусловлено необходимостью изучения анизотропности фильтрационных и физико-механических свойств пород, связанных со строением порового пространства и текстурных характеристик. Сегодня ученые могут по данным компьютерной микротомографии с высокой точностью определять фильтрационно-емкостные свойства и моделировать процессы фильтрации внутри образца по поровому пространству. Разработаны методы моделирования для однофазной (нефть или вода) и двухфазной (вода и нефть) фильтрации; определение открытой, закрытой, эффективной пористости; абсолютной проницаемости; моделирования процессов кислотной обработки; определения структурной глинистости; компонентного состава. Ведутся работы по определению эффективности применения гидроразрыва пласта; остаточной водонасыщенности и расчета нефтенасыщенности ядра. Разрабатывается комплексный подход к изучению ядра на разных уровнях разрешающей способности и репрезентативности исследований «Macro-CT → Micro-CT → Nano-CT → FIB-SEM» [3]. Растет популярность томографических исследований с неинвазивным путем анализа и полной сохранностью ядерного материала, оцифровки ядра, хранение которого невозможно, что доставляет большие трудности при подготовке его к лабораторным исследованиям. Крупные корпорации, такие как «ЛУКОЙЛ», «Газпром», «Роснефть», «Сургутнефтегаз», активно используют компьютерную микротомографию при петрофизических анализах ядра.

Тюменским государственным университетом совместно с ООО «Тюменская центральная лаборатория» на базе учебно-научной геохимической лаборатории ТюмГНГУ проведены исследования ядра методом компьютерной микротомографии. Исследовалась коллекция из пяти 30-ти мм образцов с последующей распиловкой в 8 мм.

Исследование разбилось на два этапа: 1) изучение макроструктуры образцов при съемке с разрешающей способностью камеры 9 мкм/рх1; 2) изучение микроструктуры образцов при съемке с разрешением камеры 2,9 мкм/рх1.

Вся расчетная информация была получена при исследовании 8-ми мм цилиндров с разрешающей способностью 2,9 мкм/рх1, но в связи с малыми размерами зерен большинства образцов наиболее детальную информацию удалось получить только по одному образцу № 3. В нем наблюдается коррозия породообразующих минералов, пред-

положительно, кварцев и полевых шпатов. Была рассчитана глинистость в структуре зерен. Результаты анализа представлены в таблице.

Результаты анализа образцов

Номер образца	Пористость	Глинистый материал		Кварц	Полевой шпат	Карбонаты	Тяжелые минералы	Проницаемость	Коэффициент корреляции
		в цементе	в зернах						
1	0,6	4		57,1	37,5	0,2	0,6	0,7	1784
2	0,2	3,5		64,8	25,9	0	5,6	15,3	393
3	4,45	8,6	9,5	61,9	14,9	0,2	0,45	59,9	14134
4	0,1	2,2		59,3	37,4	0,8	0,2	1,8	179
5	0,23	3,4		60,2	35,6	0,4	0,17	3,1	439

Также по образцам были произведены следующие работы: определение пористости (эффективной, диаметры пор больше 3 мкм), определены эквивалент-диаметры пор, проведена корреляция данных с проницаемостью, определен предположительный минеральный состав, определена структура порового пространства (межзерновая, трещиноватая), определены структура и текстура породы, определен угол отклонения прослоев от центральной оси, определена раскрытость трещин.

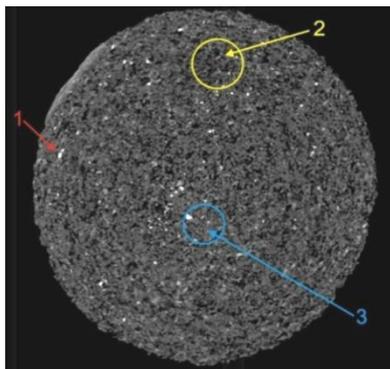


Рис. 2. Поперечное сечение образца породы

Литологическое описание образца № 3 (рис. 2). Структура порового пространства межзерновая, наблюдаются разные по размерам пор зоны, обусловленные плотностью упаковки зерен: 2 — рыхлая, с развитой коррозией; 3 — плотная, коррозия развита менее активно. Структура породы алевролитовая мелкозернистая, по большей части конформная равномернозернистая, относительно неплохая пористость обусловлена коррозией минералов. Отмечается наличие тяжелых минералов — 1. Текстура образца однородная, характеризуется одинаковыми свойствами пород по различным направлениям, то есть изотропностью свойств, включая коллекторские и физико-механические. Приведен пример определения предположительного минерального состава и определение глинистости в структуре и цементе породы (рис. 3).

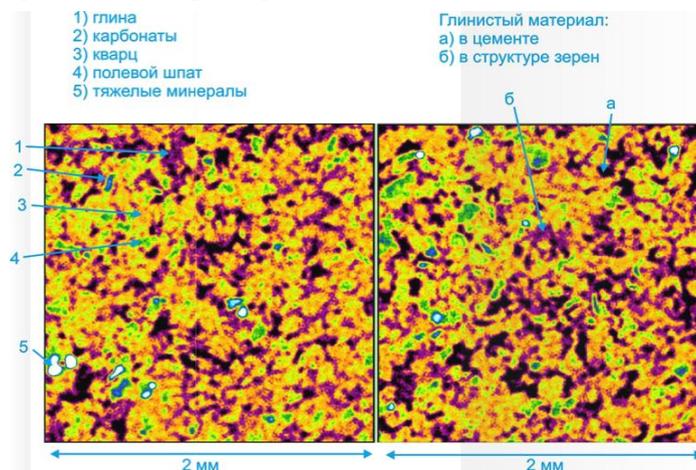


Рис. 3. Минеральный состав породы

Корреляция с проницаемостью, получилась достаточно точной, с коэффициентом детерминации равным 0,917. Корреляция проводилась по данным микроанализа (рис. 4). Было выявлено наибольшее отклонение у двух образцов: 1 и 2.

При просмотре результатов макроанализа данных образцов было выявлено, что соотношение зон с плотной и рыхлой упаковкой в данных образцах совершенно разное, а выпиленные для микроанализа 8 мм цилиндры конкретно в данных двух случаях не обладают высокой репрезентативностью.

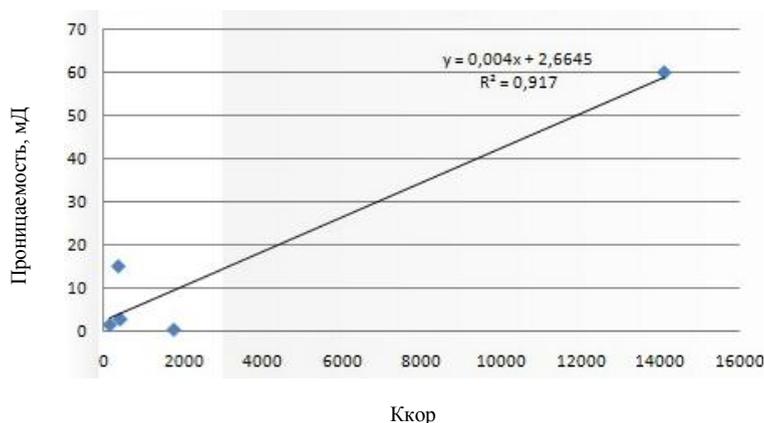


Рис. 4. Корреляция данных микротомографии и проницаемости

В учебно-научной геохимической лаборатории ТюмГНГУ проводились исследования по определению нефтенасыщенности керна методами газовой хроматографии и методом компьютерной микротомографии. Была сделана попытка сегментации флюида в поровом пространстве на три составляющие: нефть, воздух, вода. Представлены результаты 3D-моделирования (рис. 5); количественная оценка нефтенасыщенности образца в сравнении с данными газовой хроматографии отличалась в третьем знаке после запятой в размерности кубических мм и была в два раза меньше [3].

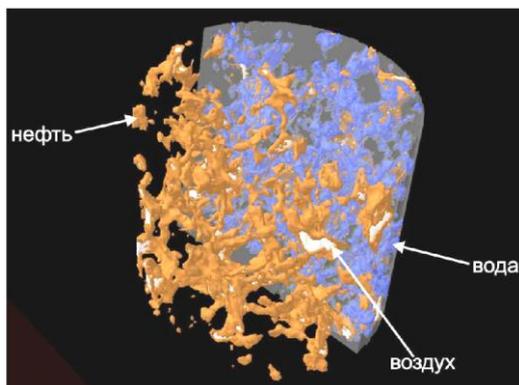


Рис. 5. Пример сегментации флюидов в поровом пространстве

В настоящее время ведется активная работа по определению нефтепроницаемости грунтов и выделения нефти внутри порового пространства [3, 4].

Таким образом, необходимо признать важное значение компьютерной микротомографии в развитии и планомерном переходе к исследованиям керна в цифровом виде.

Следует отметить, что идея создания цифрового кернохранилища является актуальной задачей на сегодняшний день, так как это позволит в будущем избежать многих проблем, связанных с хранением керна и анализом образцов горных пород с трудноизвлекаемыми запасами: неконсолидированных, низкопроницаемых, нетрадиционных и шельфовых коллекторов.

Компьютерная микротомография является уникальным неразрушающим инструментом по определению коллекторских свойств горных пород и практичным инструментом определения изолированных пор. Компьютерная микротомография увеличивает достоверность при корреляции с данными ГИС и дает возможность анализа в 3D, что повышает достоверность исследований; обеспечивает неразрушающий контроль качества образцов, предназначенных для дорогостоящих исследований.

Список литературы

1. Stuart R. Stock, 2009 «Microcomputed Tomography Methodology and Applications»
2. Корост Д. В. Неоднородность строения терригенных коллекторов и типы структуры их пустотного пространства: на примере верхней части Тюменской свиты Уреннского нефтяного месторождения Западной Сибири: дис. ... канд. г.-м. наук / Д. В. Корост; Моск. гос. ун-т им. М. В. Ломоносова. – Москва, 2012.
3. Пономарев А. А. Использование компьютерной микротомографии с целью обоснования применения гидро-разрыва пласта: материалы III Всероссийской конференции «Практическая микротомография», 2014. – С. 129-132.
4. Парфенов В. Г., Никифоров А. С., Пономарев А. А. Использование рентгеновской микротомографии для определения нефтепроницаемости грунтов. Материалы девятой Международной научно-технической конференции «Геология и нефтегазоносность Западно-Сибирского мегабассейна», 2014. – С. 276-278.

Сведения об авторах

Пonomarev Андрей Александрович, лаборант учебно-научной геохимической лаборатории, специалист по вопросам компьютерной микротомографии, Тюменский государственный нефтегазовый университет, г. Тюмень, тел, 89829313122, e-mail: ponomarev94@mail.ru

Заватский Михаил Дмитриевич, к. г.-м. н, доцент кафедры «Геология месторождений нефти и газа», заведующий учебно-научной геохимической лабораторией. Тюменский государственный нефтегазовый университет г. Тюмень, тел, 89222670591, e-mail: eksis2005@yandex.ru

Information about the authors

Ponomarev A. A., lab assistant of the educational-research laboratory for geochemistry, an expert in computerized tomography issues, Tyumen State Oil and Gas University, phone: 89829313122, e-mail: ponomarev94@mail.ru

Zavatsky M. D., Candidate of Science in Geology and Mineralogy, associate professor of the chair «Geology of oil and gas fields», Tyumen State Oil and Gas University, phone: 89222670591, e-mail: eksis2005@yandex.ru