

СОВРЕМЕННЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ МЕТОДА РЕНТГЕНОВСКОЙ ТОМОГРАФИИ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ КЕРНА НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Я.В. Савицкий

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия

Метод рентгеновской томографии является одним из наиболее высокотехнологичных и активно развивающихся методов исследования пород-коллекторов. Приведены основные сведения о методе рентгеновской томографии и его применении в изучении керна пород-коллекторов нефти и газа. Описан физический принцип действия метода, история его открытия и применения в геологических науках. Изложена информация о масштабных уровнях исследования вещества и охвате их методом рентгеновской томографии, возможностях и особенностях метода при исследовании полноразмерного керна, стандартных образцов и образцов меньших размеров, области применения результатов этих исследований. Охарактеризован современный уровень развития метода, его технические возможности, раскрыты понятия макротомографии, микротомографии и нанотомографии. Приведен список основных производителей систем рентгеновской томографии, различия в их характеристиках, ограничения в возможностях, особенностях применения. Описаны основные направления применения рентгеновской томографии керна и необходимые для них технические требования: изучение первичной и вторичной пористости, трещиноватости, кавернозности, внутренней морфологии пористого пространства, плотностных неоднородностей, флюидонасыщенности, проницаемости, динамики распределения флюидов, корреляции данных геофизики, построения цифровых моделей керна методами математического моделирования. Проведено сравнение с некоторыми другими методами: оптической и электронной сканирующей микроскопией, методами нейтронной и синхротронной томографии, определены возможности совмещения их данных с данными, полученными рентгеновской томографией. Изложены основные виды исследований керна методом рентгеновской томографии, проводящихся в ПНИПУ: изучение полноразмерного, стандартного и малоразмерного керна, определение пористости, детальное изучение структурно-морфологических признаков, геометрия пустотного пространства, характеристики флюидонасыщенности с помощью различных составов рентгеноконтрастных растворов, методы контроля результатов солянокислотных обработок карбонатного керна.

Ключевые слова: рентгеновская томография, микротомография, неразрушающий контроль, керн, петрофизические исследования, литология, карбонаты, терригенные породы, коллектор, пористость, проницаемость, неоднородность, поры, трещиноватость, флюиды, рентгеноконтрастные вещества, микроскопия.

CURRENT FEATURES OF X-RAY TOMOGRAPHY IN EXAMINATION OF CORE SAMPLES FROM OIL AND GAS DEPOSITS

Ia.V. Savitskii

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

The method of X-ray tomography is one of the advanced and fast-developing methods to explore reservoir rocks. Basic facts about the method of X-ray tomography and its application to study a core of reservoir rocks containing oil and gas are given. A physical principle of operation of the method, the history of its discovery and application in geological sciences are described. The paper presents information about the extensive scope of research of substance and implementation of X-ray tomography, the advantages and features of the method in exploring the whole core, standard and smaller samples, applicability of the results gained. A current state of development of the method and its engineering capability are discussed, the concepts of macrotomography, microtomography and nanotomography are interpreted. A list of leading manufacturers of the X-ray tomography equipment is offered; product specification differences, performance limitations and application specificity are analysed. The main ways of X-ray tomography application for core sample analysis are embraced, specifying the related technical requirements: study of initial and induced porosity, fracturing, cavern porosity, internal pore space morphology, density inhomogeneity, fluid saturation, permeability, fluid distribution dynamics, geophysical data correlation, design of core's digital model by methods of mathematical simulation. Comparison is made to some other methods: optical and electronic microscopy, methods of neutron and synchrotron tomography. Possibilities of combining their data with the data received by X-ray tomography are discussed. The main core research methods with help of X-ray tomography applied in PNRPU are described: study of whole, standard and small-sized core, porosity evaluation, detailed examination of structural and morphological character, void space geometry, determining fluid saturation parameters by radiocontrast solutions, methods to control results of hydrochloric acidizing of carbonated core.

Keywords: X-ray tomography, microtomography, non-destructive inspection, core sample, petrophysical investigations, lithology, carbonates, terrigenous rock, reservoir, porosity, permeability, nonuniformity, pores, fracturing, fluids, radiocontrast agents, microscopy.

Введение

Исследование горных пород традиционными методами в современных условиях повышения роли нетрадиционных коллекторов, представляющих собой сложнопостроенные и неоднородные геологические тела, увеличения значимости трудноизвлекаемых запасов нефти и газа требуют усовершенствования подходов к изучению керна, повышающих точность оценки фильтрационно-емкостных свойств. Одним из сравнительно новых для нефтяной отрасли методов, дополняющих и расширяющих возможности традиционных, является рентгеновская томография.

Принципы работы

Рентгеновское излучение – это электромагнитные волны, энергия которых лежит на энергетической шкале квантов между ультрафиолетовым излучением и гамма-излучением. Наиболее широкое применение получили рентгеновские лучи с длиной волны 0,005–0,2 нм, которые используются для просвечивания образцов горных пород в целях изучения их строения, структуры и химического состава.

Рентгеновское излучение образуется в источнике, которым в лабораторных условиях является специальная рентгеновская трубка, представляющая вакуумную емкость с помещенными внутрь двумя электродами – отрицательным катодом, выполненным в виде вольфрамовой нити, и положительным анодом, выполненным в виде пластинки, расположенной под углом. При прохождении тока по катоду из раскаленной нити вылетают электроны и направляются к аноду. Рентгеновское излучение возникает при торможении этих электронов, оно фокусируется специальной мишенью и направляется к исследуемому образцу. На свойствах рентгеновского излучения основано несколько методов исследования: рентгенофазный анализ, рентгеноспектральный анализ и метод рентгеновской компьютерной томографии.

Принцип действия метода рентгеновской томографии основан на получении серии рентгеновских изображений объекта, из которых с помощью программных методов получают объемное изображение. Для создания серии снимков образец помещают в держатель, который медленно вращается вокруг одной из осей, как правило вертикальной, на 360°. От скорости вращения зависит количество снимков и качество итоговой модели. Снимок формируется на цифровой кремниевой матрице, установленной напротив рентгеновской пушки, и представляет собой пиксельное изображение. Таким образом создается серия рентгеновских снимков, которая преобразуется в объемную модель. Снимок представляет собой полутонные изображения, в которых яркость характеризует степень поглощения рентгеновского излучения в результате фотоэффекта и комптоновского рассеяния. Степень поглощения зависит от физических свойств горной породы, чаще всего плотности. Преобразование двумерных снимков в трехмерное изображение происходит с помощью алгоритмов, разработанных на основании преобразования Радона. Применение математического алгоритма стало возможным благодаря тому, что экспоненциальный закон ослабления излучения в рентгеновском диапазоне выполняется с большой точностью. В настоящий момент существует множество программных решений, используемых для реконструкции трехмерных изображений из серии двумерных.

История метода

Метод был изобретен в 1970-х гг.¹ [1] и применялся в медицинских целях. С 1980-х гг. метод стал применяться в геологических науках, в том числе и в нефтяной геологии [2, 3]. На ранних эта-

¹ Hounsfield G.N. A method of and apparatus for examination of a body by radiation such as X- or gamma-radiation. British Patent No. 1.283.915. London, 1972.

пах развития метода зарубежными исследователями съемка проводилась с помощью рентгеновских томографов, предназначенных для медицинских целей. Они состояли из кругового детектора и неподвижного столика, что накладывало определенные ограничения на исследование керн в связи с небольшой мощностью рентгеновской трубки и неподходящей конфигурацией столика и детектора, однако их использование позволило проводить изучение трещиноватости и крупной кавернозности в полноразмерном керне [4]. Появление специализированных промышленных рентгеновских томографов с веерным пучком, неподвижной трубкой, матрицей, вращающимся столиком и свинцовым кабинетом позволило значительно улучшить детальность получаемого изображения и уменьшить размер видимых пустот за счет повышения энергии рентгеновского излучения и стабилизации изображения.

Первоначально исследования в этой области проводились исключительно за рубежом на геологических факультетах и в научно-исследовательских институтах Австралии, США, Великобритании, Германии, Норвегии, Польши. Примерами работ с применением метода в геологических науках могут служить исследования макропористости почвы [5], палеонтологии [6], седиментологии [7], изучение пористости пород-коллекторов [8].

В СССР метод впервые описан в 1985 г. [9], для системного исследования горных пород впервые применен в 1991–1992 гг. [10, 11]. С 2000-х гг. исследования образцов керн методом рентгеновской томографии начали проводиться в России всё более широко [12, 13]. Основными центрами проведения рентгенотомографических исследований керн на данный момент являются МГУ им. М.В. Ломоносова, Московский центр исследований Schlumberger, ЦКП «Микроанализ» (Сколково), ВНИГРИ (Санкт-Петербург), СИБКОР, ТННЦ (Тюмень), ТомскНИПИнефть ВНК, Казанский федеральный университет.

Уровни исследований вещества и метод рентгеновской томографии

Согласно классификации уровней структуры вещества принято выделять четыре масштабных уровня детализации, которые называют макроструктурой (> 1 мм), мезоструктурой (0,2–1 мм), микроструктурой (1–100 мкм) и наноструктурой (< 1 мкм). Сопоставление уровней исследования, методов и объектов приведено в таблице.

Согласно вышеприведенной классификации возможно выделить типы исследований керн методом рентгеновской томографии по уровням исследования вещества:

1. Изучение полноразмерного керн ($d = 100$ мм, $h = 1000$ мм) соответствует

Масштабные уровни исследований керн [14]

Масштабы детализации	Макроструктура	Мезоструктура	Микроструктура	Наноструктура
Объекты в структуре горных пород	Каверны, трещины, макрофоссилии, крупные зерна	Зерна, поры, трещины	Межзерновое пространство, микропоры, микротрещины, перлитовые частицы	Кристаллическая структура, межзеренная структура
Возможные методы исследований	Визуальные исследования; ультразвуковая инспекция	Оптическая микроскопия; растровая электронная микроскопия	Растровая и просвечивающая микроскопия; атомно-силовая микроскопия	Рентгеновская дифракция; сканирующая туннельная микроскопия; просвечивающая электронная микроскопия
Доступность для метода рентгеновской томографии	Доступны для большинства рентгеновских томографов		Доступен для высококоразрешающих томографов	Доступен для нанотомографов

макро- и микроуровням, проводится с целью выявления литологических неоднородностей, зон трещиноватости и участков локализации каверн. Разрешение не позволяет выделять непосредственно межзерновые поры в карбонатных и терригенных коллекторах. Однако этого разрешения достаточно для выявления макронеоднородностей строения керна размером более 0,4 мм. Это касается как неоднородностей изометричной формы, так и трещин, имеющих очень малую толщину. Томография полноразмерных образцов используется как экспресс-анализ при профильных исследованиях, в высокопроизводительных массовых исследованиях керновых центров и как метод исследования трещиноватых образцов, изготовление из которых стандартных образцов не представляется возможным. Результаты томографии полноразмерного керна используются для определения типа коллектора, расчета объемов полостного пространства, приходящегося на каверны, и корреляции данных, полученных при геофизических исследованиях скважин и лабораторных петрофизических исследованиях [15].

Перспективным направлением томографии полноразмерного керна является выделение зон развития трещиноватости. Так, в работе [16] для ряда карбонатных залежей Пермского края приведены примеры несоответствия динамики добычи геологическим запасам нефти, подсчитанным на основе стандартных методов. Использование томографии полноразмерного керна в комплексе с методом гидродинамических исследований скважин позволило в работе [17] обосновать это несоответствие развитием зон трещинно-порового типа.

2. Томография стандартных петрофизических образцов ($d = 30$ мм) соответствует макро- и микроуровням, позволяет изучать структурно-морфологические признаки, геометрию пустотного пространства (поры, каверны, трещины), а также проводить контроль качества изготовления образцов, т.е. соответствие их ориентировки напластования параллельной или перпендикулярной. Кроме того, исследования стандартных петрофизиче-

ских образцов методом рентгеновской томографии позволяют оценить влияние микронеоднородностей и слоистости керна на характер распределения жидкости, электрических и акустических свойств в породах-коллекторах.

3. Томография образцов керна диаметром менее 30 мм (как правило, 15 и 9 мм) соответствует обычно микро- и наноуровню, позволяет исследовать состав минеральных компонентов и их взаимоотношение в пространстве, объемные и поверхностные характеристики выделяемых компонент, тип цемента, структуру порового пространства, оценку распределения флюидов. В этой же группе рентгеновская томография образцов керна неправильной формы и небольших размеров (менее 30 мм) – это шлам, сколы, которые соответствуют микроуровню. Исследования образцов такого типа сводятся к изучению структуры порового пространства, оценке эффективной пористости, характера водонасыщенности, использованию в микропалеонтологических исследованиях [18] и проводятся при отсутствии кернового материала, размеры которого позволяют изготовить стандартные образцы. Исследования в области нанотомографии являются в настоящий момент одними из наиболее актуальных в мировой практике, на основании данных исследований проводится цифровое математическое моделирование керна, позволяющее смоделировать различные физические процессы, происходящие в керне горной породы, на пласт путем масштабирования [19]. Недостатком можно считать то, что подобные виды исследований требуют очень больших вычислительных мощностей, соответствующих суперкомпьютерам, и специализированных систем хранения больших данных, поскольку модели высокого разрешения содержат на порядки большее количество информации.

Размеры исследуемых образцов обусловлены техническими характеристиками томографов (мощностью рентгеновской пушки, расстоянием до приемника, габаритами детектора). При увеличении разности потенциалов (клю-

чевая характеристика данного вида облучения) возрастает проникающая способность рентгеновских лучей, но при этом увеличивается размер фокусного пятна, что негативно сказывается на результате сканирования объектов. Соответственно, под конкретный размер образцов керн должен использоваться томограф с определенным диапазоном основных характеристик рентгеновского излучения (рабочая разность потенциалов, максимальная мощность).

Направления исследований

Многообразие направлений применения метода в области исследований керн пород-коллекторов нефти и газа можно условно разделить на две группы:

1. Исследование пустотного пространства пород без флюида. Благодаря высокому контрасту между твердой фазой и атмосферой возможно исследовать микроструктуры пор и трещин, их распределение и морфологию, а также выделять включения рентгеноконтрастных минералов. С помощью мощных рентгеновских трубок возможно исследование структуры пор на крупных образцах размерами в несколько сантиметров с довольно высокой детализацией в сотые доли миллиметра. Сюда же относятся и высокодетализированные исследования микро- и нанотомографов.

2. Исследование пород с флюидом. Изучение пород, заполненных нефтью либо моделью пластовой воды, осложнено тем, что жидкости, как правило, имеют низкую плотность, вследствие чего их довольно сложно выделить с помощью метода рентгеновской томографии. Для устранения этого недостатка часто применяют рентгеноконтрастные вещества, одним из самых распространенных является йодид натрия. С помощью метода можно проводить оценку флюидонасыщенности и распределения фронта движения флюида при определении фазовых проницаемостей и характере распределения остаточной воды в образцах при снятии кривой капиллярного давления.

По характеру получаемых моделей виды исследования можно разделить на статичные и динамичные. В статичных моделях объект не подвергается какому-либо воздействию, благодаря чему исследование возможно на образцах разных размеров и с высокой детализацией. В динамичных моделях на керн может проводиться какое-либо воздействие в процессе съемки, например фильтрация. Результатом подобных исследований могут являться как серии изображений, так и анимированные модели в реальном времени. Технические ограничения, вызванные необходимостью подключения установок к кабине исследования и исключающие применение высокоразрешающих томографов, заключением образцов в держатели, а также требованием очень больших вычислительных мощностей, не позволяют проводить данные исследования с высокой детализацией.

В качестве дополнения к методу рентгеновской томографии возможно применение других методов визуализации образца. К ним относятся оптическая и электронная микроскопия, нейтронная и синхротронная томография.

Большое преимущество метода микроскопии заключается в высокой степени разрешающей способности, позволяющей детально увидеть мельчайшие частицы и пустоты, такие как поры межзернового пространства. Оптическая микроскопия требует изготовления шлифов, что противоречит неразрушающему принципу рентгеновской томографии, хотя в целом метод может использоваться для корреляции качественных и количественных данных. Более перспективен метод электронной сканирующей микроскопии [20], не требующий разрушения образца для съемки его поверхности. Метод позволяет также определить химический состав минеральных зерен и включений, что существенно дополняет возможности описания образцов и распределение их минералогического состава. В то же время сопоставление конкретных участков образца, изученных на электронном микроскопе и с помощью рент-

геновского томографа, на практике сталкивается с рядом трудностей: 1) размер максимального поля видимости образца в электронном микроскопе составляет около миллиметра, тогда как метод рентгеновской томографии позволяет работать со всем образцом; 2) низкое, по сравнению с микроскопом, разрешение томографии и отсутствие необходимой детализации не позволяет точно совместить исследуемые участки образца; 3) особенность процесса обработки рентгеновских изображений не позволяет качественно изучить поверхность образца, поскольку работа ведется с внутренним объемом, тогда как электронный микроскоп ограничен исключительно его поверхностью.

Таким образом, микроскопия представляет интерес как перспективный метод, дающий представление о минеральном составе изучаемой породы, а также о размерах минимальных пор в образце, что позволяет обнаружить и учесть ту часть пор, которые не обнаруживает метод рентгеновской томографии. Стоит отметить, что сочетание данных электронной микроскопии и рентгеновской томографии во многих самых современных установках уже реализуется (примером может служить Zeiss Xradia).

Методы нейтронной и синхротронной томографии отличаются от традиционного рентгеновского метода тем, что зависимость коэффициента поглощения нейтронных источников излучения нерегулярна, а синхротронное излучение имеет более высокий спектр и яркость. Применение этих типов томографии позволяет различить элементы строения, обладающие близкой плотностью и неразличимые обычным рентгеновским излучением, наблюдать поверхности их раздела и области повышенной концентрации неоднородностей [21]. Недостатками данных методов являются сравнительно низкое разрешение, долгий процесс съемки, а также пока не совершенный процесс обработки изображений. Тем не менее в дальнейшем данные методы могут быть использованы как существенно

дополняющие метод традиционной рентгеновской томографии.

Возможности современных систем рентгеновской томографии

Исходя из опыта применения метода рентгеновской томографии при изучении кернового материала на сегодняшний день можно выделить несколько групп томографов, применяемых в исследовании керн: макротомографы (применяемые в исследовании полноразмерного керн, сюда же относятся и модифицированные медицинские томографы), микротомографы с рабочим полем в несколько сантиметров (применяемые в исследованиях стандартного керн), а также нанотомографы, в некоторых случаях совмещенные со сканирующим электронным микроскопом (применяются для изучения образцов в несколько миллиметров).

Довольно широко используются томографы отечественного производства, например аппарат рентгеновской томографии НТЦ «Амплитуда» РТК-160. В связи с фиксированным расстоянием от источника излучения до приемника данная установка позволяет проводить исследования только на образцах керн диаметром 100 мм и высотой 1000 мм. Разрешающая способность установки рентгеновской томографии РТК-160 составляет не более 0,4 мм и позволяет исследовать в основном полноразмерный керн. Модель подобного назначения существует и у производителя «Геологика», РКТ-225-ПЛ предназначена для томографии полноразмерного керн в условиях пластового давления и температуры.

Установки, предназначенные для томографического изучения проницаемости керн, выпускают многие производители. Примером может служить автоматизированная система для рентгенографического исследования относительной проницаемости AXRP-300 производителя Corelab. Установка предназначена для получения данных об относительной проницаемости и измеряет насыщение водой непосредственно во время вытеснения нефти водой в стацио-

нарных и нестационарных состояниях. Насыщение водой измеряется как функция времени, скорости потока и длины по продольной оси керна.

Томографы серии Tomoscan фирмы Phillips наиболее часто применяются в медицинских исследованиях. Эта серия сканеров использует систему сбора данных rotate – rotate (вращение – вращение), в которой и источник рентгеновского излучения, и матрица детекторов вращаются вокруг образца. Рентгеновская трубка смонтирована на аппаратурном кольце, напротив матрицы из радиационных детекторов. Кольцо вращается на 360° вокруг сканируемого образца.

Близкие по конструкции томографы выпускают фирмы Toshiba, Siemens Somatom. Данная конфигурация делает подобные модели удобными для исследования динамики движения флюидов в полноразмерном керне большой длины. Достоинствами ее являются высокая скорость работы, возможность наблюдения движения в реальном времени, а также исследование керна в специальных рентгенопрозрачных установках, позволяющих создавать пластовые условия. Недостатками является сравнительно низкое разрешение (около 0,5 мм) и ограничение размеров исследуемых образцов крупногабаритным полноразмерным керном.

Линейку промышленных микро- и макрофокусных томографов производит американская компания General Electric. Эти модели оснащены самыми мощными рентгеновскими трубками до 450 кВ (модель v|tome|x L 450), что позволяет исследовать крупные объекты с высокой степенью поглощения. Многие модели оснащены дополнительной рентгеновской трубкой и меняющим расстояние до объекта детектором, что повышает точность детализации получаемого изображения до 1 мкм. Данные системы предназначены в первую очередь для промышленности – металлообработки, литья, машиностроения. Однако применение в исследованиях горных пород также вполне возможно, в первую очередь для крупных полноразмерных образцов.

Установки рентгеновской микротомографии производства компании Nikon Metrology обладают схожей конструкцией и функциональностью. В модельном ряде присутствуют установки с максимальной мощностью трубки от 180 до 450 кВ, возможностью применения доплнительной рентгеновской трубки и детекторов различного разрешения. Система обработки рентгеновских изображений позволяет использовать несколько рабочих станций, что помогает разделить процессы реконструкции и дальнейшей работы с объемными моделями. Некоторые модели могут быть оборудованы доплнительными установками для барических и геомеханических исследований. Одним из основных достоинств этих моделей является универсальность, позволяющая проводить исследование как в макро-, так и в микрофокусном режиме. Хорошо подходящим для исследований является томограф ХТ Н 225, имеющий рабочую разность потенциалов в диапазоне с верхним порогом не менее 210 кВ и конструкцией, позволяющей менять расстояние от рентгеновской трубки до приемника. Томограф может работать с образцами широкого диапазона размеров: от нескольких миллиметров в поперечнике и до полноразмерных образцов керна, включая стандартные образцы диаметром 30 мм.

Большой популярностью пользуются модификации томографических систем SkyScan американской корпорации Bruker. Многие модели позиционируются как предназначенные для использования в исследованиях в том числе и пород-коллекторов нефти и газа. Модельный ряд наиболее широко используемых томографов представлен преимущественно системами с небольшим диапазоном напряжения (до 100 кВ), что обусловливает небольшие размеры объектов исследования, однако позволяет исследовать объекты с высокой степенью разрешения. Новые модели микротомографов SkyScan (1272, 2211) значительно улучшили свои характеристики за счет увеличения размеров кабины и примене-

ния усовершенствованной схемы с двумя источниками рентгеновского излучения и перемещающихся детекторов высокого разрешения. Применение данных технических решений позволило уменьшить детализацию исследуемых объектов до долей микрона и сделало возможным изучение порового пространства пород с минимальными размерами пор.

Одним из ведущих производителей высокоразрешающих микро- и нанотомографов является компания Zeiss. Линейка томографов Xradia обладает оптической системой, позволяющей масштабировать получаемые изображения. Модель 810 Ultra, с минимальным разрешением в 50 нм, может быть оборудована установкой, позволяющей проводить эксперименты на образцах, и имеет детектор, приближающий результат к синхротронной томографии.

Применение съемки высокого разрешения всё еще ограничивается размерами образца, поскольку объекты размером в десятки миллиметров требуют большого диапазона напряжения в источнике рентгеновского излучения, что ухудшает разрешающую способность установки. Кроме того, обработка массивов данных высокого разрешения очень сильно ограничивается возможностями рабочей станции, поскольку для моделирования трехмерных объектов крупных размеров требуется на порядок большая вычислительная мощность процессора и графических карт. Данные обстоятельства позволяют применять высокоразрешающую микротомографию пока только лишь для объектов небольших размеров (до 10 мм).

Опыт рентгенотомографических исследований в Пермском национальном исследовательском политехническом университете

С конца 2011 г. в Пермском национальном исследовательском политехническом университете проводятся исследования керна на базе системы рентгеновского контроля с функцией компьютерной томографии Nikon Metrology XT H 225. Рабочая разность потенциалов установки

от 30 до 225 кВ, габариты детектора 200 × 250 мм, расстояние от источника до приемника 1000 мм.

В период 2012–2015 гг. в лаборатории петрофизики ПНИПУ проводились исследования на большом количестве кернового материала, в том числе для территорий Пермского края, Красноярского края, Республики Коми, Республики Ирак, Республики Узбекистан.

Для анализа проекций и последующей визуализации 3D-модели использовался программный продукт Avizo Fire. Томографические исследования во всех случаях контролировались стандартными петрофизическими исследованиями керна. Петрофизические исследования позволяли получить осредненную по объему образца количественную оценку основных коллекторских свойств, томографические – оценить литологическую неоднородность на микроуровне, получить трехмерную модель структуры пустотного пространства. Были проведены работы по изучению полноразмерного, стандартного керна и образцов от 20 до 5 мм.

Исследования полноразмерного керна проведены как для карбонатных, так и терригенных коллекторов. Для карбонатных полноразмерных образцов методом томографии уверенно выделены рентгеноконтрастные включения, каверны, трещины (как правило, сомкнутые, иногда раскрытые с шириной до 1 мм).

На стандартных образцах керна проведены исследования методом рентгеновской томографии также и для карбонатных (доломиты, известняки), и для терригенных (песчаники, алевролиты, алевролитистые песчаники) коллекторов. Исследование стандартных петрофизических образцов рентгенотомографическим методом позволило обнаружить каверны, определенные ранее при томографии полноразмерного керна. Томография стандартных петрофизических образцов позволила детально изучать структурно-морфологические признаки, геометрию пустотного пространства (поры, каверны, трещины).

Кроме изучения структуры пористого пространства в ПНИПУ проводятся работы по изучению стандартных и пяти-миллиметровых флюидонасыщенных образцов с целью сравнения и расчета коэффициента нефтенасыщенности и остаточной водонасыщенности. Насыщение проводится с помощью различных экспериментальных составов рентгеноконтрастных растворов.

Помимо томографических исследований на петрофизических образцах ядра диаметром 30 мм проведен стандартный комплекс исследований коллекторских свойств, предусмотренный руководящими документами. Определение физических свойств пород-коллекторов осуществлялось на автоматизированной установке для измерения пористости и проницаемости. Проведенные исследования подтвердили связь определенных с помощью томографии и стандартных методов характеристик.

Исследования ядра методом рентгеновской томографии могут быть использованы не только при решении петрофизических задач, но и для контроля лабораторного моделирования методов повышения нефтеотдачи пласта. Проводимые в ПНИПУ разработки оптималь-

ных рецептов и технологий проведения солянокислотной обработки (СКО) сопровождалась томографическими исследованиями образцов ядра до и после СКО.

Кроме решения задач нефтяной геологии, метод рентгеновской томографии может использоваться при изучении механических свойств горных пород. Так, томографические исследования образцов сильвинитов до и после проведения на них испытаний прочностных свойств дают представление о пространственном расположении образовавшихся трещин в объеме образца и количественную оценку пустотного пространства, соответствующего объемам этих трещин.

Заключение

Метод рентгеновской томографии широко применяется в нефтегазовой геологии. Современные возможности метода позволяют исследовать горные породы на различных уровнях разрешения и получать большой объем данных по фильтрационно-емкостным свойствам пород. Проводившиеся в ПНИПУ работы по изучению с помощью метода ядра пород-коллекторов показали его высокие возможности и хорошие перспективы.

Список литературы

1. Hounsfield G.N. Computerized transverse axia scanning (tomography). Part 1: Description o system // *British Journal of Radiology*. – 1973. – № 46. – P. 1016–1022. DOI: 10.1259/0007-1285-46-552-1016
2. Vinegar H.J. X-ray CT and NMR imaging of rocks // *Journal of Petroleum Technology*. – 1986. – Vol. 38. – P. 257–259. DOI: 10.2118/15277-PA
3. Vinegar H.J, Wellington S.L. Tomographic imaging of three-phase flow experiments // *Review of Scientific Instruments*. – 1986. – Vol. 58. – P. 96–107.
4. Ketcham R.A., Carlson W.D. Acquisition, optimization and interpretation of X-ray computed tomographic imagery: applications to the geosciences // *Computers & Geosciences – Special issue on three-dimensional reconstruction, modelling and visualization of geologic materials*. – 2001. – Vol. 27, iss. 4. – P. 381–400. DOI: 10.1016/S0098-3004(00)00116-3
5. Three-dimensional quantification of macropore networks in undisturbed soil cores / J. Perret, S.O. Prasher, A. Kantzas, C. Langford // *Soil Science Society of America Journal*. – 1999. – Vol. 63. – P. 1530–1543. DOI: 10.2136/sssaj1999.6361530x
6. Computed tomography of Archeopterix / V. Haubitz, M. Prokop, W. Dohring, J.H. Ostrom, P. Wellnhofer // *Paleobiology*. – 1988. – № 14. – P. 206–213.
7. Kenter J.A.M. Applications of computerized tomography in sedimentology // *Marine Geotechnology*. – 1989. – Vol. 8. – P. 201–211. DOI: 10.1080/10641198909379868
8. Van Geet M., Swennen R., Wevers M. Quantitative analysis of reservoir rocks by microfocus X-ray computerised tomography // *Sedimentary Geology*. – 2000. – № 132. – P. 25–36. DOI: 10.1016/S0037-0738(99)00127-X
9. Вайнберг Э.И., Казак И.А., Файнгойд М.Л. Рентгеновская вычислительная томография по методу обратного проецирования с фильтрацией двойным дифференцированием // *Дефектоскопия*. – 1985. – № 2. – С. 31–39.
10. Хозинов М.С., Вайнберг Э.И. Вычислительная микротомография – новая информационная технология неразрушающего исследования внутренней микроструктуры образцов геологических пород // *Геоинформатика*. – 1992. – № 1. – С. 42–50.
11. Шлыков В.Г. Рентгеновские исследования грунтов. – М.: Изд-во МГУ, 1991. – 184 с.
12. Якушина О.А., Ожогина Е.Г., Хозинов М.С. Рентгеновская вычислительная микротомография – неразрушающий метод структурного и фазового анализа // *Мир измерений*. – 2003. – № 10. – С. 12–17.
13. Еременко Н.М., Муравьева Ю.А. Применение методов рентгеновской микротомографии для определения пористости в керне скважин [Электронный ресурс] // *Нефтегазовая геология. Теория и практика*. – 2012. – Т. 7, № 3. – URL: http://www.ngtp.ru/rub/2/35_2012.pdf (дата обращения: 15.02.2015).
14. Брандон Д., Каплан У. Микроструктура материалов. Методы исследования и контроля. – М.: Техносфера, 2004. – 384 с.
15. Костин Д.К., Кузнецов Е.Г., Вилесов А.П. Опыт ООО «ТННЦ» по изучению ядра с помощью рентгеновского компьютерного томографа // *Науч.-техн. вестник ОАО «НК «Роснефть»*. – 2014. – № 3. – С. 18–22.
16. Оценка коэффициентов излучения нефти для месторождений Пермского края на основе статистических моделей / С.В. Галкин, Т.Б. Поплаухина, А.В. Распопов, Г.П. Хижняк // *Нефтяное хозяйство*. – 2009. – № 4. – С. 38–39.

17. Определение параметров трещиноватости пород на основе комплексного анализа данных изучения керн, гидродинамических и геофизических исследований скважин / С.С. Черепанов, И.Н. Пономарева, А.А. Ерофеев, С.В. Галкин // Нефтяное хозяйство. – 2014. – № 2. – С. 94–96.
18. Журавлев А.В., Вевель Я.А. Возможности использования вычислительной микротомографии в микропалеонтологических и литологических исследованиях [Электронный ресурс] // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2012. – Т. 7, № 2. – URL: http://www.ngtp.ru/rub/2/21_2012.pdf (дата обращения: 15.02.2015).
19. Denney D. Digital Core Laboratory: Reservoir-Core Properties Derived From 3D Images // *Journal of Petroleum Technology*. – 2004. – Vol. 56, iss. 05. – P. 66–68. DOI: 10.2118/0504-0066-JPT
20. Van Geet M., Swennen R., David P. Quantitative coal characterisation by means of microfocus X-ray computer tomography, colour image analysis and back scatter scanning electron microscopy // *International Journal of Coal Geology*. – 2001. – Vol. 46, iss. 1. – P. 11–25. DOI: 10.1016/S0166-5162(01)00006-4
21. Синхротронная и нейтронная томография для исследования палеонтологических объектов / А.А. Калоян, Е.С. Коваленко, А.В. Пахневич, К.М. Подурец, С.В. Рожнов, В.А. Соменков // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. – 2014. – № 11. – С. 5–11.

References

1. Hounsfield, G.N. Computerized transverse axia scanning (tomography). Part 1. Description o system. *British Journal of Radiology*, 1973, no. 46, pp. 1016-1022. DOI: 10.1259/0007-1285-46-552-1016
2. Vinegar H.J. X-ray CT and NMR imaging of rocks. *Journal of Petroleum Technology*, 1986, vol. 38, pp. 257-259. DOI: 10.2118/15277-PA
3. Vinegar H.J., Wellington S.L. Tomographic imaging of three-phase flow experiments. *Review of Scientific Instruments*, 1986, vol. 58, pp. 96-107.
4. Ketcham R.A., Carlson W.D. Acquisition, optimization and interpretation of X-ray computed tomographic imagery: applications to the geosciences. *Computers & Geosciences. Special issue on three-dimensional reconstruction, modelling and visualization of geologic materials*, 2001, vol. 27, iss. 4, pp. 381-400. DOI: 10.1016/S0098-3004(00)00116-3
5. Perret J., Prasher S.O., Kantzas A., Langford C. Three-dimensional quantification of macropore networks in undisturbed soil cores. *Soil Science Society of America Journal*, 1999, vol. 63, pp. 1530-1543. DOI: 10.2136/sssaj1999.6361530x
6. Hautitz B., Prokop M., Dohring W., Ostrom J.H., Wellnhofer P. Computed tomography of Archeopteryx. *Paleobiology*, 1988 no. 14, pp. 206-213.
7. Kenter J.A.M. Applications of computerized tomography in sedimentology. *Marine Geotechnology*, 1989, vol. 8, pp. 201–211. DOI:10.1080/10641198909379868
8. Van Geet M., Swennen R., Wevers M. Quantitative analysis of reservoir rocks by microfocus X-ray computerised tomography. *Sedimentary Geology*, 2000, no. 132, pp. 25-36. DOI: 10.1016/S0037-0738(99)00127-X
9. Vainberg E.I. Kazak I.A., Faingoiz M.L. Rentgenovskaja vychislitel'naia tomografiia po metodu obratnogo proetsirovaniia s filtratsiei dvoynym differentsirovaniem [X-ray computerized tomography with back projecting and filtration by double differentiation]. *Defektoskopiia*, 1985, no. 2, pp. 31-39.
10. Khoziainov M.S., Vainberg E.I. Vychislitel'naia mikrotomografiia – novaiia informatsionnaia tekhnologiia nerazrushaiushchego issledovaniia vnutrennei mikrostruktury obraztsov geologicheskikh porod [Computerized microtomography as a novel information technology of non-destructive inspection of rock sample's internal microstructure]. *Geoinformatika*, 1992, no. 1, pp. 42-50.
11. Shlykov V.G. Rentgenovskie issledovaniia gruntov [X-ray analysis of grounds]. *Moskovskii gosudarstvennyi universitet*, 1991. 184 p.
12. Iakushina O.A., Ozhogina E.G., Khoziainov M.S. Rentgenovskaja vychislitel'naia mikrotomografiia – nerazrushaiushchii metod strukturnogo i fazovogo analiza [X-ray computerized microtomography as a non-destructive method of structural and phase analysis]. *Mir izmereni*, 2003, no. 10, pp. 12-17.
13. Eremenko N.M., Murav'eva Iu.A. Primenenie metodov rentgenovskoi mikrotomografii dlia opredeleniia poristosti v kerne skvazhin [Application of X-ray microtomography in determining porosity of well core samples]. *Neftegazovaiia geologiia. Teoriia i praktika*, 2012, vol. 7, no. 3, available at: http://www.ngtp.ru/rub/2/35_2012.pdf (accessed 15 February 2015).
14. Brandon D., Kaplan U. Mikrostruktura materialov. Metody issledovaniia i kontroliia [Microstructure of materials. Methods of analysis and control]. *Moscow: Tekhnosfera*, 2004. 384 p.
15. Kostin D.K., Kuznetsov E.G., Vilesov A.P. Opyt OOO "TNNTs" po izucheniiu kerna s pomoshch'iu rentgenovskogo kompiuternogo tomografa [Experience of Tyumen Oil Scientific Centre in core sample studies by X-ray computerized tomograph]. *Nauchno tekhnicheskii vestnik "Rosneft"*, 2014, no. 3, pp. 18-22.
16. Galkin S.V., Poplauhina T.B., Raspopov A.V., Khizhniak G.P. Otsenka koeffitsientov izvlecheniia nefli dlia mestorozhdenii Permskogo kraia na osnove statisticheskikh modeli [Estimation of oil recovery factor for the deposits of Perm kraj by statistical models]. *Neftianoe khoziaistvo*, 2009, no. 4, pp. 38-39.
17. Cherapanov S.S., Ponomareva I.N., Erofeev A.A., Galkin S.V. Opredelenie parametrov treschinovatosti porod na osnove kompleksnogo analiza dannykh izucheniia kerna, gidrodinamicheskikh i geofizicheskikh issledovaniia skvazhin [Calculating rock fracturing parameters by integrated analysis of core data, hydrodynamic and geophysical well study]. *Neftianoe khoziaistvo*, 2014, no. 2, pp. 94-96.
18. Zhuravlev A.V., Vevel' Ia.A. Vozmozhnosti ispol'zovaniia vychislitel'noi mikrotomografii v mikropaleontologicheskikh i litologicheskikh issledovaniakh [Using computerized microtomography in micropaleontologic and litologic studies]. *Neftegazovaiia geologiia. Teoriia i praktika*, 2012, vol. 7, no. 2, available at: http://www.ngtp.ru/rub/2/21_2012.pdf (accessed 15 February 2015).
19. Denney D. Digital Core Laboratory: Reservoir-Core Properties Derived From 3D Images. *Journal of Petroleum Technology*, 2004, vol. 56, iss. 05, pp. 66-68. DOI: 10.2118/0504-0066-JPT
20. Van Geet M., Swennen R., David P. Quantitative coal characterisation by means of microfocus X-ray computer tomography, colour image analysis and back scatter scanning electron microscopy. *International Journal of Coal Geology*, 2001, vol. 46, iss. 1, pp. 11-25. DOI: 10.1016/S0166-5162(01)00006-4
21. Kaloiian A.A., Kovalenko E.S., Pakhnevich A.V., Podurets K.M., Rozhnov S.V., Somenkov V.A. Sinkhrotronnaia i neutronnaia tomografiia dlia issledovaniia paleontologicheskikh ob'ektov [Synchrotron and neutron tomography for research of paleontologic formations]. *Poverkhnost'. Rentgenovskie, sinkhrotronnnye i neutronnye issledovaniia*, 2014, no. 11, pp. 5-11.

Об авторе

Савицкий Ян Владимирович (Пермь, Россия) – аспирант кафедры геологии нефти и газа Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29; e-mail: yanpgu@gmail.com).

About the author

Ian V. Savitskii (Perm, Russian Federation) – Postgraduate Student, Department of Oil and Gas Geology, Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolsky av., 29; e-mail: yanpgu@gmail.com).

Получено 16.03.2015

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Савицкий Я.В. Современные возможности метода рентгеновской томографии при исследовании керн нефтяных и газовых месторождений // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело*. – 2015. – № 15. – С. 28–37. DOI: 10.15593/2224-9923/2015.15.4

Please cite this article in English as:

Savitskii I.A.V. Current features of x-ray tomography in examination of core samples from oil and gas deposits. *Bulletin of PNRPU. Geology. Oil & Gas Engineering & Mining*, 2015, no. 15, pp. 28-37. DOI: 10.15593/2224-9923/2015.15.4