

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2018, №3, Том 10 / 2018, No 3, Vol 10 <https://esj.today/issue-3-2018.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/78NZVN318.pdf>

Статья поступила в редакцию 21.04.2018; опубликована 19.06.2018

Ссылка для цитирования этой статьи:

Воробьев К.А., Воробьев А.Е., Тчаро Х. Цифровизация нефтяной промышленности: технология «цифровой» керн // Вестник Евразийской науки, 2018 №3, <https://esj.today/PDF/78NZVN318.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

For citation:

Vorobyev K.A., Vorobev A.E., Tcharo H. (2018). Oil industry digitization: technology "digital" core. *The Eurasian Scientific Journal*, [online] 3(10). Available at: <https://esj.today/PDF/78NZVN318.pdf> (in Russian)

УДК 55

Воробьев Кирилл Александрович

ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов», Москва, Россия

Бакалавр

E-mail: k.vorobyev98@mail.ru

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5792-3979>

РИНЦ: http://elibrary.ru/author_profile.asp?id=887256

SCOPUS: <http://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57193517186>

Воробьев Александр Егорович

НАО «Атырауский университет нефти и газа», Атырау, Казахстан

Проректор по научной деятельности инновациям

Доктор технических наук, профессор

E-mail: fogel_al@mail.ru

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7324-428X>

РИНЦ: http://elibrary.ru/author_profile.asp?id=127898

Researcher ID: <http://www.researcherid.com/rid/C-1918-2016>

SCOPUS: <http://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=7201693273>

Тчаро Хоноре

Университет Абомей-Калави, Того, Республика Бенин

Руководитель группы международных научных проектов

Цифровизация нефтяной промышленности: технология «цифровой» керн

Аннотация. Показано развитие цифровизации нефтяной отрасли: одним из путей которого является технология «цифрового» керна. Детализированы существующие томографы, принципы их работы и основные особенности конструкции. Описана инновационная цифровая технология снятия томографии и последующего формирования виртуальной модели образца керна. Дано объяснение повышению эффективности при цифровом сканировании и описании пор и трещин керна.

Ключевые слова: цифровизация; томография; керн; структура; внутреннее строение

Введение

Современные цифровые услуги представляют собой совершенно новый сегмент мирового рынка, который в настоящее время довольно интенсивно развивается: так, его рост

составляет порядка 50 % в год. В геологии цифровые услуги – это, прежде всего, «цифровой» керн. В целом, мировой рынок продуктов и услуг по исследованию образцов горных пород равняется величине 2 млрд \$ в год, а в России этот показатель оценивается в 100 млн \$.

В последнее время имеются значительные подвижки в получении отображений внутренней структуры горных пород [1]: так, применение технологий высокопроизводительных вычислений существенно ускорило разработку и использование инструмента “цифровой” керн в дополнение к существующим традиционным лабораторным измерениям, обеспечивая более быстрое и эффективное исследование их структуры, свойств и характеристик.

Отметим, что традиционные технологии исследования кернов обладают рядом серьезных недостатков [5]: они осуществляются в течение весьма длительного (порядка полугода) периода времени, довольно дорогостоящи, и, как правило, приводят к определенному разрушению исследуемого образца. Поэтому в современных условиях повышения роли нетрадиционных нефтяных коллекторов (представляющих собой сложно построенные и неоднородные геологические структуры), настоятельно требуется кардинальное усовершенствование имеющихся подходов к исследованию керна, способных существенно повышать точность оценки фильтрационно-емкостных свойств пород [6].

Основная часть

Специфика цифровой технологии исследования кернов заключается в потенциально возможном нахождении в их очень малых размерных (существенно меньше микрона) порах и трещин полезных ископаемых, а также в чрезвычайно разнообразности и сложности их внутренней структуры [4]. При этом необходимо отметить, что по запасам нефти в слабопроницаемой (поры, в которых вкраплены углеводороды, зачастую имеют размеры от 10 до 100 нанометров) баженовской свите Россия занимает первое место в мире.

Поэтому во всем мире развивают этот относительно новый и перспективный метод исследования кернов (в данном направлении успешно работают Ingrain и Lithicon, США, а также iRock Technologies, Китай и др.), а в России он находится еще лишь на начальной стадии [4]. Хотя надо отметить, что российская компания «Системы для микроскопии и анализа» и Тюменский научный нефтяной центр по заказу «Роснефти» совместно уже провели ряд пилотных проектов (в том числе, исследование образцов ачимовской и баженовской нефтеносных свит).

Кроме существенного уменьшения времени исследования, цифровая технология позволяет измерять даже те параметры керна, которые были ранее принципиально недостижимы: в частности, можно получить качественно-количественные показатели проницаемости каждого конкретного сегмента образца породы (даже если он – неправильной и довольно сложной формы).

При чем данная технология позволяет «видеть» керн буквально «насквозь», а также выявлять его внутренние нетипичные области и неоднородности (внешний визуальный осмотр образца часто не дает даже принципиальной возможности увидеть его внутренние особенности) [5].

Отметим, что для горных пород нефтеносных коллекторов, проницаемость является макроскопическим параметром, представляющим существенный практический интерес, и ее количественное определение имеет важное значение для прогнозирования нефтепритоков в скважине [1].

При этом, в макромасштабе, поток флюидов обычно описывается с помощью с помощью закона Дарси, на основе численного определения проницаемости горных пород коллектора, которая может быть оценена путем интегрирования отдельных струек [1]. А в масштабе поры, имеющаяся в ней единственная фазовая струйка описывается уравнением Стокса.

Этот переход между такими противоположными масштабами миграции флюидов имеет несколько важных практических аспектов, которые уточняют значение полученной на основе произведенных вычислений величины проницаемости горных пород [1].

Задачи моделирования течения в поровом пространстве горных пород нефтеносных коллекторов флюидов характеризуются весьма большой размерностью (порядка 10^9 ячеек), а также довольно сложной геометрией и многообразными физическими процессами (многокомпонентностью, многофазностью, неизотермичностью, химическими реакциями и др.).

Поэтому технология «цифрового» моделирования ядра является весьма востребованным направлением обеспечения решения многих прикладных задач разведки (рис. 1) и добычи трудноизвлекаемых запасов нефти (применимое с высокой степенью эффективности, в том числе, и к сланцевой нефти, а также для нефтей баженовской свиты) [4].



Рисунок 1. Роль цифрового ядра [5]¹

Одним из сравнительно новых для нефтяной отрасли методов анализа горных пород, существенно дополняющих и расширяющих возможности традиционных, является рентгеновская томография ядра (образцов горных пород, полученных в форме цилиндра в

¹ Здесь и далее использованы рисунки из презентации к докладу Гильманов Я.И., Патраков Д.П., Вахрушева И.А. ЦИФРОВОЙ КЕРН – НОВОЕ НАПРАВЛЕНИЕ ПЕТРОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ КЕРНА. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ В РОССИИ И МИРЕ на V научно-практической конференции «Суперкомпьютерные технологии в нефтегазовой отрасли. Математические методы, программное и аппаратное обеспечение», Москва, НОЦ "Нефтегазовый центр МГУ", 2015.

результате бурения), суть которой заключается в снятии томографии и последующем моделировании виртуальной 3-х мерной электронной модели образца керна без какого-либо его разрушения [5].

Поэтому, когда обычно говорят про «цифровой» керн (CoreFlow), то в основном имеют в виду неразрушающее исследование пространственной структуры и результаты, характеризующие его поровое пространство, полученные с помощью томографии (рис. 2). В последнее время, в такую модель еще добавили необходимые, для получения большей объективности и полноценности, данные по минералогии [5].



Рисунок 2. Рентгеновский томограф, для исследования полноразмерного керна [5]

Исходя из существующего опыта практического применения технологии рентгеновской томографии можно выделить несколько групп томографов, применяемых в исследовании керна [6]:

- макротомографы (для исследования полноразмерного керна);
- микротомографы с рабочим полем в несколько сантиметров (для исследования стандартного керна);
- нанотомографы, в некоторых случаях совмещенные со сканирующим электронным микроскопом (для изучения образцов в несколько миллиметров).

Томографы российского производства, например, аппарат рентгеновской томографии НТЦ «Амплитуда» РТК-160 нашли довольно широкое применение. Однако, фиксированное расстояние между источником излучения и приемником ограничивает проведение исследования данным аппаратом только на образцах керна размера 100 мм диаметра и 1000 мм высоты (полноразмерный керн) [6]. При этом разрешающая способность установки рентгеновской томографии РТК-160 не превышает 0,4 мм. Модель подобного назначения существует и у производителя «Геологика» (РКТ-225-ПЛ), которая осуществляет томографию также полноразмерного керна.

Многие различные производители выпускают существующие установки, предназначенные для томографического изучения проницаемости керна. В качестве примера можно привести автоматизированная система рентгенографического исследования относительной проницаемости AXRP-300 от крупнейшего производителя Corelab. Данная установка предназначена для получения данных об относительной проницаемости горных пород и позволяет измерить водонасыщенность непосредственно во время вытеснения нефти водой в стационарных и нестационарных состояниях при воздействии пластового давления и

температуры [6]. При этом водонасыщенность пласта прямо пропорционально времени, скорости потока флюидов и длины по продольной оси керна.

Томографы серии Tomoscan фирмы Phillips используют систему сбора данных «rotate – rotate» («вращение – вращение»), источник рентгеновского излучения и матрица детекторов, которые вращаются вокруг исследуемого образца [6]. Непосредственно рентгеновская трубка установлена на аппаратном кольце, напротив матрицы, из радиационных детекторов. А само кольцо вращается вокруг сканируемого образца на 360°.

Наиболее близкими по конструкции являются томографы фирм Toshiba и Siemens Somatom. Благодаря данной конфигурации подобные модели считаются весьма удобными для исследования динамики движения флюидов в полноразмерном керне большой длины [6]. Ее основными достоинствами являются высокая скорость работы, возможность наблюдения движения флюидов в реальном времени, а также исследования керна в специальных рентгенопрозрачных установках, позволяющих моделировать различные пластовые условия. Недостатками является сравнительно низкое (около 0,5 мм) разрешение и ограниченные размеры исследуемых образцов крупногабаритным полноразмерным керном.

Линейка промышленных макро- и микрофокусных томографов производится и американской компанией General Electric. На данные модели инкорпорированы самые мощные (до 450 кВ) рентгеновские трубки (модель v|tome|x L 450), которые обеспечивает исследование более крупных объектов с высокой степенью поглощения [6]. На многих таких моделях установлены дополнительная рентгеновская трубка и функция, меняющая расстояние до исследуемого объекта детектором, что во многом способствует значительному повышению детализации получаемого изображения до точности 1 мкм.

Компания Nikon Metrology обладает установкой рентгеновской микротомографии производства схожей конструкции и функциональности. В их электронном модельном ряду присутствуют установки, имеющие следующие характеристики [6]:

- максимальная мощность трубки – 180-450 кВ;
- а также возможность применения дополнительной рентгеновской трубки и детекторов различного разрешения.

При чем с помощью данной системы обработки рентгеновских изображений возможно одновременно содействовать несколько рабочих станций, что во многом облегчает разделение процессов реконструкции и дальнейшей работы с объемными моделями.

Некоторые модели аппаратов могут быть оснащены дополнительными установками для осуществления геомеханических и барических исследований [6]. Одним из главных достоинств данных моделей является их универсальность, т. е. они используются для проведения исследований как в макро-, так и в микрофокусном режиме.

Хорошо подходящим для исследований образцов керна является томограф ХТ Н 225, рабочая разность потенциалов, которого лежит в диапазоне с верхним порогом не менее 210 кВ и конструкцией с функцией регулирования расстояния от рентгеновской трубки до приемника. Этот томограф может быть для исследования образцов керна широкого диапазона размеров [6]: от нескольких миллиметров в поперечнике и до полноразмерных образцов керна (включая стандартные образцы диаметром 30 мм).

Модификации томографических систем SkyScan от американского производителя Bruker нашли довольно широкое применение. Многие модели этой компании позиционируются как предназначенные для использования в исследованиях свойств и характеристик пород-коллекторов нефти и газа.

Модельный ряд наиболее широко используемых томографов представлен преимущественно системами с небольшим диапазоном (до 100 кВ) напряжения, что обуславливает небольшие размеры объектов исследования, однако обеспечивает их оптимальное исследование с высокой степенью разрешения [6]. Характеристики новые моделей микротомографов Sky Scan (1272, 2211) были значительно улучшены за счет увеличения размеров кабины и применения усовершенствованной схемы с 2-мя источниками рентгеновского излучения и перемещающихся детекторов высокого разрешения.

Применение данных технических решений позволило уменьшить размеры исследуемых объектов до долей микрона и одновременно сделало возможным изучение порового пространства пород с минимальными размерами пор [6].

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 дополнительно оборудована установкой, позволяющей проводить эксперименты на образцах, и имеет детектор, приближающий получаемые результаты к синхротронной томографии [6].

При этом суть рентгеновской микротомографии (рис. 3) сводится к получению значительного числа рентгеновских 2-х мерных проекций ядра и последующей их реконструкции в обобщающую 3-х электронную мерную модель [5].

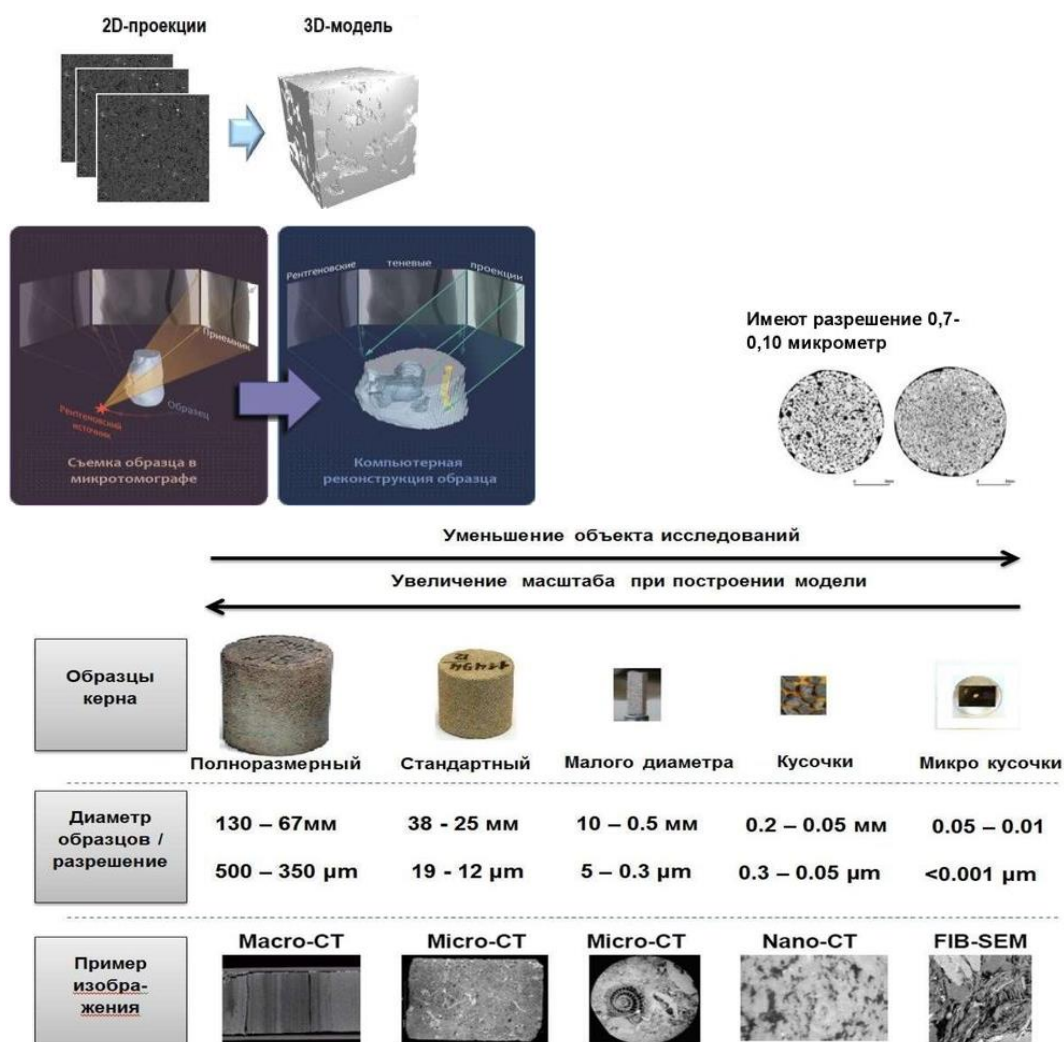


Рисунок 3. Возможности рентгеновской микротомографии [5]

В результате становится отчетливо (с очень высоким разрешением) видной внутренняя структура зерна, а кроме этого – имеющиеся между его зернами интерфейсы (рис. 4), и интерфейс между вмещающей минеральной матрицей и углеводородами [5].

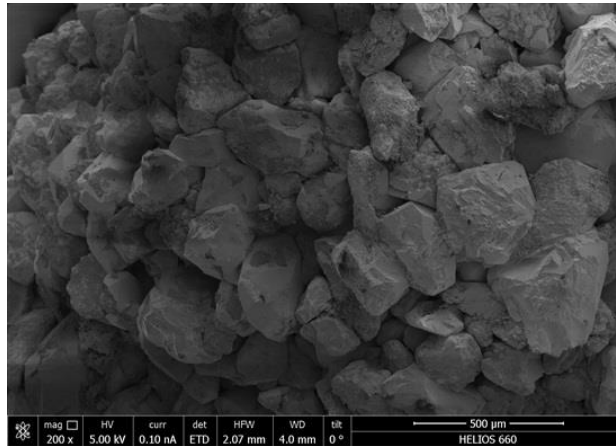


Рисунок 4. Структура строения образца песчаника с глинистым цементом [4]

Данное техническое решение, используя современные технологии изучения внутренней структуры горных пород, для построения высокоточной цифровой модели посредством использования высокопроизводительных вычислительных систем, а также быстрого и эффективного моделирования многофазного течения различных флюидов, позволяет весьма оперативно получать необходимую информацию о ключевых свойствах горных пород и одновременно тестировать эффективные технологии повышения нефтеотдачи пласта (коллектора) [2-3].

В частности, аналитическое оборудование позволяет получить следующие основные показатели и необходимую информацию о [5]:

- первичную и вторичную пористости;
- трещиноватость;
- кавернозность;
- внутреннюю морфологию пористого пространства;
- характеристика плотностных неоднородностей;
- флюидонасыщенность;
- проницаемость;
- динамика распределения флюидов;
- корреляцию данных геофизики.

При этом типичные схемы базовой аналитики, доступные через сервисы CoreFlow, включают в себя следующие возможности (рис. 5):

- сканирование и каротаж коллектора (пласта);
- визуализацию и анализ цифровых данных;
- сканирование зерна посредством электронного микроскопа (SEM) и анализ полученных при этом данных;

- моделирование порового потока флюидов на основе их прямой гидродинамики DHD.

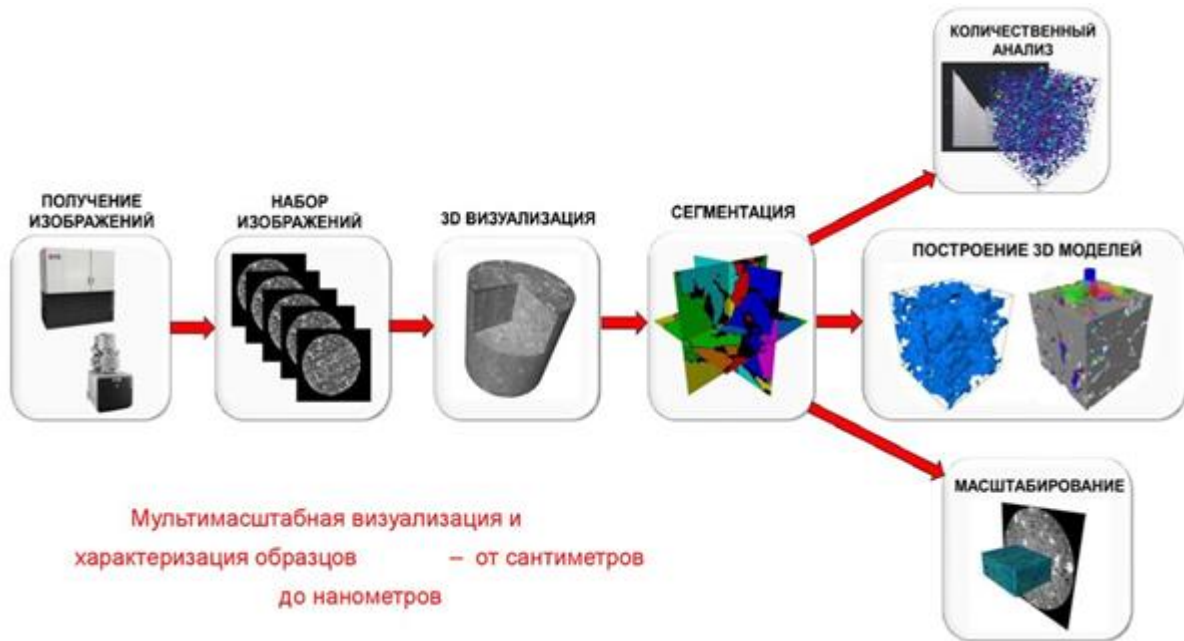


Рисунок 5. Технологический процесс получения «цифровых» моделей (рисунок авторов)

Кроме этого, используемые сервисы CoreFlow объединяют в себе физический и «цифровой» анализ породы и жидкости, создавая электронную модель 3D-резервуара, которая позволяет осуществлять количественное моделирование динамики потока флюидов по нескольким сценариям (рис. 6) [5].

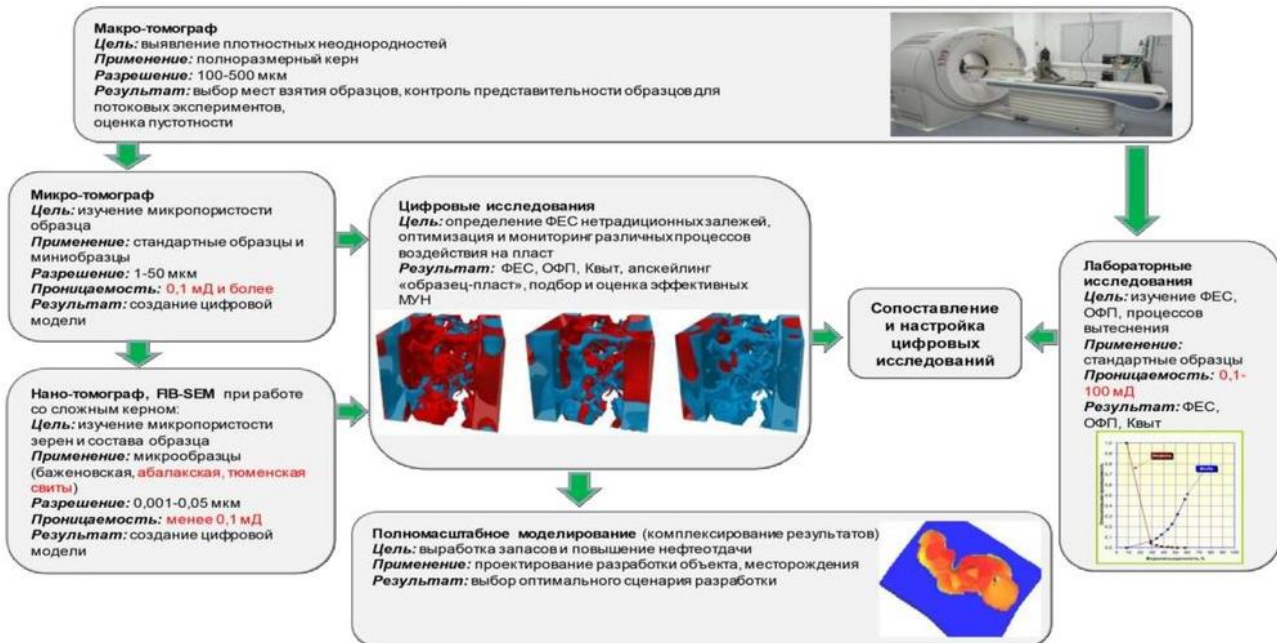


Рисунок 6. Последовательность действий в цифровой лаборатории [5]

Такой подход использует существующие физические лабораторные измерения для уточнения моделирования свойств и характеристик рабочего коллектора, что позволяет довольно точно измерять его относительную проницаемость, капиллярное давление,

показатели извлечения нефти и другие необходимые параметры (рис. 7), которые весьма важны для обеспечения оптимальной разработки резервуаров.

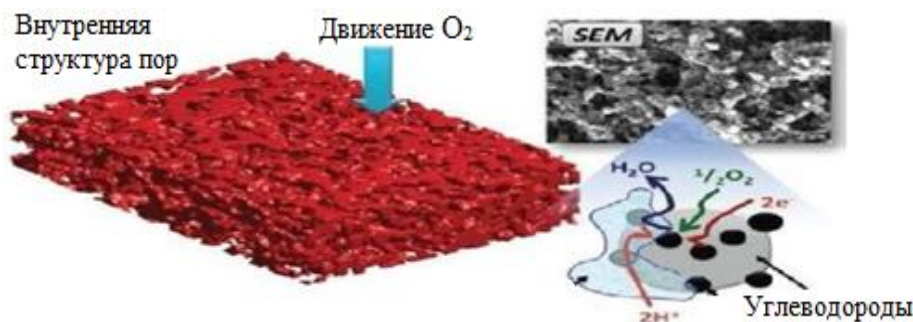


Рисунок 7. Цифровой керн [5]

Необходимо отметить, что при использовании цифровой технологии можно подготовить образец керна, визуализировать, описать (уже были проделаны первые эксперименты по полноценной 3-х мерной минералогии не на срезах или шлифах, а в объеме исследуемого образца) и полноценно охарактеризовать его (рис. 8).

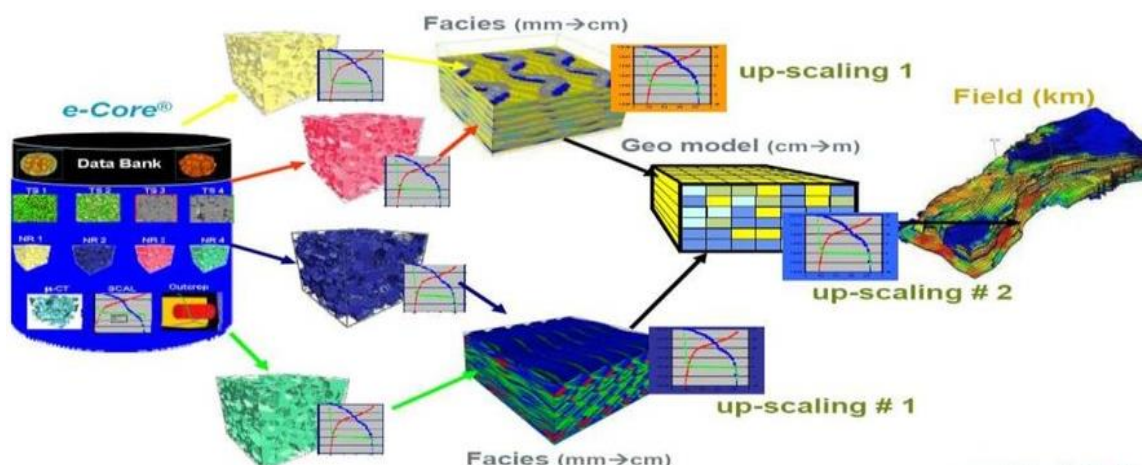


Рисунок 8. Получение комплекса петрофизических свойств образца горной породы методом математического моделирования на основе 3D микромоделли [5]

После чего выполняется математическое моделирование и обеспечивается определение основных физико-механических характеристик полученной электронной модели. Этот процесс цифрового моделирования керна обеспечивается с помощью суперкомпьютера (рис. 9, табл. 1): на обычном ПК исследования горной породы занимали бы почти столько же времени, что и исследования традиционным способом. В частности, набор снимков образца керна 5 мм в диаметре, длиной 20 мм, полученных с разрешением 3,5 мкм занимает память 40 Гбайт. Определение только лишь одной проницаемости образца, составленного в электронном виде из 4 млрд вокселей, потребовало бы 256 Гбайт памяти, а также свыше, чем 5000 часов работы центрального процессора обычного ПК. Поэтому применение суперкомпьютеров с GPU является одним из наиболее эффективных решений для реализации технологии «цифровой» керна.

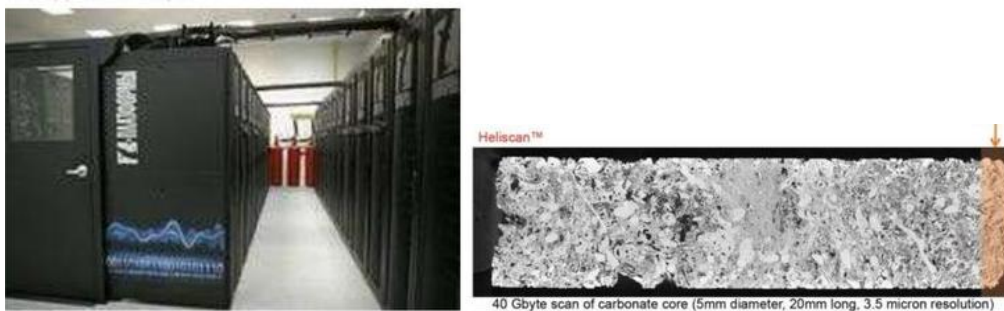


Рисунок 9. Вычислительные требования к технологии «цифровой» керн [5]

Таблица 1

Минимальные требования к ПК для работы с микротомограммами

Рабочая станция	Стандартная	Продвинутая
ЦПУ	Dual 6-core lnte < XEOM	Dua 18-core Intel XEON
Память (RAM)	32GB/1600MHz	128GB/ 1600MHz
Жесткий диск (HDD)	6TB(2x3TB. RAID0)	12TB(4x3TB. RAID0)
Видеокарта	NVIDIA Quadro + Tesla	NVIDIA Quadro + Tesla
Монитор	2x24'wide (1920x1200)	2x24" wide (1920x1200)

На суперкомпьютере этот процесс занимает от 1 недели до 1 месяца и позволяет создать вполне достоверную (с точностью до 1 нм) внутреннюю модель керна.

В процессе математического моделирования макроскопических свойств пористых сред возникает задача 3D-реконструкции микроструктуры керна и оценки связи между геометрией его микроструктуры и макроскопическими физическими свойствами [1]. Создаваемая на этой основе математическая же модель обеспечивает полноценное качественное и количественное определение показателей пористости керна, а также исследование статистики распределения имеющихся в нем трещин, проведение моделирования возможной миграции нефти и др.

В настоящее время для анализа таких процессов используется целый ряд известных математических моделей и методов расчета, среди которых [1]:

- модели поровых сетей (pore-network model);
- модели диффузной границы (Diffuse interface, Phase field);
- модели, основанные на решении уравнений Навье-Стокса/Стокса;
- метод решеточных уравнений Больцмана (lattice Boltzmann Method);
- метод сглаженных частиц (smoothed particle hydrodynamics).

Кроме того, разрабатываются различные подходы к имитационному моделированию пористых микроструктур, одним из которых является представление структуры горной породы керна в виде плотной стохастической упаковки многих микрочастиц, которые представлены сферополиэдрами, и в процесс упаковки, для учета деформации микрочастиц, добавлена процедура их дилатации [1].

Моделирование порового пространства керна осуществляется в несколько этапов (рис. 10).



Рисунок 10. Модель зерна [1]

Сначала моделируются примитивы форм зерен, текстуры и гранулометрического состава горной породы [1]. Затем каждому слою назначаются изображения, полученные с соответствующего шлифа для калибровки по пористости. После чего задаются коэффициенты заполнения порового пространства глинистым цементом. На последнем этапе указываются параметры физической модели, а также алгоритма калибровки и представления получаемых результатов. В итоге, формируется электронную модель зерна, которая в дальнейшем используется для моделирования и расчета фильтрационных процессов в пористой среде нефтеносного пласта.

В конечном результате получают огромный массив цифровых данных, обуславливающих принципиальную возможность в дальнейшем работать не с физическим образцом на прямую (который может разрушиться или оказаться так или иначе поврежденным), а уже с цифровой информацией.

При этом полноценное цифровое моделирование зерна позволяет не только спрогнозировать количество углеводородов, которое может быть извлечено из того или иного месторождения, но и спланировать основные особенности совершенствования технологии их разработки [4]. Построив, с помощью методов мультимасштабной объемной микроскопии, максимально реалистичную 3-х мерную электронную модель можно получить весьма точные интерактивные данные об интересующем пласте или обо всем месторождении в целом.

В частности, система DMT CoreScan® II позволяет производить детальный анализ геологических структур и исследовать свойства и характеристики существующей литофации (рис. 11), а также помогает определять геологические параметры исследуемого нефтяного месторождения [4].

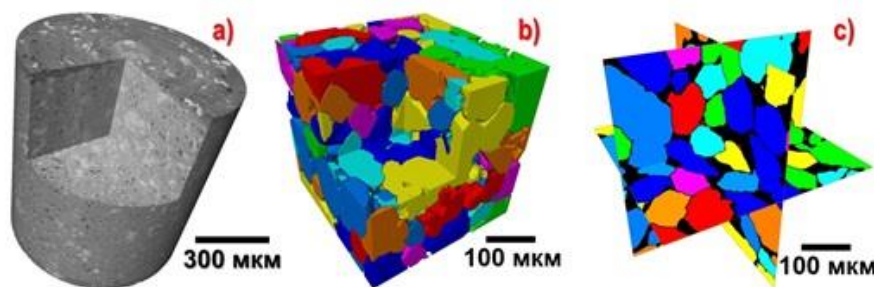


Рисунок 11. а) Модель зерна терригенного коллектора; б) 3D-модель отдельных зёрен песчаника; в) Поперечные сечения модели песчаника на этапе разделения на отдельные зерна [4]

Кроме исследований горных пород в лабораторных условиях современная аппаратура позволяет производить изучение нефтеносных коллекторов непосредственно в условиях нефтепромыслов.

Так, использование полностью интегрированного, автономного портативного сканера со встроенным ПК и цветной камерой высокого разрешения дает возможно получить и записывать изображения керна по всей окружности непосредственно на буровой площадке (производительность подобной системы составляет примерно 1-1,5 мин./метр длины керна). Проводя документацию буровых кернов таким образом, можно постоянно пополнять цифровую библиотеку исследуемого нефтяного месторождения, так, чтобы любой зарегистрированный участник проекта имел доступ к ней из любой точки мира через Интернет [4].

Такая система характеризуется несколькими конструктивными особенностями [4]:

- Получением цифровых изображений, хранением, ориентированием, и документированием данных по полной окружности (360°) для круглых кернов, а также для отщепленных кернов и кернов в коробках.
- Системой управления данными в виде изображений (для создания цифровой библиотеки буровых кернов).
- Интеграцией CoreLog в геологические профили (посредством непрерывного комбинирования кернов).
- Определением структурной ориентации с привязкой к данным геофизических исследований (ВНТВ/FMI).
- Оценкой геологических структур при помощи датчиков (залегания, расщепления, трещин, сдвиг, прожилки и т. д.).
- Оценкой истинной глубины, простираения и падения исследуемых структур.
- Оценкой геомеханических параметров.
- Разграничением фаз минералов.
- Распределением и анализ гранулометрического состава.
- Анализом пористости.
- Управлением и обеспечением качества.

Поскольку используемое программное обеспечение позволяет довольно быстро получать необходимые изображения керна, иллюстрирующие его литологические и структурные свойства (с уменьшением масштаба вплоть до микрометрических значений), то можно практически почти сразу же производить их расшифровку.

Заключение

Технология «Цифровой» керна во многом оказывается гораздо точнее (в изучении шлифов и получении физических свойств породы в лабораторных условиях) по сравнению с традиционными методами исследования, а в ряде случаев ее даже применяют в качестве единственного способа объективной оценки свойств породы и внутреннего их строения [4]. Например, применение данного метода при исследовании образцов баженовской нефтеносной свиты является единственно возможным методом оценки ее нанопористости, что позволяет более точно определить количество присутствующей в данном типе пород нефти.

Существуют также другие «проблемные» типы нефтяных коллекторов, наиболее оптимальное исследование которого обеспечивается только цифровым моделированием ядра [4]. К такому виду пород относятся породы, имеющие хрупкую структуру, в случае с которыми проведение лабораторных исследований и длительное хранение образцов крайне невозможно.

Кроме этого, технология «цифровой» ядра открывает также возможность проведения исследований на обломках образцов, шламах и прочих нестандартных образцах, что позволяет существенно облегчить задачу при оценке свойств пород-коллекторов в местах с ограниченным количеством и качеством образцов (горизонтальное бурение, образцы из боковых грунтоносков и т. д.) [4].

Необходимо также отметить, что данная проблема весьма остро стоит и на арктических шельфовых месторождениях.

При этом работа с «цифровым» ядром можно осуществлять одновременно в нескольких (даже весьма удаленных) цифровых лабораториях, т. к. получаемые данные загружаются на «облачный» сервер, откуда они могут быть легко извлечены допущенным к этому оператором из любой точки мира через Интернет.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белозеров И.П., Березовский В.В., Губайдуллин М.Г., Юрьев А.В. Моделирование микроструктуры ядра терригенных коллекторов нефти и газа с использованием вычислительного кластера САФУ им. М.В. Ломоносова // <https://elibrary.ru/item.asp?id=29731444>.
2. Воробьев А.Е., Балыхин Г.А., Гладуш А.Д. Основы техногенного воспроизводства нефти, горючего газа и угля в литосфере. Москва, 2006.
3. Воробьев А.Е., Тчаро Х. Цифровизация нефтяной отрасли Казахстана // Проблемы недропользования № 1 (16). 2018. С. 66-75.
4. Мунгалов Д. Запущена уникальная лаборатория «Цифровой ядро» // <https://sk.ru/news/b/news/archive/2016/03/17/zapuschena-unikalnaya-laboratoriyacifrovoy-kern.aspx>.
5. Гильманов Я.И., Патраков Д.П., Вахрушева И.А. ЦИФРОВОЙ КЕРН – НОВОЕ НАПРАВЛЕНИЕ ПЕТРОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ КЕРНА. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ В РОССИИ И МИРЕ // Сборник тезисов V научно-практической конференции «Суперкомпьютерные технологии в нефтегазовой отрасли. Математические методы, программное и аппаратное обеспечение», Москва, НОЦ "Нефтегазовый центр МГУ", 2015.
6. Савицкий Я.В. Современные возможности метода рентгеновской томографии при исследовании ядра нефтяных и газовых месторождений // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело № 15. 2015. С. 28-37.

Vorobyev Kirill Aleksandrovich

Russian university of people's friendship, Moscow, Russia
E-mail: k.vorobyev98@mail.ru

Vorobev Aleksander Egorovich

Atyrausky university of oil and gas, Atyrau, Kazakhstan
E-mail: fogel_al@mail.ru

Tcharo Honore

University of Abomey-Calavi, Togo, Republic of Benin

Oil industry digitization: technology "digital" core

Abstract. The development of oil industry digitalization is shown: one of the ways of which is the technology of "digital" core sample. The existing tomographs, principles of their work and main design features are detailed. The innovative digital technology for tomography recordings and subsequent formation of a virtual core sample model is described. The explanation of the increase efficiency during digital scanning and description of the core sample pores and cracks is given.

Keywords: digitalization; tomography; core sample; structure; internal structure