

## Отечественные разработки для микротомографии нефтегазовых кернов

Устинов Артем Олегович (ООО «ПРОДИС.НДТ»), Бессонов Виктор Борисович (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)

ООО «ПРОДИС.НДТ», 140030, Московская область, Люберецкий район, п. Малаховка, ул. Лесопитомник, дом 10/1, [uao@prodis.tech](mailto:uao@prodis.tech)

СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 197376, Россия, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, дом 5, [ybbessonov@yandex.ru](mailto:ybbessonov@yandex.ru)

Рентгеновская томография (КТ) является одним из основных методов диагностики и исследования различных объектов сложной формы: отливки цветных металлов, геологические породы, объекты трёхмерной печати, керамика, электроника [1]. Актуальной задачей импортозамещения является обеспечение потребностей промышленности и науки в системах рентгеновской томографии с отечественными микрофокусным источником и детектором рентгеновского излучения.

Схема детектора включает в себя: сцинтиллятор, волоконно-оптическую плиту (ВОП), КМОП сенсор, считывающую и интерфейсную электронику, подсистему питания. Рентгеновское излучение преобразуется в оптическое с помощью слоя сцинтиллятора. Так как в ряде случаев КМОП-сенсоры обладают низкой стойкостью к рентгеновскому излучению, используется разнесение слоя сцинтиллятора и сенсора с помощью ВОП. Это позволяет существенно увеличить срок жизни детектора. Во избежание потемнения ВОП при длительном воздействии рентгена используется добавки церия. Сочетание современного КМОП сенсора с цериевой ВОП позволяет создать долговечный и высокочувствительный рентгеновский детектор.

На рис.1 изображены отечественные рентгеновские детекторы, производимые по описанной выше технологии с размером пикселя 50 мкм. Формат активной зоны детекторов составляет 11,4x14,5 и 22,8x29,1 см. В настоящее время разрабатывается детектор с областью 14,5x22,8 см.

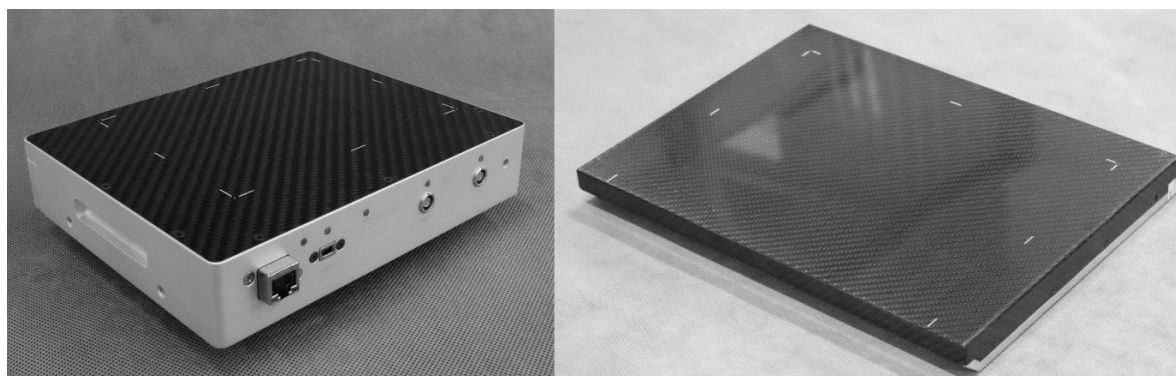


Рис.1. Детекторы Продис.Марк 1215 и 2430

В таблице 1 представлены характеристики современных детекторов на базе КМОП сенсоров. Как видно из таблицы – отечественные детекторы обладают минимальным размером пикселя и большим размером активной зоны.

Таблица 1. Характеристики существующих на рынке моделей КМОП детекторов

Модель	Пиксель, мкм	Активная зона, мм	Кол-во пикселей
Продис.Марк 1215	50	114x145	2300x2900
Продис.Марк 2430	50	228x291	4600x5800
C7942	50	120x120	2400x2400
Dexela 1207	75	114x65	1536x864
Dexela 1512	75	145x114	1944x1536
Dexela 2923	75	291x230	3888x3072
Shad-o-Box 1K HS	50	57x64	1152x1300
Shad-o-Box 3K HS	50	114x64	2940x2304
Shad-o-Box 6K HS	50	145x114	2940x2304

Основным параметром любой рентгеновской системы с микрофокусным излучателем является ее пространственное разрешение. Данная характеристика определяется размером фокусного пятна излучателя, пикселем детектора, качеством рентгеновского излучения, а также коэффициентом геометрического увеличения. Пространственная разрешающая способность может быть выражена, как [2]:

$$R = R_n \frac{K}{\sqrt{1+(K-1)^2(FR_n)^2}}, \quad (1)$$

где R – итоговая пространственная разрешающая способность, F – размер фокусного пятна, K – коэффициент геометрического увеличения, R<sub>n</sub> – пространственная разрешающая способность детектора (является функцией от размера пикселя). Для детекторов ПРОДИС.Марк эта величина составляет 10 пар линий на миллиметр. Из выражения 1 следует, что максимальная разрешающая способность будет получена при увеличении:

$$K_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{(FR_n)^2 + 1}{(FR_n)^2}}, \quad (2)$$

На рисунке 2 представлен график зависимости коэффициента геометрического увеличения при максимальной разрешающей способности от размера фокуса излучателя.

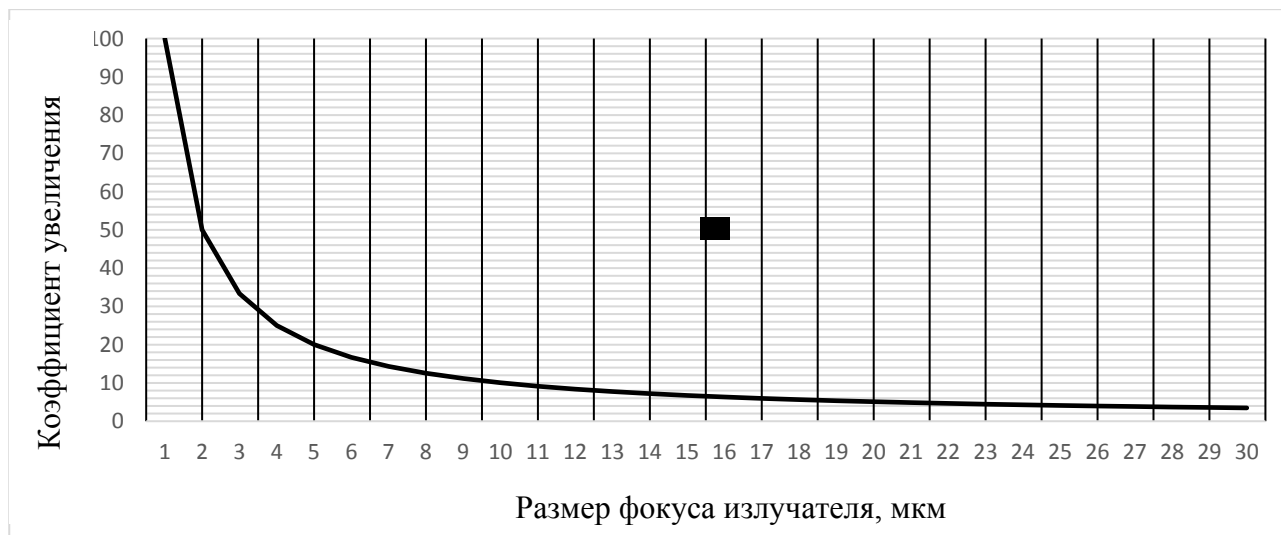


Рис.2. Зависимость коэффициента геометрического увеличения от размера фокуса излучателя

Как видно из графика, достаточное для рутинных задач микротомографии разрешение вокселя в 5 мкм, возможно при размере фокуса менее 10 мкм. Для измерения разрешения томографической системы применяется специализированный эталон JMA Test. На рис.3 представлено рентгеновское изображение эталона, полученное на микрофокусном рентгеновском аппарате РАП-150 производства компании ЗАО «ЭЛТЕХ Мед» на основе отпаянной металлостеклянной рентгеновской трубки. Различимы пары линий с разрешением 6 мкм.

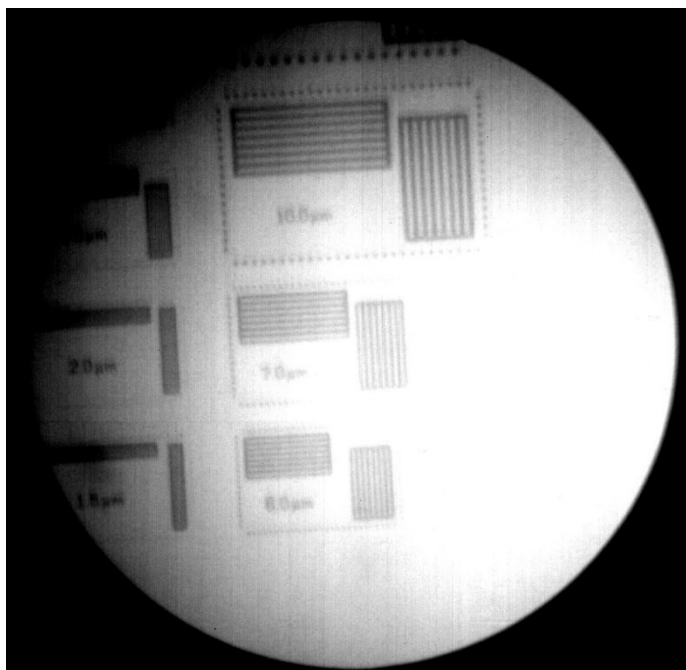


Рис.3. Снимок эталона JMA Test на аппарате РАП-150

На рисунке 4 представлен прототип установки для компьютерной томографии нефтегазового керна, произведенный компаниями ООО «ПРОДИС.НДТ», ЗАО «ЭЛТЕХ Мед» (без свинцового экрана). Ведется сборка серийной системы.

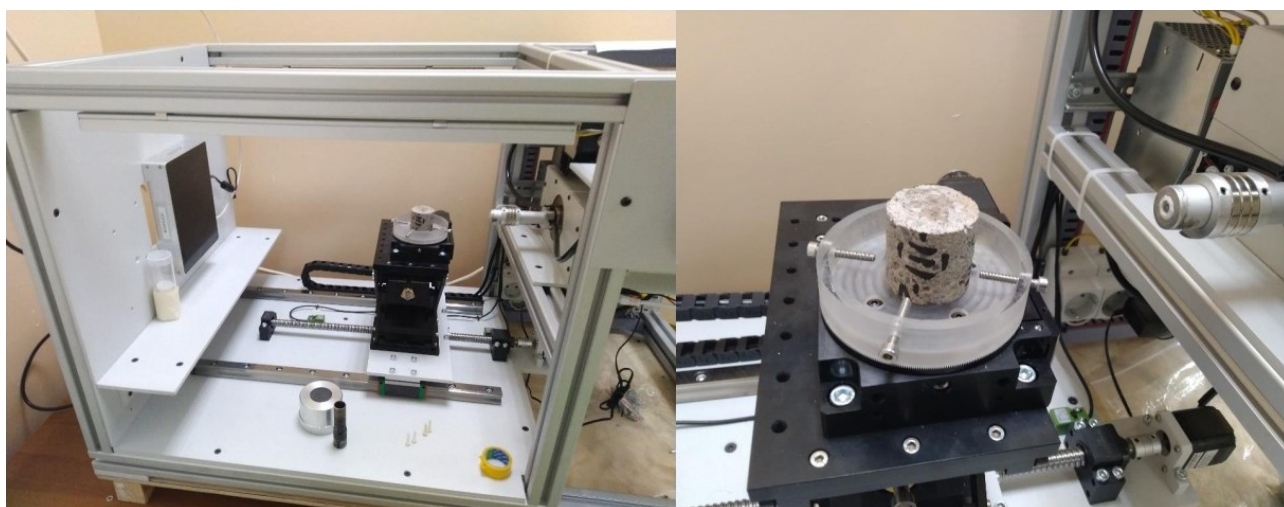


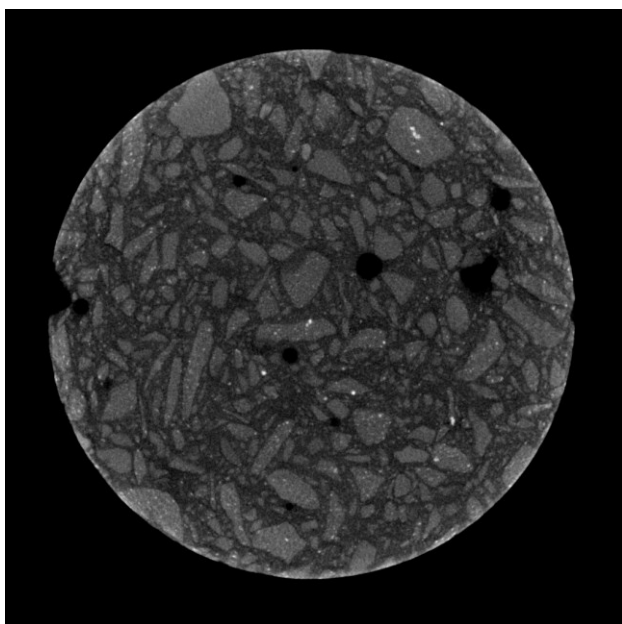
Рис.4. Прототип установки для микротомографии керна

В таблице 2 представлены характеристики различных настольных систем микротомографии иностранного производства в сравнении с разработанной.

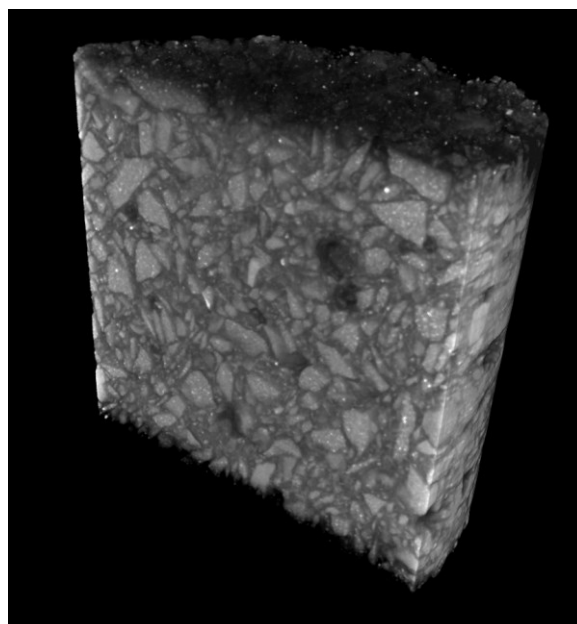
Таблица 2. Характеристики систем микротомографии керна

Параметр	Brucker Skyskan 1172	Procon CT-Compact	Wenzel Exact S	ПРОДИС. Микро
Макс разрешение, мкм	1	5	5	5
Макс диаметр объекта, мм	Ф50	Ф70	Ф75	Ф120
Макс вес объекта, кг	-	5	-	5
Тип матрицы детектора	ПЗС	КМОП	КМОП	КМОП
Разрядность матрицы детектора, бит	12	16	16	16
Размер матрицы детектора, пиксел	4000x2300	1024x1024	2300x1300	2304x2988
Размер пикселя, мкм	9	50	50	50
Анодное напряжение, кВ	до 100	до 130	до 130	до 150
Ток трубки, мкА	до 250	-	-	до 200
Мощность трубки, Вт	10	75	39	10
Размер фокусного пятна, мкм	5	7	-	10
Электропитание, В	220	220	220	220
Размер, см	125x69x36	-	89x64x60,5	80x80x110
Вес, кг	240	500	-	400

На рисунке 5 представлены результаты исследования нефтегазового керна диаметром 35 мм. Реконструкция и визуализация была выполнена в программном пакете «МикроКТ», разработанном компанией ООО «Микротомография». Расчет транспортных свойств и пористости образца возможен в программном пакете Volume Graphics.



а



б

Рис. 5. Результаты исследования нефтегазового керна

Размер пикселя разработанных детекторов позволяет достичь высокого разрешения при томографической реконструкции. Применение микрофокусного излучателя и прецизионных манипуляторов, позволяют создать отечественную систему микротомографии кернов, в том числе полноразмерных, не уступающую мировым аналогам в своем классе, а по некоторым показателям, даже превосходящую их. Актуальной задачей остается совершенствование технологии производства микрофокусных излучателей и уменьшение размера фокусного пятна до значения, составляющего менее 10 мкм, что позволит улучшить общее пространственное разрешение системы.

На следующем этапе работ предполагается оптимизировать условия проведения томографии керна в части применения металлических экранов и фильтров для повышения контраста изображения.

#### Литература

1. И.А. Вайнберг, Э.И. Вайнберг. История, состояние и перспективы промышленной рентгеновской компьютерной томографии // В мире НК, 2013, №3(61), С. 125-141
2. Мазуров А.И., Потрахов Н.Н. Микрофокусная рентгенография в медицине // Медицинская техника, №5 (269), 2011, С.30-33