

РАЗРАБОТКА КОМПЕНСИРУЮЩЕГО МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ФИЛЬТРА ДЛЯ МИКРОТОМОГРАФИИ НЕФТЕГАЗОВОГО КЕРНА

Авакян А.К. (ПРОДИС.НДТ)

Введение

Нефтегазовым керном называют цилиндрический образец горной породы, содержащий информацию об объемах полезных ископаемых и возможности их разработки. Микротомография кернов является рутинным исследованием, проводимым для измерения структуры и пористости горных пород. Для данного метода существуют следующие ограничения: во-первых, цилиндрическая форма образца в совокупности с ограниченным динамическим диапазоном цифрового детектора приводит к крайне низкому уровню сигнала (низкому отношению сигнал/шум), на проекции центра керна при пересветке детектора на проекции периферии керна; во-вторых, спектральная природа рентгеновского излучения вызывает эффект ужесточения спектра. В результате на томографических срезах образца в центральной области объема высокий уровень шума при низком контрасте не позволяет выполнять анализ структуры (поры, микротрещины, минеральные включения). Частично обозначенные проблемы решаются применением плоских металлических фильтров (Al, Cu, др.), модулирующих исходный спектр излучения источника, тем самым расширяя динамический диапазон сигнала, однако данного решения недостаточно для существенного повышения отношения сигнал/шум в проекции вдоль диаметра образца.

В медицинской томографии, где псевдоцилиндрическим объектом исследования выступает голова или тело пациента, схожая проблема решается применением компенсирующих алюминиевых фильтров сложной формы, модулирующих интенсивность излучения источника, исходя из ожидаемого эффективного ослабления в объекте [1]. При этом среднее значение зарегистрированного цифрового сигнала на проекции выравнивается по площади кадра. После этого величина ослабления определяется нормировкой проекции объекта на снимок фильтра без объекта и передается на реконструкцию. Применение компенсирующего алюминиевого фильтра для задачи неразрушающего контроля керна предложено в работе [2].

Объектом данного исследования является керн диаметром 38 мм (Рис. 1, слева). Дополнительным ограничением является максимальное напряжение спектра рентгеновского источника 80 кВ. Цель – получение пространственного разрешения 50 мкм (размер вокселя) и отношения контраст/шум томограммы в области центра объема, достаточного для точного количественного анализа за счет применения разработанной системы компенсирующих металлических фильтров.

Материалы и методы

Компенсирующий фильтр (рис. 1, справа) спроектирован для микротомографии на томографе собственного производства (ПРОДИС.Компакт) со следующими характеристиками: источник рентгеновского излучения Spellman XRB011 (35-80 кВ, 50 Вт, фокусное пятно 35 мкм), детектор рентгеновского излучения ПРОДИС.Марк (размер пикселя 49,5 мкм, габариты плоскопанельного детектора 114×145 мм, 6,7 МП, сцинтиллятор CsI), полное расстояние источник-детектор 435 мм. В ходе предварительного исследования был измерен при напряжении источника 80 кВ усредненный коэффициент рентгеновского

ослабления конкретного керна, равный $0,108$ [1/мм]. Также, получена зависимость коэффициента ослабления алюминия от толщины материала, использованная для верификации математической модели спектра источника. Система фильтрации состоит из последовательно расположенных между источником и объектом: первичного свинцового коллиматора, плоского фильтра (медь, толщина 100 мкм), компенсирующего фильтра (алюминий), вторичного свинцового коллиматора, а также медной фольги (толщина 50 мкм) на входной поверхности детектора.



Рис.1. Цилиндрический керн диаметром 38 мм (слева), компенсирующий алюминиевый фильтр (справа)

Математическая модель расчета сложной формы компенсирующего фильтра основана на методе статьи [1], однако доработана с учетом спектральных характеристик рентгеновского излучения. Входные параметры модели: спектральный состав рентгеновского излучения [3], коэффициент ослабления и габаритные размеры керна, геометрические параметры томографа, материал и толщина сцинтиллятора CsI, спектральные характеристики ослабления CsI, Cu, Al [4].

Выполнена проверка влияния фильтра на форму сигнала вдоль проекции керна. Получены проекции керна: а) без фильтрующих материалов в поле излучения (режим 80 кВ, 600 мкА, экспозиция кадра 300 мс); б) с описанной выше системой фильтрации (режим 80 кВ, 600 мкА, экспозиция кадра 4000 мс. Также были записаны 128 проекций керна (с установленной системой фильтрации) при фиксированном положении объекта. Далее по 128 проекциям рассчитаны средние значения сигнала в пикселях и стандартное отклонение сигнала, после чего получен профиль отношения сигнал/шум вдоль проекции керна.

Проведено сравнение срезов томографии в зависимости от фильтрации излучения при записи проекций, при этом время экспозиции кадра выбиралось с требованием отсутствия выхода цифрового сигнала за динамический диапазон по всей площади кадра:

1. Фильтрация отсутствует, 80 кВ, 600 мкА, экспозиция кадра 300 мс;

2. Плоский фильтр из меди толщиной 300 мкм на источнике, фильтр толщиной 50 мкм на поверхности детектора, 80 кВ, 600 мкА, экспозиция кадра 1000 мс;

3. Система фильтрации, включающая компенсирующий фильтр сложной формы.

В каждом случае сделано по 1200 проекций с угловым шагом 0,3 градуса. Коэффициент увеличения – 3. Реконструкция выполнялась в ПО Siemens CERA при отключенных программных алгоритмах подавления артефактов. Для каждого из методов фильтрации отдельно сделан снимок светлого поля и последующая нормировка проекций. Размер вокселя – 50 мкм, объем реконструкции 800×800×800 вокселей.

Результаты

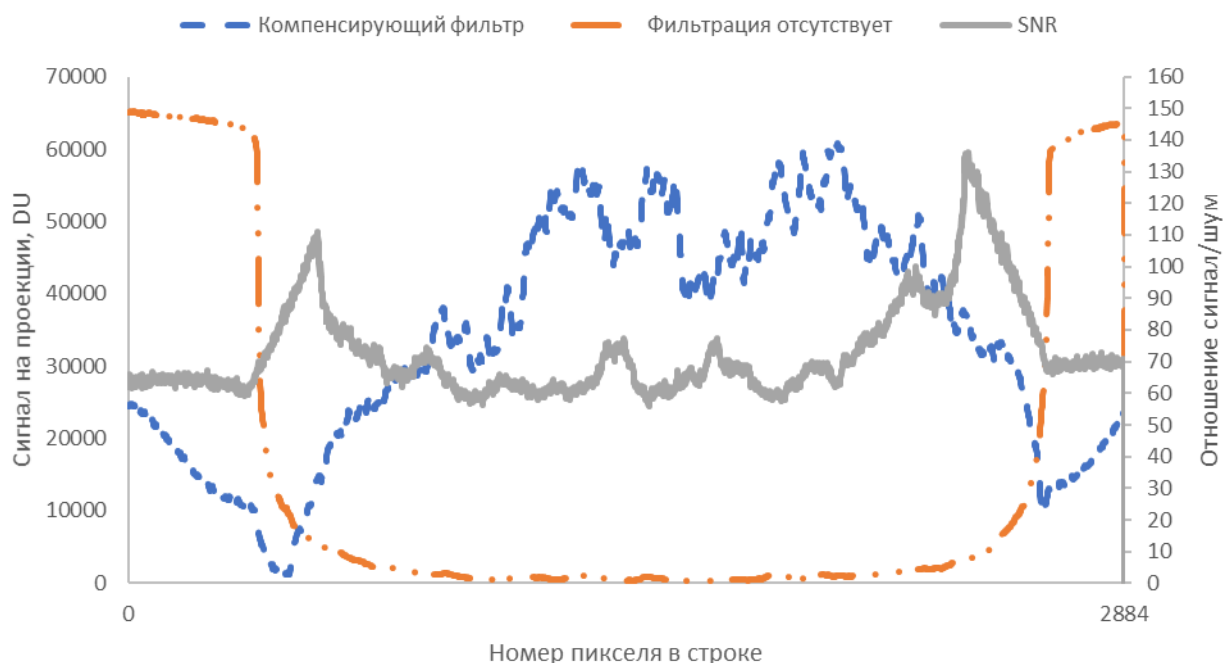
Исходный цифровой сигнал на проекции в случае отсутствия фильтрации полностью заполняет динамический диапазон и спадает от 2^{16} DU до 500 DU в направлении от периферии к центру керна. Использование компенсирующего фильтра позволяет выровнять величину сигнала вдоль строки, при этом в области проекции центра керна сигнал превышает 30000 DU, а отношение сигнал/шум вдоль строки > 70 (Рис. 2).



а



б



в

Рис. 2. Область интереса исходной проекции керна при съёмке с компенсирующим фильтром (а) и без фильтрации излучения (б); профиль сигнала вдоль строки проекции, а также отношение сигнал/шум по 128 проекциям (в)

Без применения фильтрации крайне низкий уровень сигнала (500 DU) исходной проекции вдоль диаметра керна приводит к уровню шума в центре среза томограммы, не позволяющему выполнять анализ объекта, а также характерно сильное проявление эффекта чашевидного артефакта (Рис. 3а). Использование плоского медного фильтра снижает влияние ужесточения спектра, а также снижает уровень шума, однако итоговое изображение все еще неприменимо для анализа (Рис. 3б). В случае съемки проекций с компенсирующим фильтром получен высокий контраст изображения в центральной области среза, четко визуализируются границы структурных элементов горной породы, поры и микротрещины (Рис. 3в; Рис. 4), однако возникает негативный эффект обратного чашевидного артефакта – сигнал возрастает от края к центру среза. Во всех случаях целенаправленно отключено алгоритмическое подавление кольцевых артефактов.

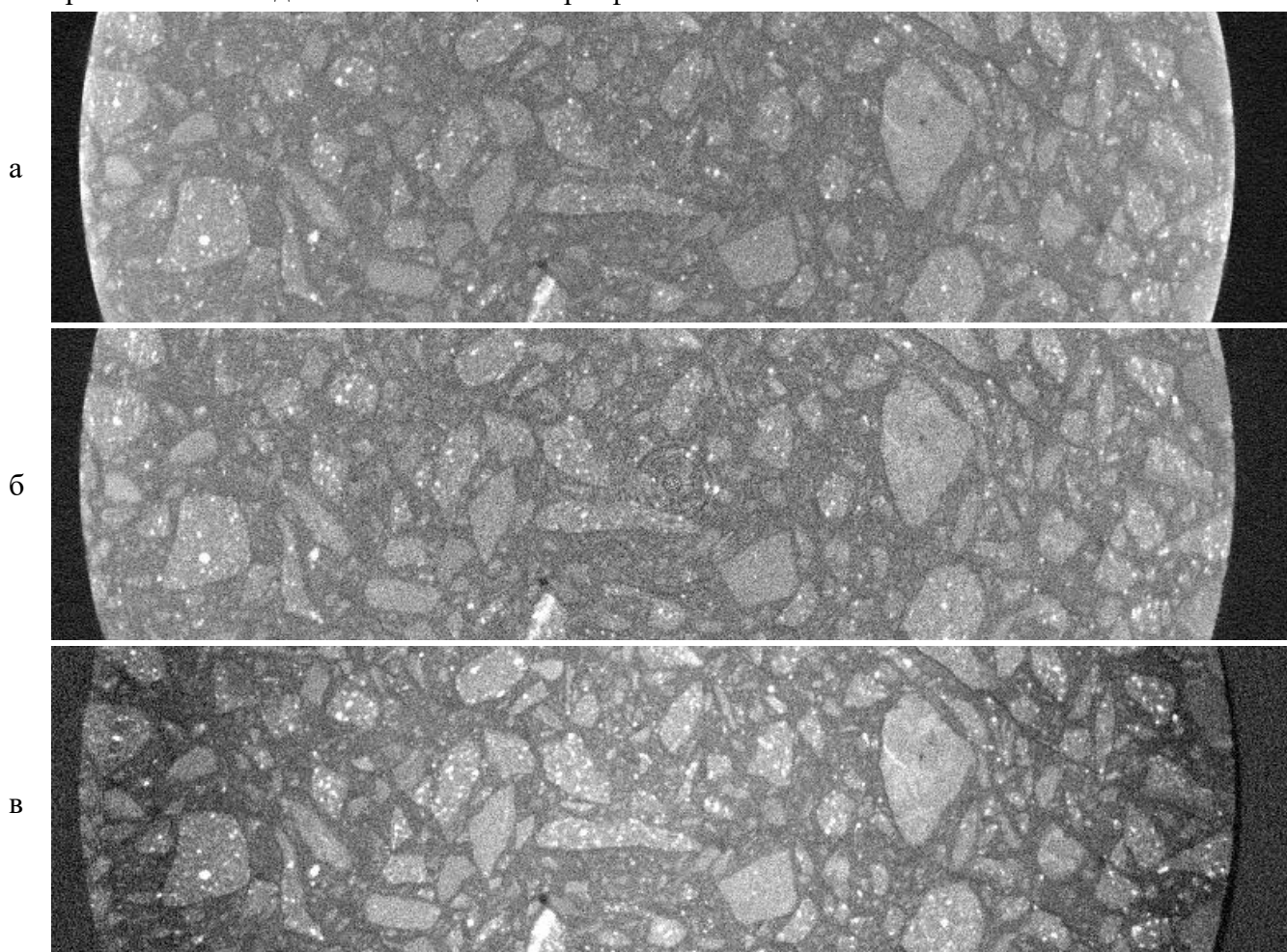


Рис. 3. Область интереса на срезе томограммы. Съемка при напряжении 80 кВ. Размер вокселя 50 мкм. а – отсутствие фильтрации, б – фильтрация 300 мкм меди на источнике, в – система фильтрации с компенсирующим фильтром

В результате исследования выявлены следующие недостатки использования компенсирующего фильтра в сравнении с другими методами:

- получение одной проекции занимает в 13 раз больше времени по сравнению с отсутствием фильтрации и в 4 раза больше в сравнении с плоским медным фильтром;
- проявляется эффект обратный классическому чашевидному артефакту, среднее значение сигнала увеличивается от периферии к центру среза;

– необходима дополнительное исследование влияния рассеянного излучения на качество томограммы.

В результате проведенной работы была разработана и изготовлена система фильтрации для микротомографии нефтегазового керна диаметром 38 мм на томографе с максимальным напряжением рентгеновского источника 80 кВ, основанная на компенсирующем фильтре. Компенсирующий фильтр позволил достигнуть высокого контраста на томографических срезах, равномерного по всему объёму реконструированного объекта и достаточного для автоматизированного количественного анализа.

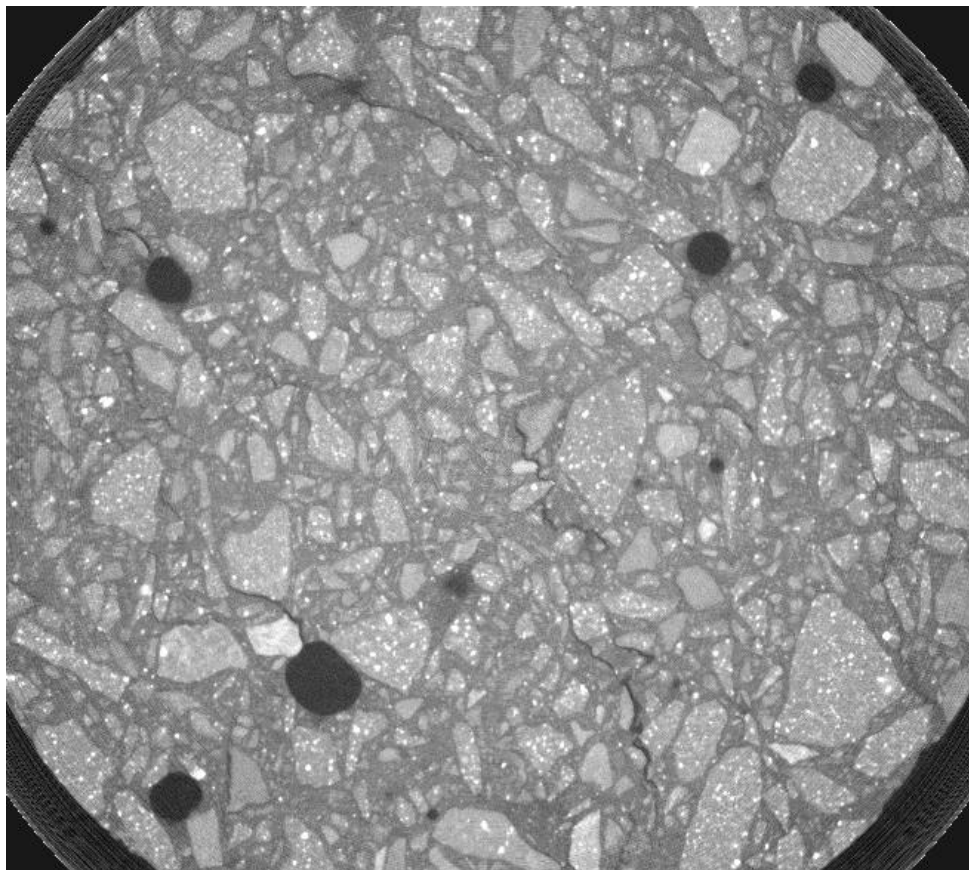


Рис. 4. Срез томограммы керна, проекции получены с использованием компенсирующего фильтра. На срезе чётко различимы структурные элементы горной породы, поры и микротрещины. Размер вокселя 50 мкм

Литература.

1. Zhang, G., et al. Bowtie filtration for dedicated cone beam CT of the head and neck: a simulation study // The British journal of radiology. 2013. Vol. 86. № 1028. PP. 54-61.
2. Chistiakov, S. G., et al. X-Ray Microtomography Using Compensation Filters with Complicated Form // Journal of Contemporary Physics (Armenian Academy of Sciences). 2019. Vol. 54. №. 4. PP. 381-385.
3. База данных Siemens спектрального состава излучения рентгеновских источников. URL: <https://health.siemens.com/booneweb/index.html> Дата обращения: 28.10.2021.
4. База данных NIST спектральных характеристик ослабления материалов. URL: <https://www.nist.gov/pml/x-ray-mass-attenuation-coefficients> Дата обращения: 28.10.2021.