

РЕНТГЕНОВСКАЯ МИКРОТОМОГРАФИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПЕНСАЦИОННЫХ ФИЛЬТРОВ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

С.Г. ЧИСТЯКОВ^{1*}, Н.А. ФИЛАТОВ¹, В.Р. КОЧАРЯН^{1,2},
А.С. ГОГОЛЕВ¹, В.С. РУКАВИШНИКОВ¹

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Томск, Россия

²Институт прикладных проблем физики НАН Армении, Ереван, Армения

*e-mail: chstkvsrg@gmail.com

(Поступила в редакцию 27 июня 2019 г.)

В работе проведены экспериментальные исследования влияния алюминиевого компенсационного фильтра сложной формы на соотношение сигнал-шум в микротомографии геологических кернов. При сканировании керна применен компенсационный фильтр в виде алюминиевого параллелепипеда с отверстием, приблизительно равным диаметру керна. Фильтр неподвижно закрепляется над предметным столом, kern помещается в отверстие и вращается внутри фильтра. Показано, что фильтр обеспечивает максимальный контраст полезного сигнала по всей области динамического диапазона сцинтилляционного панельного детектора. После нормировки проекций керна на проекцию фильтра без керна полученные проекции использовались в стандартном алгоритме реконструкции для конусной томографии. Использование компенсационного фильтра позволило увеличить соотношение сигнал-шум результирующих томограмм более чем в два раза, по сравнению со случаем обычного плоского фильтра из алюминия.

1. Введение

Совершенствование томографических методов определения минерального состава и пористости кернов имеет большое значение для прогнозирования запасов и производительности нефтяных и газовых месторождений [1–3]. Однако, с момента первого применения рентгеновского метода к кернам [4] и до настоящего времени существует проблема низкой контрастности получаемых проекций. Во-первых, связано это с полихромной природой рентгеновских трубок, применяемых в лабораторных и промышленных сканерах, а во-вторых - с ограничением динамического диапазона стандартных плоско панельных детекторов. Традиционно частично данная проблема решается ужесточением спектра излучения с помощью плоских фильтров из Al или Cu, цель которых отсечь

мягкую часть спектра. Иногда для увеличения контраста можно использовать полосовой фильтр жесткого рентгеновского излучения [5] на основе монокристалла кварца при наличии внешних воздействий. Однако такие фильтры не обеспечивают необходимого контраста при сканировании полноразмерных кернов диаметром от 60 до 130 мм. Вследствие сильного поглощения рентгеновского излучения центральная часть проекции керна получается с минимальным уровнем сигнала детектора, в то время как его края оказываются перенасыщенными. Применение мини проб из кернов и использование контрастирующих жидкостей позволяет частично решить эту проблему [6]. Тем не менее часто при исследовании стоит задача сохранить целостность керна.

В данной работе предлагается метод повышения контраста томографических проекций за счет компенсационного фильтра сложной формы из алюминия, плотность которого порядка плотности горной породы. Так как керны нефтяных и газовых месторождений состоят в основном из соединений кремния (песок, галька и пр.), то использование компенсационного фильтра из алюминия позволяет выровнять уровень сигнала по всему полю детектора. Что в свою очередь позволяет подобрать уровень экспозиции такой, что в динамический диапазон детектора укладывается сигнал как в центральной, самой толстой части керна, так и по его краям.

Следует отметить, что в радиографии компенсационные фильтры применяются с момента обнаружения факта, что пленки лучше детектируют излучение, выровненное в поле зрения по интенсивности [7]. В медицине с момента изобретения первых томографов применяются компенсационные фильтры в виде водяных шапочек или так называемые фильтры-бабочки для цилиндрических объектов [7,8]. Однако применение данных фильтров к полноразмерным кернам до данного момента не рассматривалось.

Целью данной работы является исследование влияния компенсационного фильтра сложной формы из алюминия на томографическое сканирование полноразмерного керна нефтяного или газового месторождения

2. Описание экспериментальной части

Схема экспериментальной установки приведена на рис.1, в качестве источника излучения использовался рентгеновский генератор XRV-160 с вольфрамовой трубкой производства Spellman. Сканирование проводилось при напряжении 160 кВ, с анодным током 4 мА и размером фокусного пятна 0.4х0.4 мм². На расстоянии 93 см от источника была расположена ось вращения керна. Компенсационный фильтр, размером 90×90×120 мм, был размещён непосредственно перед детектором Redeye Shadowbox-3HS так, что ось вращения керна проходила через центр отверстия фильтра. Детектор располагался на расстоянии

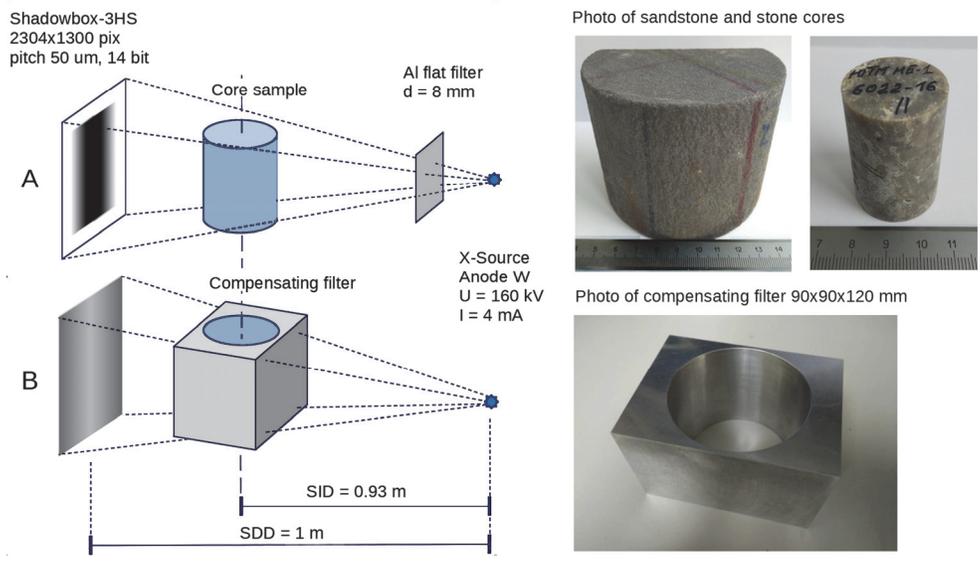


Рис.1. Схема эксперимента. А – с плоским Al фильтром, В – с компенсационным фильтром. Справа фотографии образцов кернов и компенсационного фильтра.

1 м от фокального пятна трубы. Проекция размером 1300×2304 пикселей, с шагом пикселя 50 мкм, получались усреднением нескольких кадров. Для случая с плоским Al фильтром толщиной 8 мм проекция формировалась усреднением по 20 кадром с временем интегрирования 100 мс.

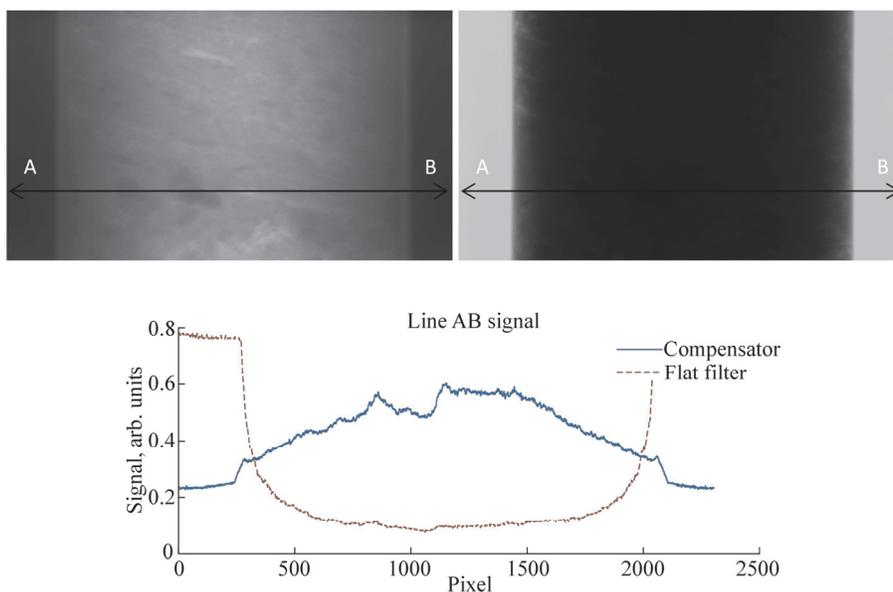


Рис.2. Радиограммы керна: с компенсационным Al фильтром (слева), с плоским фильтром Al толщиной 8 мм (справа), снизу – относительный сигнал по линии АВ.

Для случая с компенсационным фильтром – проекция формировалась усреднением по 4 кадрам с временем интегрирования 500 мс. Времена экспозиции подбирались под уровень сигнала детектора, а количество кадров усреднения – под примерно равное время сканирования образца для обоих случаев. В качестве образца использовался цилиндрический керн диаметра 80 мм из песчаника с вкраплениями гальки и органических материалов. На рис.2 приведены радиограммы керна с использованием компенсационного фильтра и без.

В связи с тем, что компенсационный фильтр создаёт выравненный по поглощению объекта сигнал, то такие проекции невозможно использовать напрямую в стандартных алгоритмах реконструкции конусной томографии [9]. Поэтому каждая проекция, полученная в случае компенсационного фильтра, была нормирована на сигнал фильтра без керна. На рис.3 приведён сигнал после фильтра без керна, на который нормировались проекции с керном по формуле:

$$I(x, y) = I_{\text{core+f}}(x, y) / I_f(x, y), \quad (1)$$

где $I_{\text{core+f}}(x, y)$ – проекция керна с компенсационным фильтром, $I_f(x, y)$ – проекция компенсационного фильтра без керна (рис.3).

После нормализации сигнала проекций керна на сигнал фильтра (1) проекции использовались для получения томографических срезов методом Фельдкампа [10].

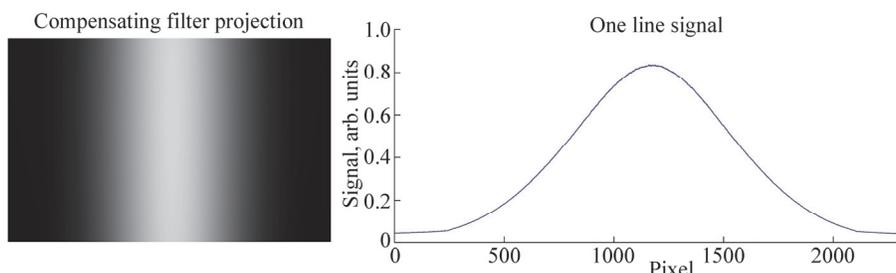


Рис.3. Радиограмма компенсационного фильтра (слева) и относительный сигнал одной линии (справа).

3. Результаты и обсуждение

Результат реконструкции одного из слоев песчаного керна представлен на Рис.4. Даже визуальный анализ областей интереса Roi 1 (песок и мелкая галька) и Roi 2 (срез крупного камня однородной минеральной фракции) показывает, что в результате применения компенсационного фильтра увеличивается соотношение сигнал шум в томограммах исследуемого керна. На увеличенном фрагменте

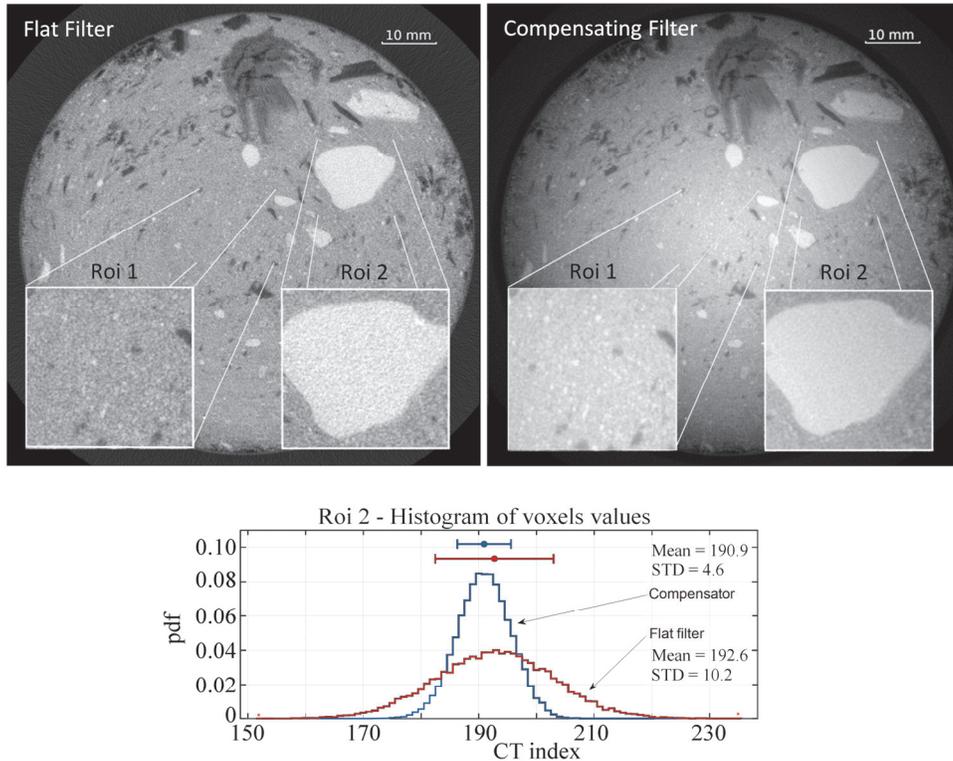


Рис.4. Томографические срезы керна: с применением традиционного плоского фильтра (слева); с компенсационным фильтром (справа); снизу – гистограмма по области интереса Roi 2 ($SNR_{ROI2_Compensator} = 41.5$, $SNR_{ROI2_Flat} = 18.8$).

Roi 1 видно, что в результате снижения зернистости изображения можно выделить дополнительные минеральные фракции после использования компенсационного фильтра, которые воспринимаются как шум в случае с использованием плоского фильтра.

Анализ однородной области интереса Roi 2 позволяет оценить соотношение сигнал/шум на результирующих томограммах. Из гистограммы на рис.4 видно, что компенсационный фильтр для данного керна обеспечил увеличение соотношения сигнал/шум (Signal to Noise Ratio SNR) в 2.2 раза, чем сканирование с применением стандартного фильтра: $SNR_{ROI2_Compensator} = 41.5$, $SNR_{ROI2_Flat} = 18.8$.

Следует отметить, что реконструированный слой керна с применением компенсационного фильтра обладает выраженным артефактом «кепки» [10, 11]. Этот тип артефакта возникает в стандартной томографии за счет присутствия за объектом рассеянного излучения. В случае использования компенсационного фильтра причиной проявления эффекта возможно является также изменение проекционных данных после процедуры нормировки по формуле (1). Очевидно, такая нормировка не позволяет применять стандартные алгоритмы реконструкции

без дополнительных корректировок эффективного коэффициента поглощения, как это происходит при реконструкции с учетом полихроматичности излучения [12] (beam hardening correction). Использование стандартных алгоритмов аппроксимации, коэффициента поглощения полихроматического излучения к эффективному, не позволило избавиться от эффекта.

4. Заключение

Экспериментально показано, что применение компенсационного фильтра сложной формы при сканировании кернов позволяет существенно улучшить качество детализации проекций керна, что приводит к повышению соотношения сигнал-шум в два и более раза на результирующих томограммах. Однако, в дальнейшем следует уточнить функцию нормировки проекций керна с компенсационным фильтром, так как рассмотренная в данной работе процедура не обеспечила полного устранения артефакта «кепки» на томографической плотности по объёму керна.

Работа выполнена при поддержке Федеральной целевой программы Министерства науки и высшего образования РФ согласно Соглашения № 05.575.21.0182 (RFMEFI57518X0182).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Я.В. Савицкий.** Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. **15**, 28 (2015).
2. **К.А. Воробьев, А.Е. Воробьев, Х. Тчаро.** Вестник Евразийской науки. **3**, 10 (2018).
3. **C.R. Appoloni et al.** Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, **580**, 629 (2007).
4. **M. Honarpour, V. Cromwell, D. Hatton, R. Satchwell.** Society of Petroleum Engineers **14272** (1985).
5. **V.R. Kocharyan.** J. Contemp. Phys. (Armenian Ac. Sci.), **52**, 392 (2017).
6. **A. Fogden, S. Latham, T. McKay et al.** Unconventional Resources Technology Conference, **1922195** (2014).
7. **S.A. Graham, D.J. Moseley, J.H. Siewerdsen, D.A. Jaffray.** Medical Physics, **34**, 2691, (2007).
8. **G. Zhang, N. Marshall, R. Jacobs et al.** British Institute of Radiology, **86**, 1028 (2013).
9. **W.V. Aarle, W.J. Palentijn, J. Cant et al.** Opt. Express, **24**, 25129 (2016).
10. **M. Thomsen et al.** Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, **342**, 314 (2015).
11. **N. Rasoulpour et al.** Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, **794**, 177 (2015).
12. **F.E. Boas, D. Fleischmann.** Imaging Med., **4**(2), 229 (2012).

ՌԵՆՏԳԵՆՅԱՆ ՄԻԿՐՈՏՈՄՈԳՐԱՖԻԱ ԲԱՐԴ ՏԵՍՔՈՎ
ԿՈՄՊԵՆՍԱՑԻՈՆ ՖԻԼՏՐԵՐԻ ՕԳՏԱԳՈՐԾՄԱՄԲ

Ս.Գ. ՉԻՍՏՅԱԿՈՎ, Ն.Ա. ՖԻԼԱՏՈՎ, Վ.Ռ. ԶՈՉԱՐՅԱՆ,
Ա.Ս. ԳՈԳՈԼԵՎ, Վ.Ս. ՌՈՒԿԱՎԻՇՆԻԿՈՎ

Աշխատանքում փորձարարական եղանակով հետազոտվել են բարդ տեսքով այլումինե կոմպենսացիոն ֆիլտրերի ազդեցությունը երկրաբանական նմուշների միկրոտոմոգրաֆիայում ազդանշան-աղմուկ հարաբերության վրա: Ռենտգեն-սկանավորման ընթացքում օգտագործվել է հանքանմուշի տրամագծի չափով խոռոչ պարունակող այլումինե ուղղանկյուն զուգահեռանիստի տեսքով կոմպենսացիոն ֆիլտր: Ֆիլտրը անշարժ ամրացվել է առարկայական սեղանի վրա, իսկ հանքանմուշը տեղադրվել է նրա ներսում և պտտվել: Ցույց է տրվել, որ այդպիսի ֆիլտրը ապահովել է օգտակար ազդանշանի առավելագույն լուծողունակություն ռենտգենյան կոորդինատագրայուն դետեկտորի ամբողջ դինամիկ տիրույթում: Տոմոգրամների ստացման համար օգտագործվել են հանքանմուշի կտրվածքների ռենտգենյան պատկերները, որոնք նախապես նորմավորվել են ըստ հանքանմուշ չափարունակող ֆիլտրի կտրվածքների պատկերների հետ: Մեր կողմից օգտագործված կոմպենսացիոն ֆիլտրը հնարավորություն է տվել վերջնական տոմոգրամներում ի համեմատ հարթ այլումինե ֆիլտրերի նկատմամբ ազդանշան-աղմուկ հարաբերությունը մեծացնել առնվազն երկու անգամ:

X-RAY MICROTOMOGRAPHY BY USING COMPENSATION FILTERS WITH
COMPLICATED FORM

S.G. CHISTIYAKOV, N.A. FILATOV, V.R. KOCHARYAN,
A.S. GOGOLEV, V.S. RUKAVISHNIKOV

The influence of an aluminum compensation filter with complicated form on the signal-to-noise ratio in microtomography of geological cores was investigated. When scanning the core, a compensation filter in the form of an aluminum parallelepiped with a hole approximately equal to the diameter of the core was used. The filter is fixedly fixed over the object table, the core is placed in the hole and rotates inside the filter. It is shown that the filter provides the maximal contrast of the useful signal over the entire dynamic range of the scintillation panel detector. After normalizing the projection of the core onto the filter projection without the core, the obtained projections were used in the standard reconstruction algorithm for cone beam tomography. The use of a compensation filter made it possible to increase the signal-to-noise ratio of the resulting tomograms by more than two times, compared with the case of a conventional flat filter made of aluminum.