

ВЫРАВНИВАНИЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ FIB-SEM ИЗОБРАЖЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ МАКСИМИЗАЦИИ ВЗАИМНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Брынза Ирина Анатольевна^{1,2}

*1: стажер-исследователь, научно-исследовательский центр компании
Schlumberger, Москва, Россия*

*2: аспирант, факультет управления и прикладной математики МФТИ,
Москва, Россия*

E-mail: irene.ab18@gmail.com

Одной из задач, решаемых в нефтегазовой индустрии, является построение как можно более точной модели нефтесодержащей породы. Это необходимо для проведения математического моделирования с целью оценки фильтрационно-емкостных и прочностных свойств коллекторов [1]. Такую модель (т. н. "цифровой керн"), как правило, получают из изображений рентгеновской микротомографии, однако для более высокого разрешения используется технология FIB-SEM.

Установка FIB-SEM состоит из фокусируемого ионного пучка и растрового электронного микроскопа. Ионным пучком с образца удаляют тонкий слой вещества, а затем получают изображение поверхности [2]. Результатом многократного повторения этих операций является набор последовательных изображений (слоев) образца, с помощью которых можно изучать его строение. Одной из проблем построения трехмерной модели по набору изображений слоёв является их смещение друг относительно друга в силу различных причин, таких как накопление заряда на исследуемой поверхности, механические и термические нестабильности. Несмотря на автоматическое предварительное выравнивание по нанесенным на образец реперным точкам [3], необходимо скорректировать остаточные смещения программным способом.

В работе [4] был сделан вывод о том, что методы, минимизирующие разницу между двумя соседними изображениями, дают неудовлетворительный результат. Поэтому было принято решение анализировать сразу несколько изображений с помощью алгоритма, основанном на максимизации взаимной информации (MI). Она является мерой количества общей информации, содержащееся в случайных величинах X , Y и Z , и определяется через их энтропии $H(X)$, $H(Y)$, $H(Z)$ [5]:

$$MI(X; Y; Z) = H(X) + H(Y) + H(Z) - H(X, Y, Z) \quad (1)$$

В качестве тестовых данных использовалось трехмерное изображение пористой структуры, полученное с помощью рентгеновской томографии и поэтому изначально не нуждающееся в выравнивании. Далее, для каждого его слоя были сгенерированы случайные смещения, и применен алгоритм, максимизирующий взаимную информацию пачек из трех слоев. Также для сравнения был использован алгоритм, который минимизирует сумму абсолютных отклонений (SAD) и средний квадрат ошибки (MSE). На данных алгоритмах построен процесс выравнивания трехмерного изображения в специализированном программном обеспечении Avizo. Характеристики ошибок выравнивания приведены в таблице 1.

Таблица 1: Характеристики ошибок абсолютных смещений

Критерий	Среднее	Максимум модуля	Дисперсия
MI	0.76	1.41	0.64
SAD	1.09	3.16	0.93
MSE	1.43	3.16	0.75

На основании проделанной работы можно сделать вывод о том, что максимизация взаимной информации нескольких изображений дает лучший результат, чем алгоритмы, минимизирующие разницу между слоями. Однако, нескомпенсированные смещения изображений могут существенно исказить цифровую модель керна и препятствовать точному математическому моделированию физических процессов в порах нефтенасыщенной породы. Таким образом, вопрос выравнивания набора FIB-SEM изображений нуждается в дальнейшем исследовании.

Литература

1. Koroteev D., Dinariev O., Evseev N., Klemin D., Nadeev A., Safonov S. et al. Direct hydrodynamic simulation of multiphase flow in porous rock // *Petrophysics*. – 2014. – Т. 55. – № 04. – С. 294–303.
2. Holzer L., Cantoni M. Review of FIB-tomography // *Nanofabrication Using Focused Ion and Electron Beams*:

- Principles and Applications. – 2012. – Т. 559201222. – С. 410–435.
3. Lepinay K., Lorut F. Three-dimensional semiconductor device investigation using focused ion beam and scanning electron microscopy imaging (FIB/SEM Tomography) // Microscopy and Microanalysis. – 2013. – Т. 19. – № 1. – С. 85–92.
 4. Брынза И. А., Сафонов И. В., Якимчук И. В. Обзор способов выравнивания последовательности FIB-SEM изображений для построения цифровых моделей ядра. // Тезисы научно-технической конференции "Техническое зрение в системах управления – 2018".
 5. Studholme C., Hill D. L. G., Hawkes D. J. Incorporating connected region labelling into automated image registration using mutual information // Mathematical Methods in Biomedical Image Analysis, 1996., Proceedings of the Workshop on. – IEEE, 1996. – С. 23–31.