

## Применение метода электротомографии для контроля хода фильтрационного эксперимента на образцах керна

*Н. В. Юркевич<sup>1\*</sup>, А. В. Анчугов<sup>3</sup>, Д. О. Кучер<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> НИЦ “Экология” СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация

<sup>2</sup> Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация

<sup>3</sup> Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация

\* e-mail: YurkevichNV2@ipgg.sbras.ru

**Аннотация.** Работа посвящена применению метода электротомографии при проведении эксперимента по вытеснению нефти из образцов керна для определения текущей водо- и нефтенасыщенности образцов. Рассмотрена реализация данного метода в пластовых условиях по давлению. Строится карта 3-мерного распределения удельных электрических сопротивлений и текущей водонасыщенности образцов керна во время эксперимента по вытеснению с помощью инверсии кажущихся сопротивлений полученных при измерении потенциалов от источника тока на поверхности образцов. Обсуждаются возможности метода для контроля хода различных экспериментов.

**Ключевые слова:** многоэлектродная электроразведка, электрическое зондирование, электрическая томография, электротомография, фильтрационный эксперимент, эксперимент по вытеснению

## Application of the method of electrotomography to control the filtration experiment on core samples

*N. V. Yurkevich<sup>1\*</sup>, A. V. Anchugov<sup>3</sup>, D. O. Kucher<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> SRC “Ecology” SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

<sup>2</sup> Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

<sup>3</sup> Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

\* e-mail: YurkevichNV2@ipgg.sbras.ru

**Abstract.** The work considers application of the method of electrotomography during the experiment on oil displacement from core samples to determine the current water and oil saturation of the samples. The implementation of this method in reservoir conditions in terms of pressure is considered. A map of the 3-dimensional distribution of electrical resistivities and current water saturation of core samples is constructed during the displacement experiment using the inversion of apparent resistances obtained by measuring potentials from a current source on the sample surface. The possibilities of the method for monitoring the course of various experiments are discussed.

**Keywords:** multielectrode electrical exploration, electrical sounding, electrical tomography, filtration experiment, displacement experiment

## ***Введение***

Фильтрационный эксперимент, проводимый на колонке керн с целью определения коэффициента вытеснения нефти водой в лабораторных условиях, является стандартным экспериментом и предусматривает определение полноты извлечения нефти из нефтесодержащей породы за счёт фильтрации через него воды до практически полной обводнённости образцов. При этом условия вытеснения нефти максимально приближаются к пластовым за счёт применения пластовых или модельных жидкостей как указано в ОСТ 39-195-86 [1]. Для контроля хода эксперимента по вытеснению нефти из образцов керн и определения текущей водо- и нефтенасыщенности образцов, как правило, применяется метод электросопротивлений, реализованный по 2-х или 4-х электродной схеме [2]. При этом получаемые значения УЭС образцов, и их текущая водо- нефтенасыщенность представляют собой интегральную характеристику всей колонки образцов. Также применяют метод рентгеновского сканирования образцов [3,4,5]. Недостатком рентгеновских методов контроля является относительно невысокая скорость съёмки, зависящая от мощности источника и чувствительности детектора. Рентгеновский сканер даёт двумерное изображение колонки образцов. Следует отметить высокую стоимость рентгеновского сканера и томографа, как и сложность изготовления специального рентгенопрозрачного кернодержателя который должен выдерживать пластовые условия.

В данной статье описана реализация метода электротомографии для контроля текущей водо- нефтенасыщенности образцов керн в пластовых условиях. В ходе эксперимента по вытеснению нефти происходит построение карты 3-х мерного распределения удельных электрических сопротивлений и текущей водо-нефтенасыщенности образцов керн, полученных с помощью инверсии кажущихся сопротивлений. Входными данными являются измеренные потенциалы на поверхности образца при возбуждении в нём электрического поля.

### ***Описание эксперимента с применением метода электротомографии: компоненты системы, условия проведения эксперимента***

Электротомография – метод, с помощью которого получают трёхмерные модели распределения удельного электрического сопротивления (УЭС) горных пород. В качестве аппаратуры используются многоэлектродные и многоканальные станции. Технология электротомографии основана на измерениях с помощью многоэлектродных установок и автоматической инверсии полученных данных. При электротомографии в качестве питающих и измерительных электродов используются одни и те же контакты, расположенные на исследуемом объекте. Их количество варьируется от нескольких десятков до сотен штук. Электроды расположены на поверхности объекта с фиксированным шагом и подключаются к коммутационному кабелю, при этом блок коммутации поочередно переключает и опрашивает различные комбинации электродов, а результатом измерений является информация о распределении электрических потенциалов на поверхности объекта исследования. Решение обратной двумерной задачи («двумерная ав-

томатическая инверсия данных») выполняется с помощью специальных программ. На вход программы подаются результаты измерений, полученные с помощью многоэлектродной установки, результатом же инверсии является трехмерная (3-D) геоэлектрическая модель объекта. В общем случае данный метод относится к классу наземных геофизических методов поиска и разведки полезных ископаемых, а именно к методам электроразведки. В литературе метод упоминают как: многоэлектродная электроразведка, электрическое зондирование, электрическая томография, электротомография, 3D электроразведка, площадная электроразведка. Аналогом метода применительно к скважинной электроразведке (ГИС – геофизическое исследование скважин) является скважинный микроимиджинг (Borehole Imaging), осуществляемый с помощью прибора FMI производства компании Schlumberger.

Рассмотренный метод электротомографии основан на применении электроразведки к объектам меньшего масштаба. При наземной и скважинной электроразведке размеры изучаемых объектов составляют сотни метров, в случае исследования керна размеры существенно меньше. Кроме различий в масштабе объекта исследования, применение метода электротомографии к образцам позволяет решить задачу изучения динамики течения флюида через исследуемый образец. В ходе эксперимента делаются непрерывные измерения кажущегося сопротивления исследуемого образца, поочередно на всех измерительных электродах, контактирующих с образцом. Таким образом, в результате непрерывного контроля за изменением электрического кажущегося сопротивления осуществляется мониторинг движения фронта флюида через исследуемый образец. Электрический сигнал, возбуждаемый источником, является низкочастотным синусоидальным (двуполярным для борьбы с поляризацией электродов; форма сигнала может быть и просто прямоугольной), и может иметь частоту в достаточно широком диапазоне, для наших экспериментов мы ограничились частотой в диапазоне 4.88-6 Гц.

Полученный массив данных потенциалов, измеренных на поверхности образца, подвергается инверсии: решается обратная задача, позволяющая восстановить распределение проводимости в образце и получить распределение сопротивления уже во всем объеме образца. Обработка массива регистрируемых данных осуществляется покадрово, с учетом времени, необходимого на коммутацию сигналов источника и регистратора. В результате создается набор 3D распределения сопротивлений внутри образца (одно изображение в каждый момент времени измерения). Таким образом, массив изображений позволяет изучать не только скорость перемещения фронта вытеснения (границы вода/нефть) в исследуемых образцах, но и форму этого фронта, а также характер движения флюидов в образцах.

На блок схеме (см. Рис. 1) показано подключение измерительной системы и источника напряжения к электрическим контактам на манжете, контактирующей непосредственно с образцами керна. Электрическое подключение к кернадержателю, находящемуся под давлением, осуществляется с помощью разъёмов (см. Рис. 3).

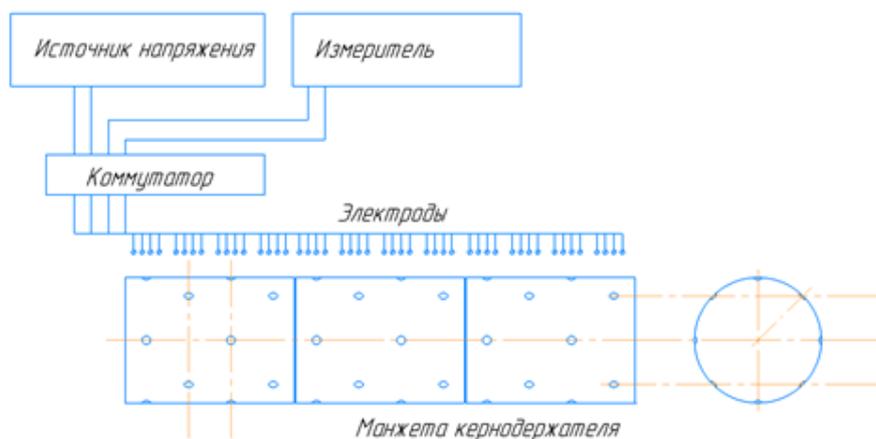


Рис. 1. Блок схема измерительной системы

Манжета с 48 электродами и находящимися в ней образцами (керновой колонкой) помещается в кернодержатель погружного типа, в котором создаётся всестороннее обжимное давление, моделирующее пластовое. Сквозь металлические плунжера, непосредственно прилегающие к торцам колонки образцов, подведены трубки подачи и выхода флюида, находящегося под поровым давлением. Кернодержатель имеет гидравлическое подключение к установке проведения фильтрационных экспериментов СКИФ-ФСК (см. Рис.4). В упрощённом виде гидравлическая схема установки изображена на Рис. 5.



Рис. 2. Кернодержатель погружного типа



Рис. 3. Электрическое подключение коммутатора



Рис. 4. Установка СКИФ-ФСК для проведения фильтрационных экспериментов на образцах керна



Рис. 5. Блок схема гидравлической части установки

Эксперимент состоял из нескольких этапов:

1. Подготовка образцов

а) распиловка в размер и торцовка

б) взвешивание сухого образца

в) вакуумирование и насыщение водой

г) взвешивание насыщенного водой образца

д) создание остаточной водонасыщенности с помощью центрифуги

е) определение пористости и остаточной водонасыщенности образцов

Пористость образцов составила около 10%, остаточная водонасыщенность 57%

2. Донасыщение образцов керосином следующим способом: образцы помещались в манжету кернодержателя, создавались пластовые условия и происходило донасыщение образцов керосином. Для насыщения образцов керосином обжимное давление было установлено на уровне 50Мпа, при этом на выходе на

блоке противодействия поддерживалось давление в 20Мпа. Расход керосина был установлен 0.1 мл/мин.

3. Прокачка керосина через образец. С целью стабилизации давления на входе в образец при фиксированном давлении на выходе, поддерживаемом с помощью блока противодействия и фиксированном расходе керосина 0.1мл/мин, производилась прокачка нескольких поровых объёмов керосина до стабилизации давления а также удельного электрического сопротивления образцов измеряемое методом электротомографии, (см. Рис. 6).

4. Прокачка воды через образец. На следующем этапе начиналась прокачка воды с минерализацией 15г/л, с расходом 0.05 мл/мин и вытеснение керосина из образцов в мерную бюретку. При этом каждые 10 минут и до окончания эксперимента, делался замер потенциалов на поверхности образца, до фиксации прохождения фронта вытеснения и стабилизации давления воды на входе в колонку образцов. Затем делалась инверсия полученных данных (решение обратной задачи) с вычислением распределения удельных электрических сопротивлений в объёме колонки образцов. Результаты инверсии представлены в виде последовательности изображений.

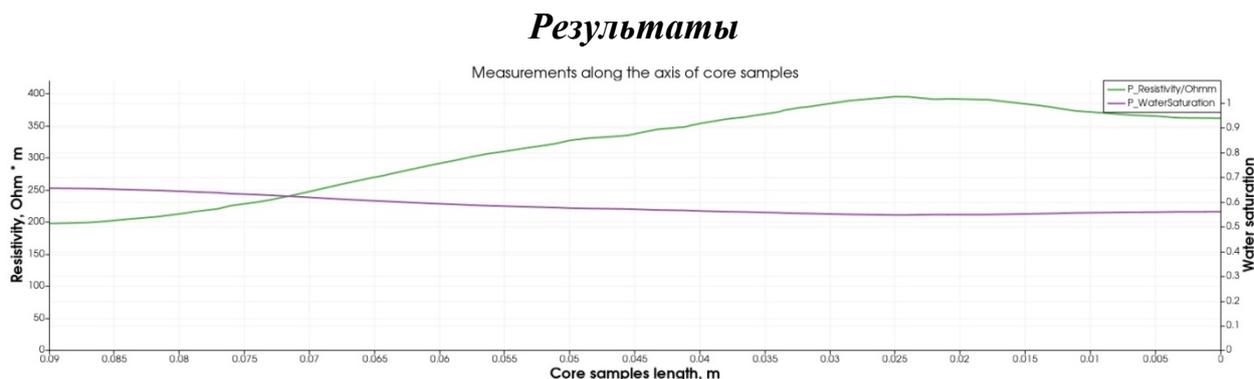


Рис. 6. Текущая водонасыщенность (остаточная) и начальное значение УЭС вдоль оси колонки образцов при насыщении керосином

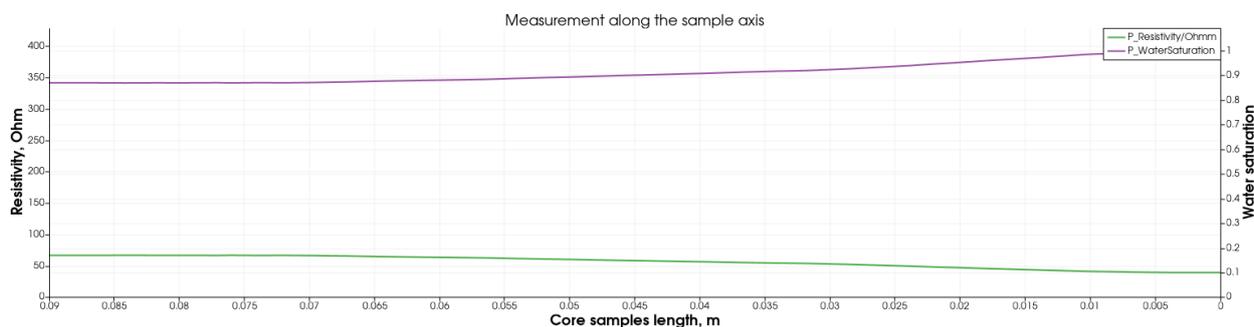


Рис. 7. Текущая водонасыщенность и значение УЭС после прохождения фронта вытеснения через колонку образцов, в конце эксперимента

На рисунках 6 и 7 приведены графики распределения УЭС и водонасыщения вдоль оси керновой колонки, при этом подача керосина через поровые линии

в образцы осуществлялась справа. Виден начальный разброс остаточной водонасыщенности в образцах. Сопротивления образцов вдоль оси (кривая зелёного цвета) при начальном состоянии от 360 до 200 Ом\*м. На рисунке 7 УЭС всей колонки примерно одинаково и составляет 50-60 Ом\*м.

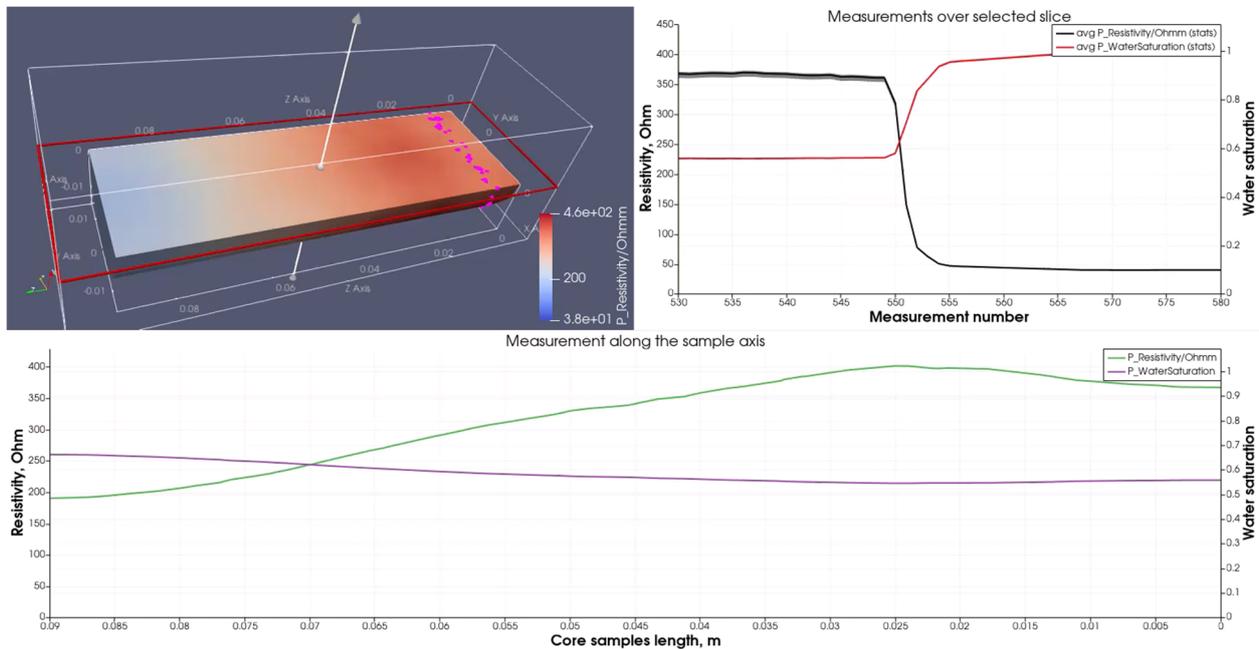


Рис. 8. Начало эксперимента, образец насыщен керосином

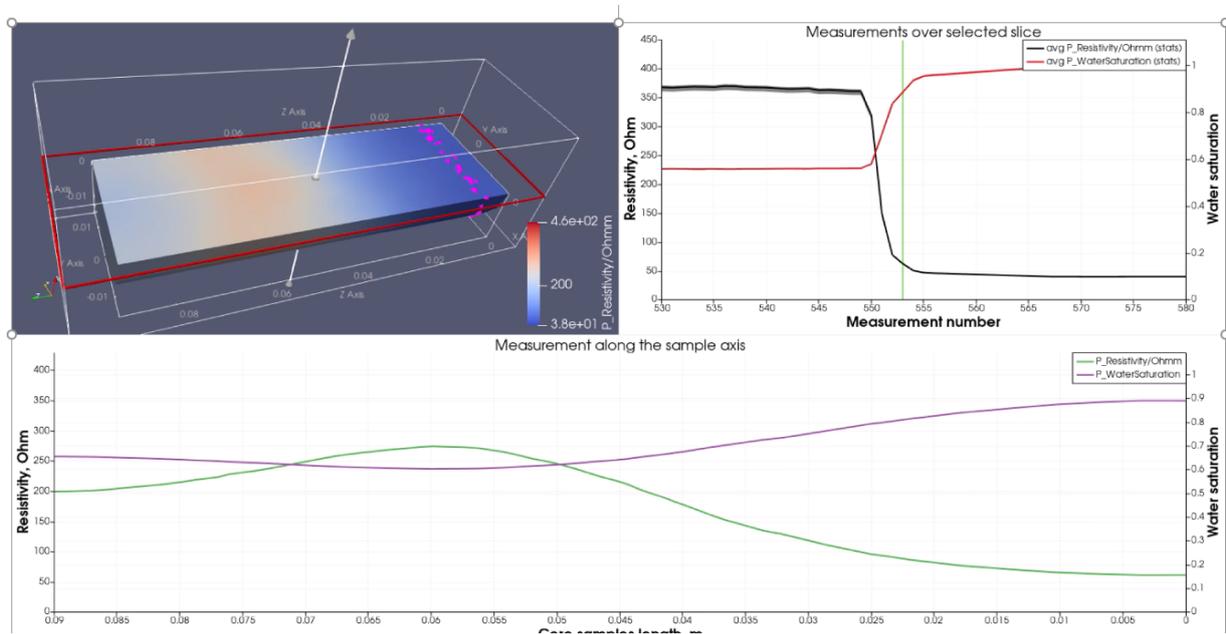


Рис. 9. Образец, частично заполненный водой

Программа визуализации результатов эксперимента позволяет просматривать весь ход эксперимента и строить графики УЭС и водонасыщенности образцов вдоль любого выбранного направления, а также через произвольно выбран-

ный разрез образца. Во время хода эксперимента, в процессе вытеснения, положение фронта вытеснения можно наблюдать как движение границы между синим и красным цветом (Рис.8 и 9, слева вверху), так и на графике распределения текущей водонасыщенности и сопротивления вдоль оси образцов (внизу). В верхней правой части рисунков 8 и 9 приведены графики текущего УЭС и водонасыщенности за всё время эксперимента, через область (разрез или слайс), выбранную произвольно в самом начале колонки образцов, для лучшей иллюстрации процесса вытеснения (начало со стороны подачи воды справа) и отмеченный розовым в верхней левой части рисунка.

Как видно по представленным данным, само прохождение фронта вытеснения через колонку образцов длиной 90 мм заняло примерно 1,5 часа. На рисунках 8 и 9 в их верхней правой части прохождение фронта вытеснения через колонку образцов выглядит как скачкообразное изменение УЭС 380 Ом\*м до 50 Ом\*м.

### ***Оценка точности метода электротомографии: материальный баланс, сравнение с классическим способом измерения***

В качестве основного метода оценки точности метода электротомографии использован метод сравнения количества керосина, вытесненного в мерную бюретку, с расчётными значениями, полученными с помощью измерения остаточной водо-нефтенасыщенности методом электротомографии.

Объём вышедших флюидов за вычетом мёртвых объёмов составил: 1.76мл воды и 1.69мл керосина. Коэффициент вытеснения нефти водой составил  $1.69/2.486=0.68$ .

Остаточная нефтенасыщенность составила  $0.79/5.77=0.137$ , водонасыщенность составила  $1-0.137=0.863$ . Водонасыщенность, измеренная с помощью метода электротомографии, составила 0.92. Разница в значениях составляет чуть более 5%.

Также метод электротомографии показал, что донасыщение образцов керосином потребовало большего объема прокачки, чем стандартно применяемые в таких исследованиях 5 поровых объёмов, рекомендованных в ОСТ 39-195-86 [1].

### ***Заключение***

Предложенный метод измерения текущей водо-нефтенасыщенности и контроль УЭС на образцах керна с помощью электротомографии продемонстрировал свою полезность при проведении фильтрационного эксперимента и успешно может быть использован для наблюдения и контроля экспериментов по вытеснению модельной нефти или керосина водой, даже с относительно невысокой минерализацией.

Метод применим при проведении исследований в широком диапазоне температур и рабочего давления. Достоинством метода является возможность его применения при проведении исследований с использованием кислот и буровых растворов. Реализации алгоритма, использованного при решении обратной задачи, будет посвящена отдельная публикация.

## *Благодарности*

Работа выполнена при поддержке сотрудников компании Ситен Технологии, г. Новосибирск, с использованием разработанной ими фильтрационной установки. Теоретическая часть работы выполнена за счет гранта Российского научного фонда №22-21-00759

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ОСТ 39-195-86 Нефть. Метод определения коэффициента вытеснения нефти водой в лабораторных условиях. 1985 18с.
2. ОСТ 39-235-89 Нефть. Метод определения фазовых проницаемостей в лабораторных условиях при совместной стационарной фильтрации. С. 23-25
3. Скрипкин А. Г., Щемелинин Ю.А. Патент РФ № 2315978 Способ определения водонасыщенности керна.
4. Скрипкин А. Г. Повышение точности определения водо- нефтенасыщенности образцов рентгеновским методом. Автореф. дис. канд. техн. наук. — Новосибирск, 2008. — 17 с.
5. Скрипкин А. Г., Тупицын Е. В., Щемелинин Ю. А. Определение текущей нефтенасыщенности при совместной фильтрации нефти и газа с помощью рентгеновской установки. // Нефтяное хозяйство – 2006. – №8. – С.12-13.

© Н. В. Юркевич, А. В. Анчуглов, Д. О. Кучер, 2022