

Метод электрического каротажа через обсадную колонну RBC.

***Никифоров Юрий Вячеславович**, место работы – конструкторское бюро «Рери» группы компаний «Гео», должность - ведущий инженер, закончил Томский институт автоматизированных систем управления и радиоэлектроники в 1993 году, научные интересы - современные системы измерений и передачи данных в промышленной геофизике.*

***Жовтоножка Александр Петрович**, место работы – сервисная компания «Разрез» группы компаний «Гео», должность – генеральный директор, закончил Киевский геологоразведочный техникум в 1980г, научные интересы – геофизические исследования скважин.*

В статье представлен метод электрического каротажа через обсадную колонну RBC (Resistivity Behind Casing).

Рассмотрены трудности реализации данного типа аппаратуры и способы их преодоления. Приведены параметры аппаратуры. Рассмотрены конкретные геолого-промысловые ситуации, в которых следует применять и рекомендовать к применению аппаратуру RBC.

Приведён краткий обзор выполненных исследований при решении задачи электрометрии обсаженной скважины на месторождениях Западной Сибири.

Ключевые слова:

Исследование, обсаженная скважина, электрический каротаж, RBC, Resistivity Behind Casing, малошумящий усилитель, интерпретация.

Введение

Определение текущей нефтенасыщенности коллекторов при контроле за разработкой нефтегазовых месторождений остаётся одной из наиболее сложных задач нефтепромысловой геофизики. Особенности её решения определяются условиями проведения работ и состоянием объекта исследований. Здесь имеется в виду необходимость проведения исследований через обсадную колонну и цементное кольцо, а также сложный, зависящий от большого числа различных факторов, процесс изменения физических свойств разрабатываемого объекта.

Традиционно, информационные возможности ГИС для решения поставленной задачи связываются с применением импульсного нейтронного каротажа (ИННК/ИНГК), углерод-кислородного каротажа и, в меньшей степени, волнового акустического каротажа. В сложившейся ситуации возникает необходимость поиска альтернативных технологий и методов ГИС, возможно основанных на иных физических принципах, позволяющих максимально расширить участие геофизических исследований в решении задач контроля за разработкой месторождений.

Одной из таких сравнительно новых технологий является электрический каротаж через стальную обсадную колонну, поскольку удельное

электрическое сопротивление является наиболее информативным интерпретационным параметром для оценки коллекторских свойств и насыщения продуктивных коллекторов. В 2012 г. проводилась опытно-промышленная эксплуатация аппаратуры RBC, основанной на методе измерения удельного электрического сопротивления в скважинах, обсаженных стальной колонной.

Метод RBC (Resistivity Behind Casing)

Все приборы каротажа через обсадную колонну используют примерно одинаковый принцип: в исследуемый интервал закачивается измерительный ток, на обсадной колонне появляется разность потенциалов, отражающая распределение токов в затрубном пространстве, после чего подвижный зонд считывает эту разность потенциалов и производит вычисление кривой удельного сопротивления.

Метод RBC основан на патенте № RU 2302019 [2]. Функциональная схема измерений приведена на рис. 1. Источник трапецеидального тока I на дневной поверхности подключается к обсадной колонне поочередно (фазы А и В) через два токовых электрода выше и ниже точек измерения. При этом сама обсадная колонна играет роль гигантского «фокусирующего» электрода. Четыре этажа измерительных электродов (по 3 электрода через 120 градусов) электромеханически прижимаются к внутренней поверхности обсадной колонны. Производится измерение напряжений между этажами U12, U23,

U34 с внутренней стороны колонны, а также измерение напряжения между колонной и удаленным заземляющим электродом на дневной поверхности. Обычно для этих целей используется электрод «рыба».

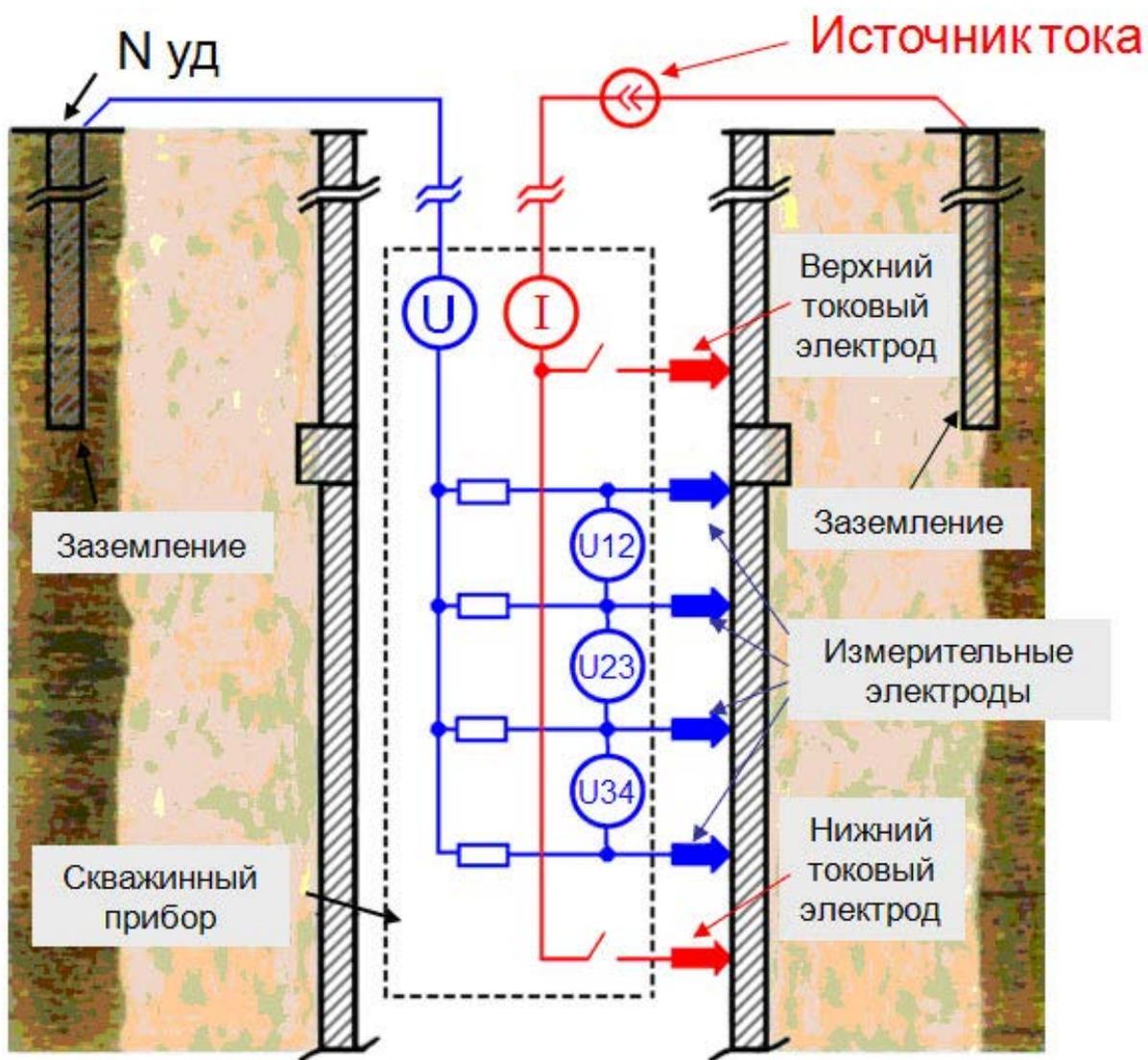


Рис. 1. Функциональная схема измерений RBC

Вычисления производятся по формулам (1) и (2) для двух точек измерения одновременно, что позволяет в 2 раза увеличить скорость каротажа.

$$\rho_{пл 1} = K_{зонда} \cdot \frac{2}{I_a \cdot U_b + I_b \cdot U_a} \frac{(U_a \cdot U_{12b} - U_b \cdot U_{12a}) \cdot (U_a \cdot U_{23b} - U_b \cdot U_{23a})}{(U_{23a} \cdot U_{12b} - U_{12a} \cdot U_{23b})} \quad (1)$$

$$\rho_{пл 2} = K_{зонда} \cdot \frac{2}{I_a \cdot U_b + I_b \cdot U_a} \frac{(U_a \cdot U_{23b} - U_b \cdot U_{23a}) \cdot (U_a \cdot U_{34b} - U_b \cdot U_{34a})}{(U_{34a} \cdot U_{23b} - U_{23a} \cdot U_{34b})} \quad (2)$$

Фазы измерений А и В содержат по полному периоду трапеции тока и следуют поочередно в соответствии с временной диаграммой работы на рис.

2. Вычисляемые значения проводимостей и сопротивлений пластов

усредняются с каждым новым периодом, что позволяет накапливать данные и уменьшать ошибку измерений, при необходимости увеличивая число циклов измерения.

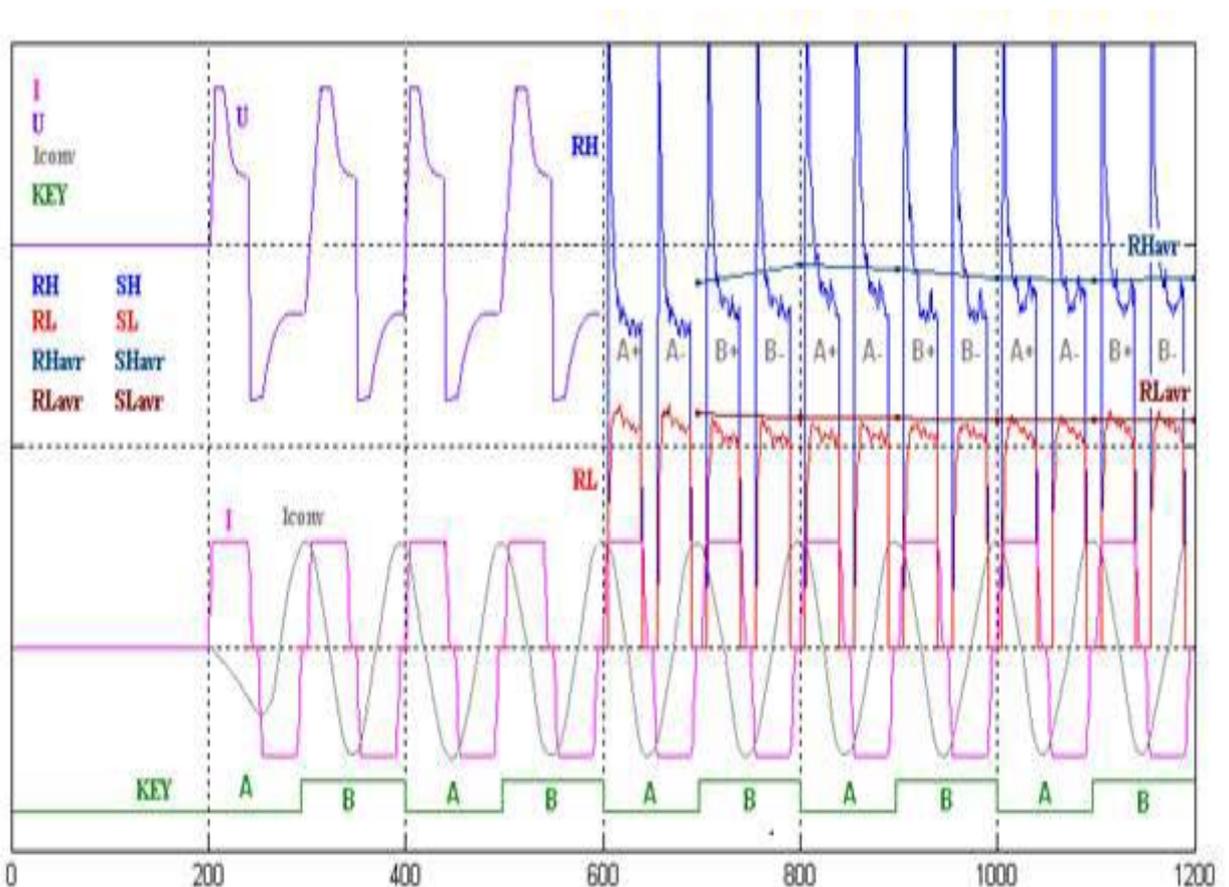


Рис. 2. Временная диаграмма работы аппаратуры RBC. Показаны точки измерения с дискретностью 100 мс. Период трапеции тока – 10 секунд.

Ток может быть в диапазоне 2.5-10 А, чем больше ток, тем меньше относительная ошибка измерений. Ограничение тока обычно связано с применением 3-жильного кабеля вместо 7-жильного.

Метод RBC позволяет практически полностью исключить влияние сопротивления соединительных муфт обсадной колонны на результаты измерений. При этом электрическое сопротивление муфты может меняться в широких пределах от свойств материала, срока эксплуатации скважины и степени коррозии.

Трудности реализации метода

Несмотря на то, что попытки создать работающий комплект аппаратуры предпринимаются с 90 годов прошлого века, в реальных условиях аппаратура либо неработоспособна, либо требует дорогостоящей технологии по химической и механической очистке поверхности скважины. Причем это относится как к отечественной, так и к импортной аппаратуре. При высокой проводимости скважинной жидкости, как правило, требуется ее замена в зоне исследования на техническую воду. Сложная механика прибора удорожает его техническое обслуживание.

Все эти вопросы возникли при опытно-промышленной эксплуатации в 2008 году аппаратуры ЭКРАН, которая являлась прототипом RBC. Метод измерения аппаратуры ЭКРАН основывался на том же патенте № RU 2302019 [2], принадлежащим группе компаний «Гео». На месторождениях Среднего Приобья были проведены исследования скважин,

которые показали принципиальную работоспособность метода. В большинстве скважин был получен качественный материал, и геологические задачи были решены. Тем не менее, в результате этих работ стало понятно, что эксплуатационные характеристики аппаратуры не позволяют использовать ее в широком диапазоне скважинных условий.

При разработке метода RBC были учтены результаты испытаний прототипа, и в конструкцию аппаратуры внесены значительные изменения.

- 1) Измерения в диапазоне нановольт. Так как сопротивление участка обсадной колонны между измерительными электродами составляет 20-40 мкОм, то даже при токе 2.5-10 А напряжение между измерительными электродами составляет не более десятков микровольт, а требуемый уровень шума – единицы нановольт;
- 2) Плохое прижатие измерительных электродов из-за коррозии, особенно в «соленых» скважинах и скважинах с большим сроком эксплуатации, прижатие только части измерительных электродов, прижатие в условиях большого угла наклона скважины;
- 3) Плохое прижатие токовых электродов, утечки с токовых электродов через раствор на измерительные электроды;
- 4) Утечки с корпуса прибора через раствор на измерительные электроды, влияние оплетки каротажного кабеля на корпус прибора;

5) Использование резинотехнических изделий в условиях высокой агрессивности среды в скважине и маслonaполненная конструкция аппаратуры приводят к удорожанию эксплуатации.

В аппаратуре RBC уровень среднеквадратичного шума приведенного к входу составляет 2.5 нВ при времени измерения 10 секунд. Для этого во входных цепях применяется параллельное включение малошумящих усилителей, источники питания в приборе выполнены по технологии с низким уровнем наводок, применяется гальваническая развязка измерительной электроники.

В простейших конструкциях данного типа аппаратуры три электрода на этаже соединяются проводами и далее поступают на измерительные цепи. В реальных условиях скважин такая конструкция оказывается неработоспособной, т.к. утечка токов с раствора на неприжатые (или плохо прижатые) электроды образует делитель напряжения помехи на измерительные цепи.

В аппаратуре RBC используется адаптивная схема измерений в зависимости от качества прижатия 12 независимых измерительных электродов 4 этажей (рис. 3). После механического прижатия проводится измерения электрических сопротивлений прижатия каждого электрода на обсадную колонну, и схема измерений адаптируется, исключая плохо прижатые электроды. В случае, когда все три электрода на этаже оказались

неприжатыми, вынужденно производится процедура автоматического повторного прижатия.

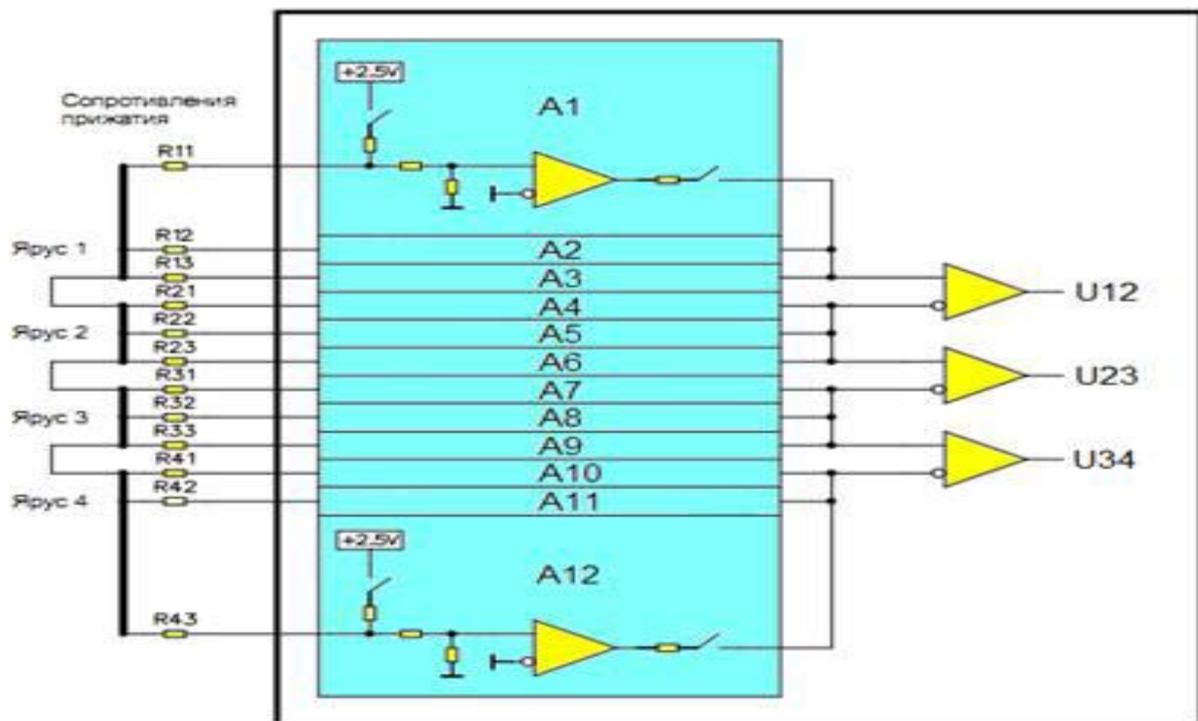


Рис. 3. Адаптивная схема измерений.

Токовые электроды и измерительная часть прибора электрически изолированы от ОК и друг от друга дополнительным промежутком по длине скважины. Используется электронная стабилизация потенциала корпуса прибора по потенциалу обсадной колонны для исключения влияния утечек с корпуса прибора на обсадную колонну и измерительные электроды, особенно в скважинной жидкости с малым УЭС. Если нет напряжения между корпусом прибора, обсадной колонной и измерительными электродами, то нет и токов с корпуса на обсадную колонну и, особенно на измерительные электроды.

На рисунке 4 показано влияние работы системы стабилизации на смещение двух одновременно измеряемых проводимостей пластов при стендовых измерениях. В условиях реальных скважин паразитные смещения могут достигать сотен мСм/м и полностью блокировать работу аппаратуры.

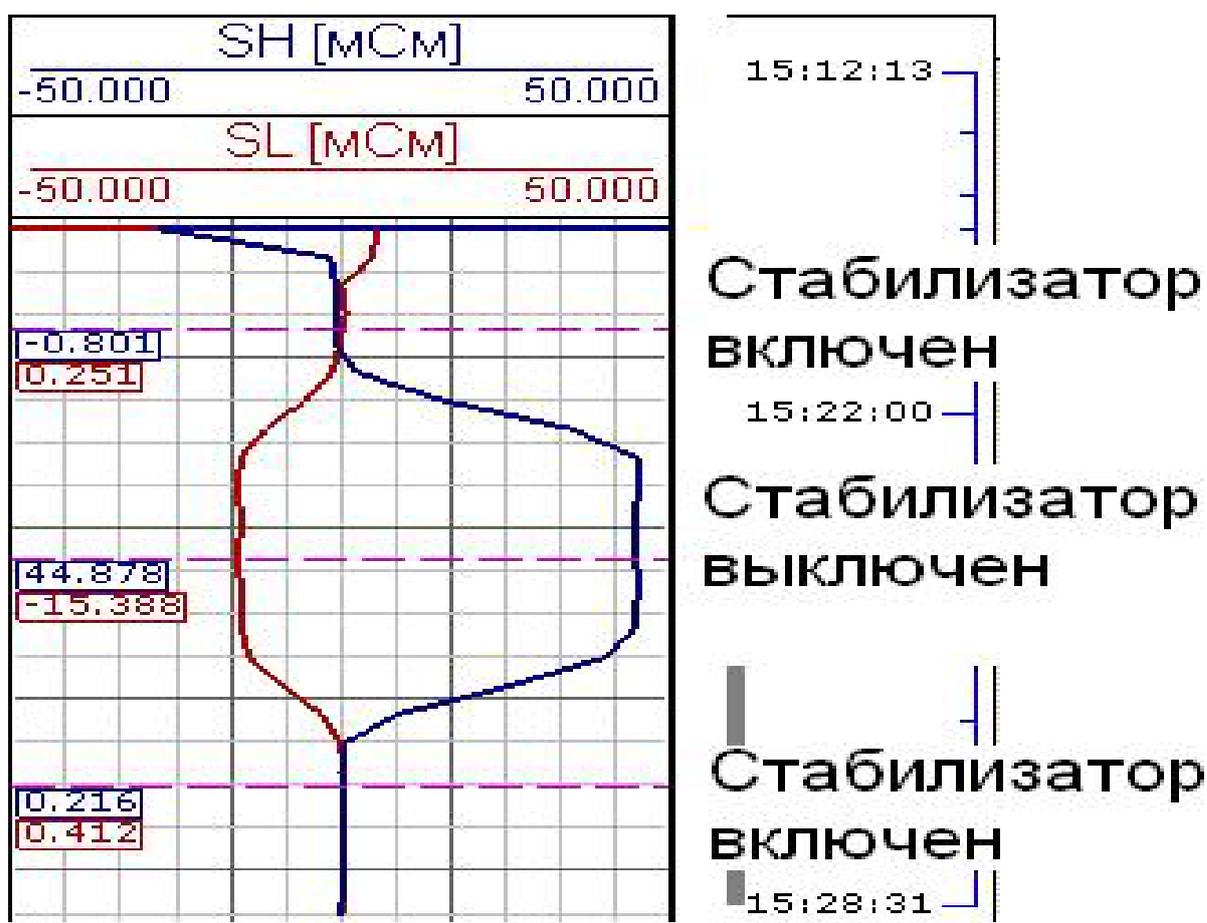


Рис. 4. Система стабилизации потенциала корпуса прибора

Измерительные электроды с проводами также изолированы от корпуса прибора и от скважинной жидкости. Предусмотрена оперативная смена измерительных электродов в полевых условиях, например в случае поломки.

Аппаратура RBC

Скважинный прибор RBC показан на рис. 5 и состоит из пяти модулей:

- 1) Верхний токовый электрод;
- 2) Верхний электромеханический блок;
- 3) Электромеханический блок;
- 4) Нижний электронный блок;
- 5) Нижний токовый электрод.

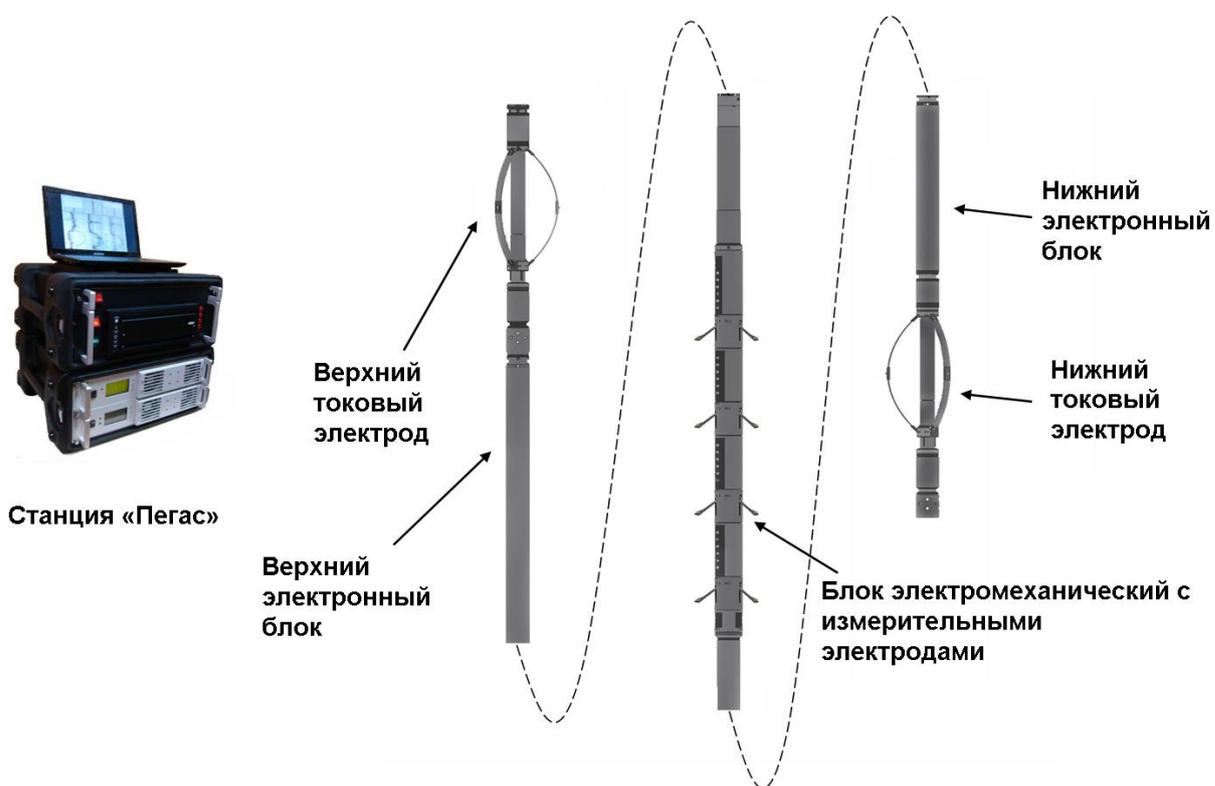


Рис. 5. Внешний вид скважинного прибора RBC.

Силовые и измерительные цепи разнесены: управление ключами тока, измерение тока, а также телеметрия для связи с поверхностью размещаются в верхнем электронном блоке, а измерители напряжения – в нижнем. Токовые электроды имеют стеклопластиковые изоляторы.

Минимально допустимое количество уплотняющих элементов из РТИ позволяет использовать аппаратуру в скважинах с высокой загазованностью. Аппаратура РВС не является маслонаполненной, что позволяет снизить расходы при обслуживании. Рычаги и этажи измерительных электродов механически развязаны.

Основные параметры аппаратуры приведены в таблице 1.

Диапазон измерения УЭС $\rho_{\text{п}}$, Ом·м	0.2-100
Погрешность $\Delta\rho_{\text{п}}$	5% \pm 2 мСм/м
Глубинность исследования, м	4
Диаметр исследуемых скважин, мм	120–168
Минимальное УЭС скважинной жидкости, Ом·м	0.1
Наземная система	Станция «Пегас» или аналогичная
Потребляемая мощность, Вт	2000
Рабочая температура, °С	0–125
Максимальное давление, МПа	60
Максимальный диаметр, мм	90
Длина, м	9,5
Вес, кг	150

Таблица 1. Параметры аппаратуры

Применение технологии RBC.

Учитывая технологические преимущества аппаратуры и информативность измеряемого параметра, востребованность технологии RBC прогнозируется в случаях необходимости решения следующих задач:

- Определение текущего насыщения пластов с более высокой точностью, по сравнению с ядерно-физическими методами.
- Контроль заводнения пласта периодическими замерами с определением положения водо-нефтяного контакта и текущего нефтенасыщения ($K_n \text{ тек}$).
- Определение текущего насыщения в низкопористых коллекторах.
- Изучение геоэлектрических свойств и оценка насыщенности перспективных пластов, пропущенных при исследованиях в открытом стволе. Поиск новых объектов в транзитных участках скважины.
- Достоверное определение $K_{нг}$ частично-газонасыщенных коллекторов в условиях низкой минерализации пластовых вод.

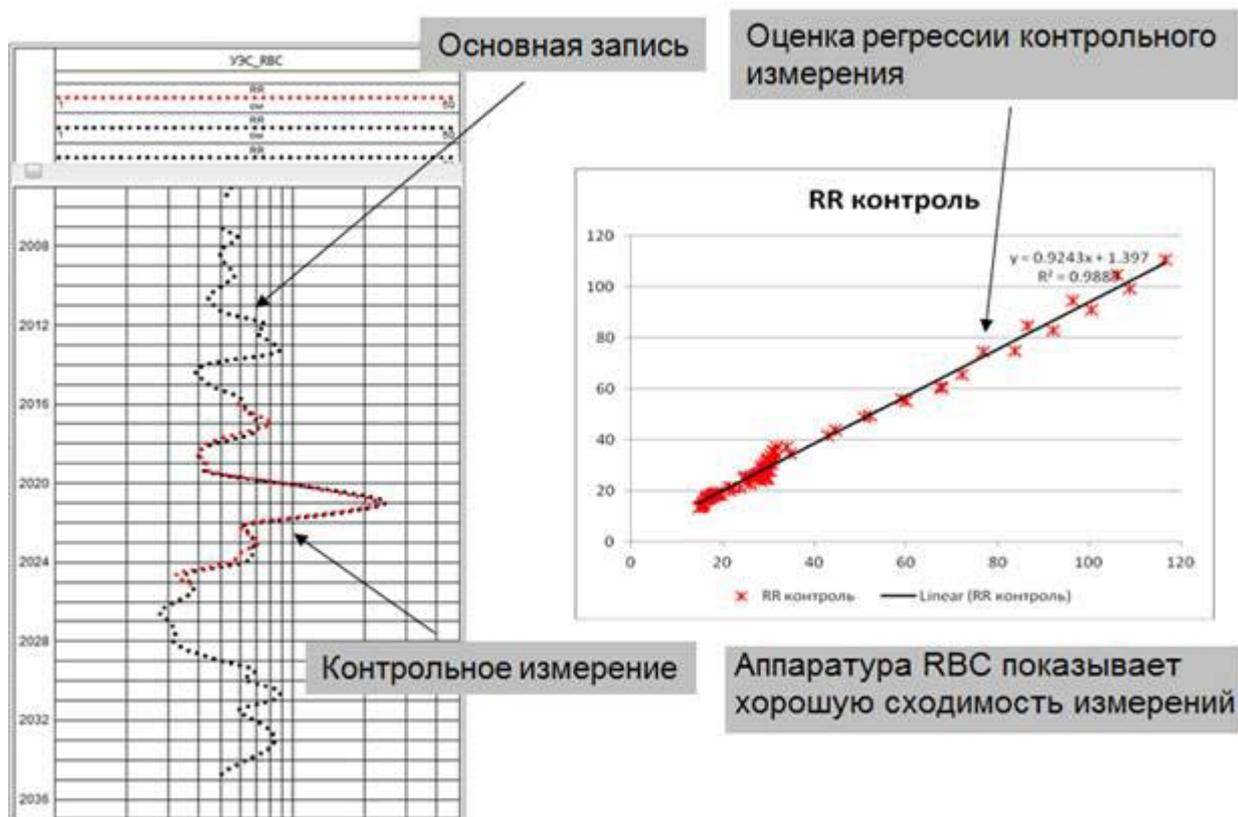


Рис. 6. Сходимость измерений RBC

При проведении опытно-промышленной эксплуатации, технология RBC применялась для решения задачи определения текущего насыщения неперфорированного пласта при мониторинге продуктивных горизонтов.

Для решения поставленной задачи, помимо замеров УЭС аппаратурой RBC, включал в себя анализ первичных данных РК и электрометрии необсаженной скважины. Исследования аппаратурой RBC проводились точечными замерами удельного электрического сопротивления.

В общем случае, алгоритм решения поставленной задачи включал в себя:

- **Анализ коллектора** – интерпретация выполнялась путём построения объёмной петрофизической модели для учёта каждого компонента

горной породы на измеряемые физические параметры с целью максимально точного определения фильтрационно-емкостных свойств горной породы. Для выбора системы интерпретации учтена вся доступная геолого-геофизическая информация, рекомендуемые алгоритмы определения подсчётных параметров рассматриваемых пластов, прочие сведения о месторождении, а также универсальные алгоритмы построения петрофизических моделей.

- **Оценка первичной насыщенности коллекторов по ГИС** – рассчитывался коэффициент начальной нефтенасыщенности ($K_{н\text{нач}}$).
- **Оценка текущей насыщенности коллекторов по технологии RBC** - текущий коэффициент нефтенасыщенности определен путем уточнения построенной модели электропроводности коллектора по замерам текущего удельного сопротивления прибором RBC. Изменение начального (по ГИС в открытом стволе) удельного электрического сопротивления связывалось с возможным замещением пластового флюида водой, вследствие выработки пласта.
- **Прогноз притока** - по сопоставлению начальных и текущих коэффициентов нефтенасыщенности осуществлялась оценка степени выработки пласта, в заключении приведена качественная характеристика притока.

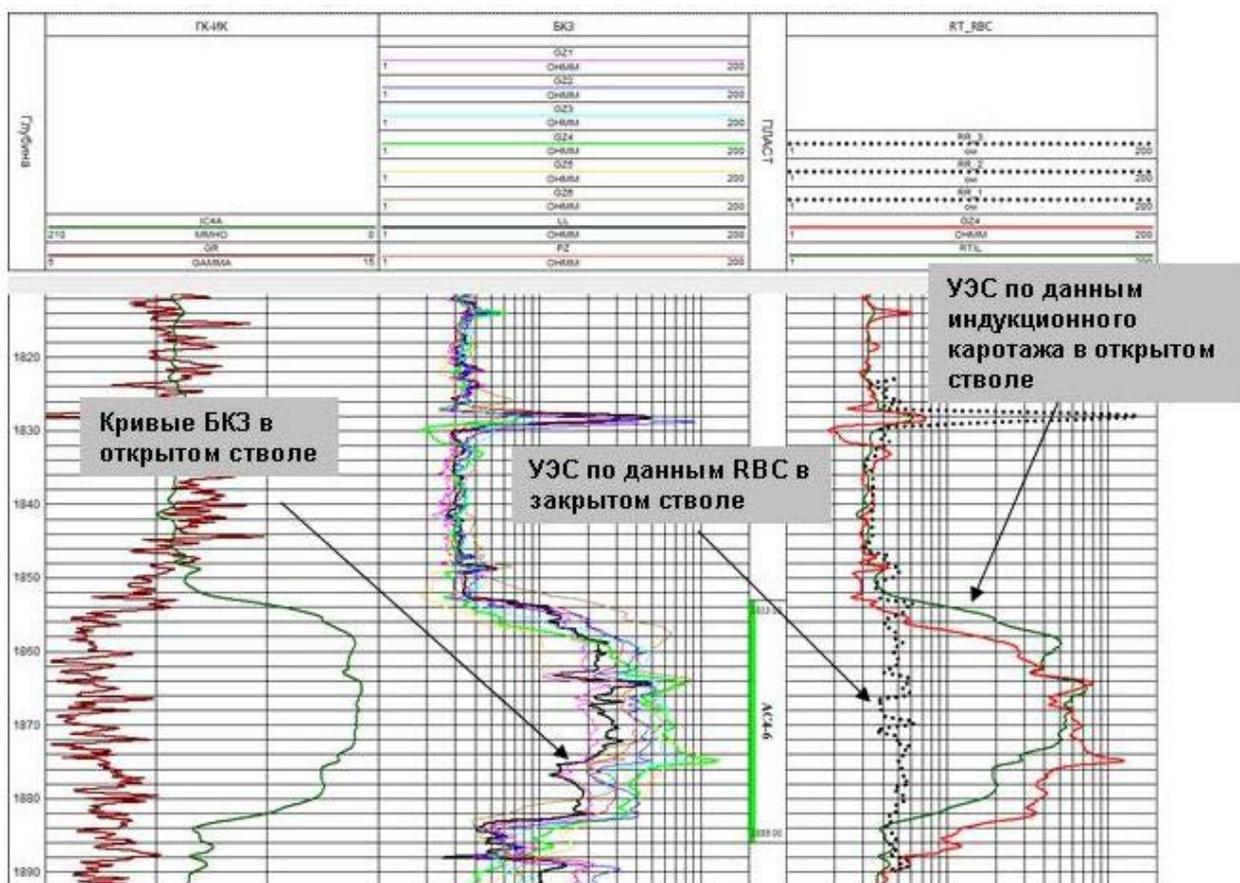


Рис. 7. Пример обнаружения обводненного пласта.

Закключение

Технология RBC при контроле за разработкой обладает рядом преимуществ:

- большая глубинность исследования минимизирует влияние скважинной жидкости и ослабляет влияние состояния цементного камня за колонной;
- безальтернативное определение текущего насыщения в низкопористых коллекторах, где применение ядерно-физических методов неэффективно;
- хорошая сходимость результатов в различных скважинных условиях;

- полученные данные – удельное электрическое сопротивление, как интерпретационный параметр легко понимаем, и может быть использован в стандартных алгоритмах интерпретации;
- адаптивная схема измерений в зависимости от качества прижатия измерительных электродов особенно актуально в старых скважинах;
- отсутствие необходимости механической и/или химической подготовки скважины существенно снижает затраты при проведении измерений.

Опытно-промышленная эксплуатация технологии RBC проведена в скважинах ряда месторождений Западной Сибири в широком диапазоне условий применения и показала высокую сходимость прогнозного характера притока с промысловыми данными освоения. Аппаратура RBC, существующие интерпретационные схемы и алгоритмы обработки применимы для получения прогноза текущей насыщенности коллекторов в неперфорированных интервалах с высокой степенью достоверности.

Список литературы

1. Патент № RU 2176802, МПК в 01У 3/20 Способ электрического каротажа обсаженных скважин / Кашик А.С., Рыхлинский Н.И.
2. Патент на изобретение № RU 2302019 от 18.04.2006. Способ электрического каротажа обсаженных скважин. / Серебрянский В.В., Юхлин В.И.