

УДК 550.837.63

© Д. А. Коновалов, Я. В. Фаттахов, А. Р. Фахрутдинов, В. А. Шагалов, Р. Ш. Хабипов,  
А. Н. Аникин

## СКВАЖИННЫЙ ПРИБОР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАСТОВОГО ФЛЮИДА

Представлен прибор, предназначенный для измерения диэлектрических характеристик пластового флюида, необходимых для определения фильтрационно-емкостных свойств пласта и пластового флюида. Процесс измерения заключается в регистрации амплитудных и фазовых характеристик высокочастотных колебаний, проходящих через две измерительные конденсаторные ячейки, заполненные исследуемым флюидом.

*Кл. сл.:* диэлектрическая проницаемость, емкостной датчик, цилиндрический конденсатор, измерение емкости, влагомер, диэлькометр

### ВВЕДЕНИЕ

Изучение пластовых флюидов непосредственно в скважине имеет существенное значение при подготовке любого проекта добычи углеводородов. Этим объясняется актуальность создания аппаратуры, дающей достоверные сведения о свойствах пластовых флюидов при прохождении скважины. Существует множество методов определения влажности нефти, имеющих свои достоинства и недостатки. Измерение влажности нефти может быть основано на различии в поглощении СВЧ-энергии водой и нефтью. При увеличении влажности нефти происходит ослабление СВЧ-сигнала по мощности. При этом происходит изменение напряжения на выходе сигнального детектора, которое сравнивается с напряжением на выходе опорного детектора, не зависящим от влажности нефти и служащим для компенсации временной и температурной нестабильности СВЧ-тракта, а также нестабильности напряжения питания СВЧ-генератора [1].

Существует спектрофотометрический метод измерения влажности. Он основан на зависимости между содержанием воды в эмульсии и спектральными свойствами эмульсии. Метод измерения состоит в следующем. Измеряемую пробу нефти заливают в прозрачную кювету и через нее пропускают световой луч ИК-диапазона, получаемый при помощи узкополосного оптического фильтра. Интенсивность светового сигнала, прошедшего через кювету, измеряют фотозащитным элементом. Зная коэффициенты поглощения воды и нефти в измеряемом спектральном диапазоне с учетом толщины слоя нефти в кювете, можно судить

о содержании воды в нефти [2].

Одним из методов получения информации о содержании влаги в нефти является измерение диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  пластового флюида путем измерения емкости конденсатора, заполненного флюидом. Для измерения диэлектрической проницаемости на частотах от сотен Гц до 50 МГц применяются колебательные контуры с сосредоточенными параметрами. При таких измерениях исследуемая жидкость заливается в измерительную ячейку, т. е. измерительный конденсатор. В качестве измерительных конденсаторов используются плоские, дисковые, цилиндрические и сферические конденсаторы. Наиболее широко распространены цилиндрические конденсаторы. Они могут состоять из одного цилиндра и внутреннего, коаксиально расположенного электрода, либо из трех коаксиальных цилиндров. При этом наружный и внутренний цилиндры соединены между собой и при подключении к измерительному прибору заземляются. Средний цилиндр для уменьшения краевых эффектов делается на 4–6 мм короче наружного и внутреннего цилиндров [3].

### РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТКИ

Прибор состоит из двух измерительных ячеек, детектирующего модуля, контроллера, модуля связи и блока питания (рис. 1). Работа прибора состоит в формировании высокочастотного сигнала (с помощью синтезатора частот) в диапазоне от 1 до 100 МГц, усилении его и подаче на две измерительные ячейки, заполненные исследуемым флюидом.

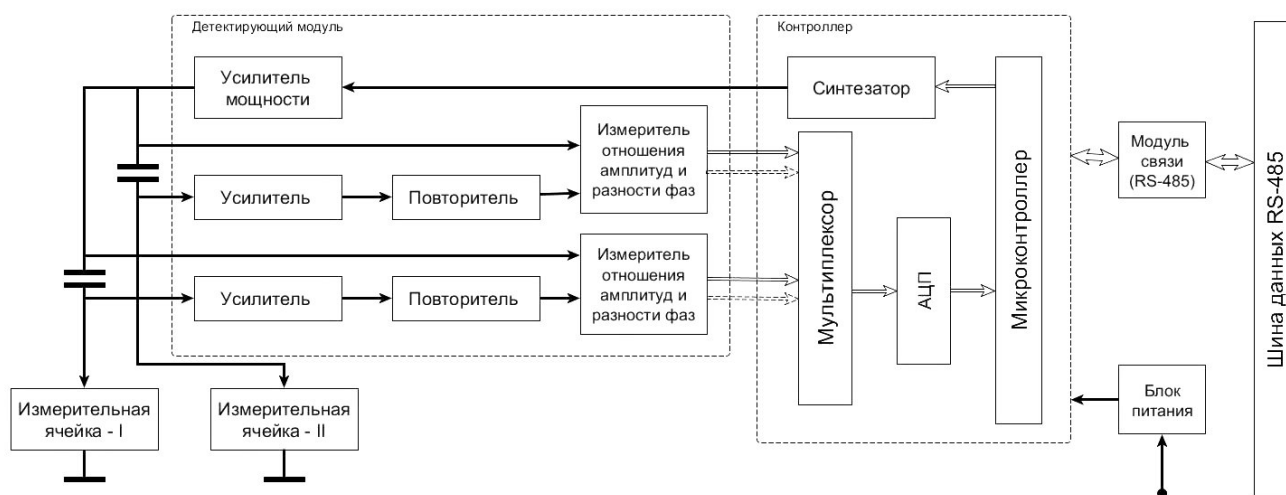


Рис. 1. Блок-схема скважинного прибора для измерения диэлектрических характеристик пластового флюида

Сигналы с ячеек подаются на два измерителя. Далее сигналы, пропорциональные отношению амплитуд и разности фаз, подводимых к ячейкам и прошедших через них колебаний через мультиплексор поступают на АЦП. Оцифрованные значения отношений амплитуд и разности фаз поступают в микроконтроллер для предварительной обработки, и далее обработанные данные передаются в рабочую станцию.

Прибор предназначен для работы как самостоятельно, так и в составе скважинной лаборатории в нефтяных скважинах на глубинах до 5 км, и должен работать в условиях повышенных давлений и температур. Это накладывает жесткие условия на конструкцию, материалы и элементную базу измерительного блока, который должен работать при температурах до 120 °С и давлении до 100 МПа. Поэтому в конструкции использованы высокопрочные сплавы как для наружного корпуса, так и для измерительной ячейки и шасси прибора с каналом для флюида. Блок электроники выполнен из радиодеталей в соответствующем исполнении.

#### **Основные характеристики прибора и условий эксплуатации**

Диаметр исследуемых скважин, мм	—	от 170 до 300
Температура в скважине, °С	—	от +10 до +120
Гидростатическое давление жидкости в скважине, МПа	—	до 100
Длина прибора, м	—	не более 2
Вес прибора, кг	—	не более 100
Диапазон рабочих частот, МГц	—	1÷100
Напряжение питания, В	—	150÷300
Потребляемый ток, А	—	не более 1

#### **ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ЯЧЕЙКА**

Как отмечалось выше, разработанный прибор основан на измерении параметров ВЧ-поля, проходящего через конденсаторные измерительные ячейки. Особенностью данного прибора является использование конденсаторного блока, состоящего из двух конденсаторов. Как отмечалось в [4], чувствительность конденсаторной ячейки существенно зависит от соотношения нефти и воды в исследуемом флюиде, а также от длины центрального электрода. При преобладании воды в исследуемом флюиде чувствительность конденсаторной ячейки увеличивается при уменьшении длины центрального электрода, в то время как при преобладании нефти в исследуемом флюиде наблюдается обратная закономерность.

В представленной в настоящей статье измерительной ячейке применены два конденсатора с электродами различной длины, что позволяет измерять содержание нефти в исследуемом флюиде в высокой точности для различных концентраций нефти в пластовом флюиде. Эскиз измерительной ячейки представлен на рис. 2. Конструктивно измерительная ячейка представляет собой два измерительных конденсатора, состоящих из корпуса 1 (наружный электрод) и двух внутренних электродов различной длины 4 и 7, зафиксированных от радиальных перемещений с помощью диэлектрических вставок 5 с отверстиями для протекания скважинного флюида. С двух сторон к корпусу 1 с помощью резьбы и уплотнений присоединены фланцы 2 и 3, которыми блок ячеек крепится к шасси с электроникой. Во фланцах также имеются отверстия для скважинного флюида. Электрод 4 через отверстия во фланце 2 с по-

мощью металлических шпилек 6 и 7 (шпилька 7 одновременно выполняет функцию короткого внутреннего электрода), размещенных в проходном изоляторе, подключены к детекторному модулю, размещенному на шасси с электроникой.

### ПЛАТА ЭЛЕКТРОНИКИ

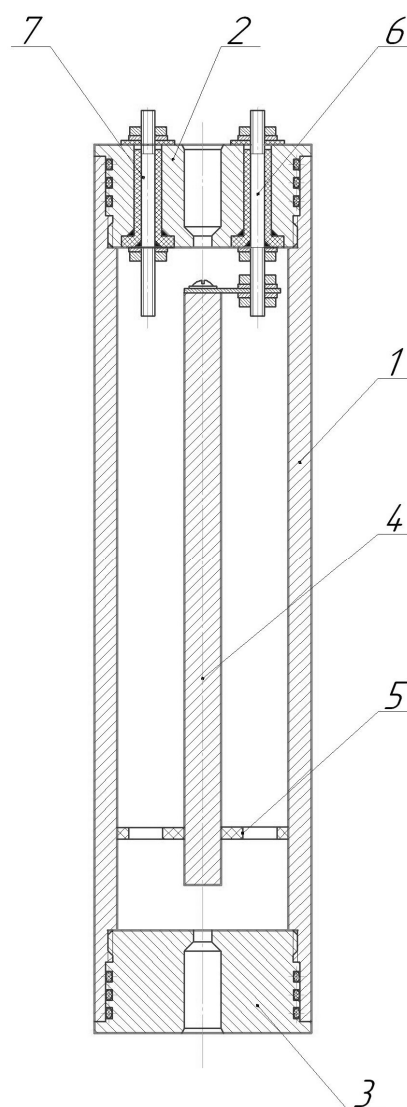
Формирование ВЧ-сигнала, прием сигнала с измерительного блока, предварительная обработка сигнала и передача полученных данных для дальнейшего использования осуществляется в блоке электроники. Основой платы электроники является микропроцессор STM32F373 [5]. Микроконтроллер формирует сигналы для управления синтезатором в заданном диапазоне частот. В приборе применен синтезатор прямого цифрового синтеза AD9851, управляемый по SPI интерфейсу [6]. Усиленный ВЧ-сигнал через коммутатор поступает на один из двух емкостных делителей, состоящих из постоянной емкости и измерительного конденсатора. ВЧ-сигналы с измерительных конденсаторов поступают на два измерителя отношения амплитуд и разности фаз, выполненных на микросхемах AD8302 [7]. Далее низкочастотные сигналы, пропорциональные отношению амплитуд и разности фаз, с измерителей поступают на 4 входа микроконтроллера и с помощью внутреннего коммутатора подключаются к АЦП микроконтроллера. Далее оцифрованные данные обрабатываются в микроконтроллере. Затем предварительно обработанные данные через преобразователь RS232-RS485 на микросхеме MAX485 передаются в рабочую станцию [8].

Для управления прибором разработано специализированное программное обеспечение (СПО), предназначенное для реализации функций управления и цифровой обработки данных в блоке измерения диэлектрических свойств пластового флюида.

СПО обеспечивает:

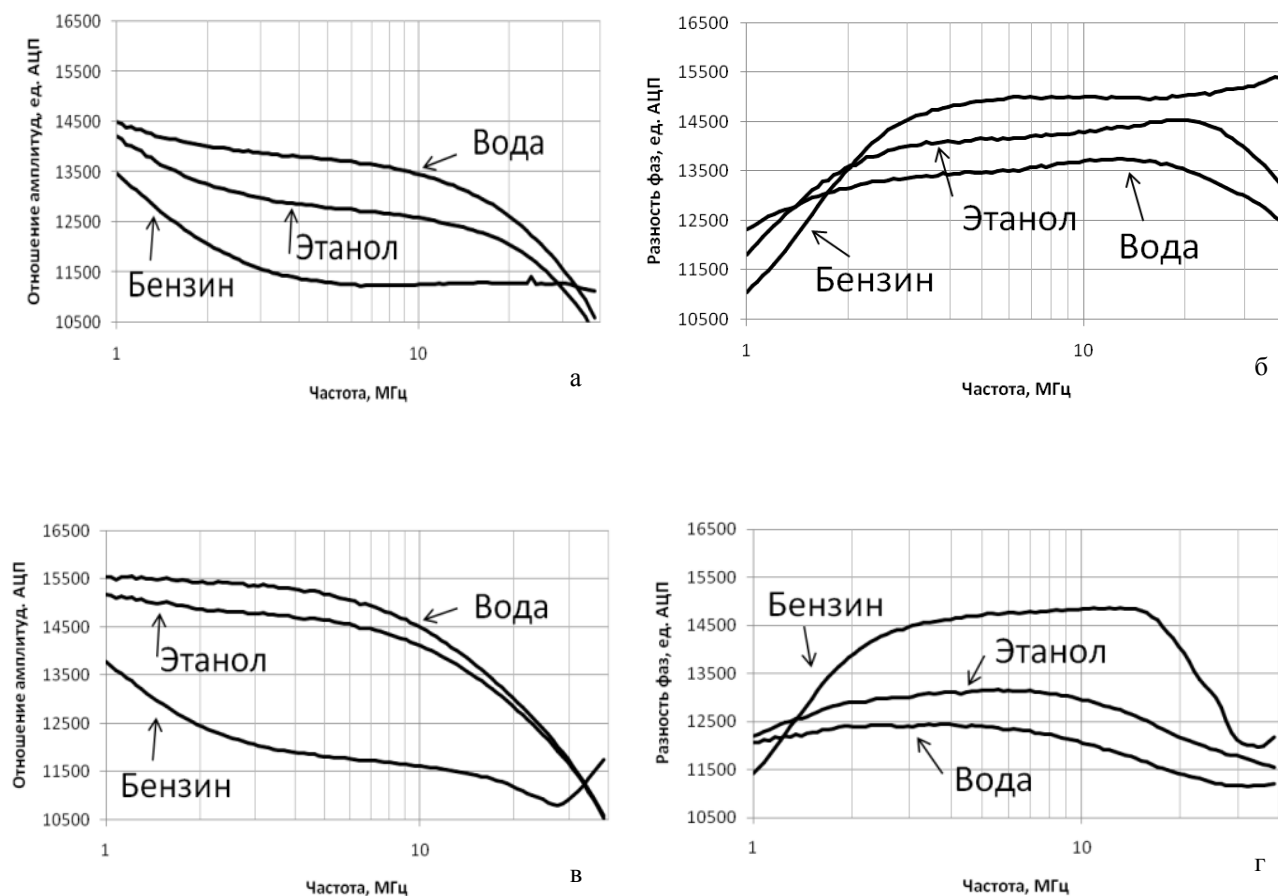
- прием и обработку управляющих сигналов-директив по каротажному кабелю;
- выполнение программы управления измерительными каналами;
- предварительную цифровую обработку данных, поступающих от измерительных каналов;
- формирование массива данных для передачи в рабочую станцию;
- передачу данных в рабочую станцию.

К программируемым устройствам относится микроконтроллер STM32F373. СПО реализуется как прошивка для микроконтроллера STM32F373. Исходный текст программы на языке C разработан в среде IDEµ Vision V5.24.2.0.



**Рис. 2.** Чертеж измерительной ячейки.  
1 — корпус, 2 — фланец, 3 — фланец,  
4 — внутренний электрод, 5 — диэлектрические вставки, 6 — металлическая шпилька, 7 — короткий внутренний электрод / шпилька

Для тестирования и отображения визуальных данных с прибора написано прикладное программное обеспечение (ППО). Программа запускается на рабочей станции, подключенной к прибору по каналам связи. Программа состоит из модулей настройки аппаратуры и каналов связи, блока тестирования и блока исследования, в котором отображаются исследовательские данные. В блоке настройки можно установить скорость передачи данных и прочие параметры. Блок тестирования проверяет корректность получаемых данных.



**Рис. 3.** Частотные зависимости сигналов детекторных выходов детектирующего модуля для трех тестовых жидкостей и для двух различных длин электродов — 50 мм (а и б), 150 мм (в и г). а, в — сигнал, пропорциональный отношению амплитуд; б, г — сигнал, пропорциональный разности фаз

Блок исследования позволяет запустить процесс получения и отображения данных в виде графиков, что позволяет оператору визуально оценить корректность и целостность. Программное обеспечение также позволяет вести протокол ошибок передачи данных. Программа написана на языке высокого уровня С#.NET в среде Visual Studio и выполняется под операционной системой MS Windows.

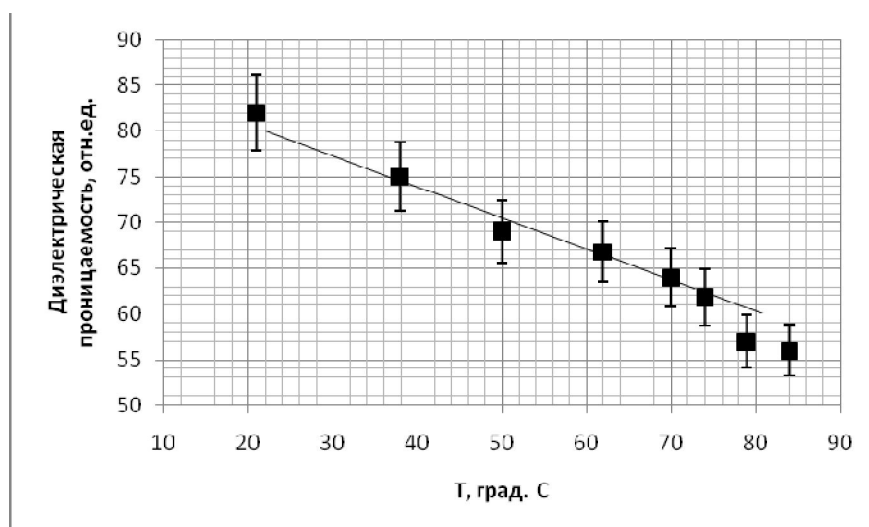
### РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

На рис. 3 представлены результаты проведенных предварительных испытаний прибора для двух фиксированных длин центральных электродов. Эксперименты проводились для трех тестовых жидкостей: воды, этанола и бензина

с диэлектрическими проницаемостями 80, 24 и 2 относительных единиц соответственно. Испытания проводились на частотах от 1 до 38.5 МГц.

Из приведенных данных видно, что для определения диэлектрической проницаемости необходимо учитывать сигнал от обоих выходов детектора. Для этого необходимо получить калибровочную кривую на выбранной частоте из рабочего диапазона частот. Экспериментальные точки аппроксимировались аналитической функцией, которая затем была запрограммирована в ПЗУ микроконтроллера.

Проведенные испытания показали, что тестовые вещества с различными значениями диэлектрической проницаемости уверенно дифференцируются с помощью данного скважинного прибора. На основании анализа полученных



**Рис. 4.** Температурная зависимость диэлектрической проницаемости дистиллированной воды. Прямая линия отображает теоретическую зависимость; планки относительных погрешностей экспериментальных точек соответствуют 5 %

данных можно сделать вывод, что оптимальным является диапазон рабочих частот от 4 МГц до 10 МГц, в котором наблюдается минимальная дисперсия сигнала и максимальная дифференциация.

Для проверки точности прибора были проведены измерения известной температурной зависимости диэлектрической проницаемости воды [9]. Как видно из рис. 4, экспериментальные точки для температурной зависимости диэлектрической проницаемости дистиллированной воды хорошо соответствуют теоретической температурной зависимости.

*Разработка опытного образца прибора велась в кооперации с ООО "ТНГ-Групп" и КФУ по договору "Создание комплекса технических средств и программных продуктов для эффективной разработки залежей нефти в сложностроенных карбонатных коллекторах с использованием горизонтальных скважин и гидроразрыва пласта" в рамках реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства (Постановление Правительства РФ № 218, (6-я очередь)).*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берлинер М.А. Измерение влажности в диапазоне СВЧ. М.: Энергия, 1973. 400 с.
2. Мухитдинов, М.М., Мусаев Э.С. Оптические методы и

устройства контроля влажности. М.: Энергоатомиздат, 1986. 95 с.

3. Основы диэлектрической спектроскопии: учебное пособие для студентов физического факультета / Под ред. Ю.А. Гусева. Казань: Изд-во КГУ, 2008. 112 с.
4. Демьянов А.А. Измерительный преобразователь нефтяного влагомера. Патент РФ № 5046667/25, заявл. 06.05.1992; опубл. 15.12.1994.
5. STM32F373CCT6 Data Sheets. URL: <http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/f0/ac/ee/70/19/13/4f/56/DM00046749.pdf/files/DM00046749.pdf/jcr:content/translations/en.DM00046749.pdf> (дата обращения: 22.10.2017).
6. AD9851 Data Sheets. URL: [http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/AD9851.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD9851.pdf) (дата обращения: 22.10.2017).
7. AD8302 Data Sheets. URL: [http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/AD8302.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD8302.pdf) (дата обращения: 22.10.2017).
8. MAX485 Data Sheets. URL: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX1487-MAX491.pdf>, (дата обращения: 22.10.2017).
9. Эйзенберг Д., Кауфман В. Структура и свойства воды. Л.: Гидрометеоздат, 1975. 280 с.

*Федеральный исследовательский центр "Казанский научный центр Российской Академии наук" (Коновалов Д.А.)*

Контакты: Коновалов Дмитрий Александрович,  
dak@kfti.knc.ru

*Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского, обособленное структурное подразделение Федерального исследовательского центра "Казанский научный центр Российской академии наук" (Коновалов Д.А., Фаттахов Я.В., Фахрутдинов А.Р., Шагалов В.А., Хабипов Р.Ш., Аникин А.Н.)*

Материал поступил в редакцию 28.06.2018

## **DOWNHOLE TOOL FOR MEASURING THE DIELECTRIC CHARACTERISTICS OF RESERVOIR FLUID**

**D. A. Konovalov<sup>1</sup>, Ya. V. Fattakhov<sup>2</sup>, A. R. Fakhrutdinov<sup>2</sup>,  
V. A. Shagalov<sup>2</sup>, R. Sh. Khabipov<sup>2</sup>, A. N. Anikin<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Federal research center "Kazan scientific center of the Russian Academy of Sciences". Kazan, Tatarstan, Russia*

<sup>2</sup>*The Kazan E. K. Zavoisky Physical-Technical Institute of the Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Kazan, Tatarstan, Russia*

In work the device for measurement of dielectric characteristics of a reservoir fluid is presented. This device is designed to work in a well with a depth of up to 5 km. Measurements of dielectric characteristics are made by the capacitive divider method, and both amplitude and phase changes of high frequency oscillations passing through two measuring capacitor cells filled with the investigated fluid are taken into account. Measuring cells differ in the length of the central electrode and are designed to work in different parts of the oil-water concentration range. Based on the results of the tests, the optimal range of operating frequencies of the device is determined, depending on the design of the cells used.

*Keywords:* dielectric constant, capacitive sensor, cylindrical capacitor, capacitance measurement, moisture meter