

УДК 621.372.8

СВЧ ИЗМЕРИТЕЛИ ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ УГЛЕВОДОРОДНЫХ СМЕСЕЙ (РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И КОНСТРУКЦИЙ)

К. Д. Казаринов, И. Г. Полников

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, 141190, Московская область, г. Фрязино, пл. академика Введенского, д. 1

Статья поступила в редакцию 23 июля 2018 г.

Аннотация. В работе представлены результаты экспериментальных исследований по определению концентрации воды в жидких углеводородных средах с использованием метода волноводно-диэлектрического резонанса с помощью разработанных и изготовленных в ФИРЭ им. В.А.Котельникова РАН лабораторных макетов измерителей в микроволновом диапазоне, защищенных тремя патентами на изобретения.

Ключевые слова: сверхвысокие частоты (СВЧ), крайне высокие частоты (КВЧ), сантиметровые и миллиметровые волны, диэлектрическая проницаемость, коэффициент поглощения, водные растворы, углеводородные смеси, контроль содержания воды, волноводно-диэлектрический резонанс, волноводная камера.

Abstract. The results of works on the use of the waveguide-dielectric method for monitoring and investigation of highly absorbing liquids with the help of thin polyethylene capillary in a metal waveguide are proposed. The method is based on the features of the passage of a waveguide H_{10} -wave through a waveguide-capillary resonator. The capillary was filled with a highly absorbing liquid and is located in a single-mode waveguide parallel to its narrow walls and in the middle of a wide wall (in the region of the maximum of the electric field of the H_{10} wave). There is a theoretical confirmation of the experimentally detected optimal capillary size with the most pronounced resonant absorption maximum of microwave radiation in the measuring chamber. A new design of a tunable waveguide microwave resonator

intended to be used in systems of measuring dielectric parameters of highly absorbing liquids is proposed. The resonator design provides adjustment of the connection with the object of measurement and high stability of the measurement results. The concentration of water in the hydrocarbon mixtures (ethanol, methanol, diethylene glycol) was measured. A new method for controlling the content of a substance in a liquid mixture was developed. The method is based on measuring the dependence of the absorption of microwave radiation on the temperature of the mixture. This method discovers new possibilities of measuring the concentration of water in liquid mixtures. A constructive improvement of the resonance measuring chamber was carried out. This made it possible to ensure the maximum quality factor of the resonator for each concentration of matter in the liquid being studied and to increase the sensitivity of measurements of the dielectric parameters of the liquid. The results of this work can be used in the oil and gas industry, pharmaceutical and food industries, in biomedical research. The results of the research have been reported at VII International Congress "Low and Superlow Fields and Radiations in Biology and Medicine".

Key words: ultrahigh frequencies (microwave frequencies), extremely high frequencies (EHF), centimeter and millimeter waves, dielectric constant, absorption coefficient, aqueous solutions, hydrocarbon mixtures, water content monitoring, waveguide dielectric resonance, waveguide chamber.

1. Введение

В нефтегазовой промышленности контроль содержания воды в нефтегазоконденсатных продуктах необходим при их транспортировке, на различных стадиях технологического процесса переработки, а также при сертификации готовой продукции. Превышение допустимого содержания воды в этих продуктах приводит к существенному росту транспортных затрат не только за счет увеличения количества перекачиваемой смеси, но и за счет увеличения вязкости. Известны данные, свидетельствующие о том, что каждый дополнительный процент воды в нефти приводит к удорожанию транспортировки ее по трубам на 3-5%. Водный компонент,

содержащийся в нефтепродуктах разрушающе действует на трубопроводы и технологическое оборудование перерабатывающих заводов, способствует снижению товарного качества продукции.

С другой стороны, развитие промышленности нефти и газа характеризуется систематическим ростом доли тяжелых, высоковязких компонентов в общем объеме добычи. Эта тенденция приводит к обострению проблем промысловой подготовки газонефтяной смеси, т.к. высоковязкие нефти образуют очень устойчивые водонефтяные эмульсии. К повышению устойчивости газонефтяных эмульсий приводят также, широко используемые в настоящее время методы воздействия на пласты для увеличения полезной отдачи.

Наряду с изучением и разработкой новых деэмульгаторов, конструкций сепараторов для разделения фаз продукции скважин и других методов все более важное значение приобретает необходимость достаточно точного и оперативного контроля водосодержания в газонефтяной жидкости. Анализ результатов многочисленных попыток решить эту проблему в течение последних десятилетий показывает, что процесс поиска все еще далек до своего завершения. Таким образом, актуальность задачи точного и оперативного контроля содержания воды в нефтепродуктах и на сегодняшний день очевидна.

В настоящей работе предпринята попытка обоснования необходимости использования современных физических методов микроволновой электроники для разработки новых датчиков определения диэлектрических характеристик биологических сред, а также влажности в нефтяных и газоконденсатных продуктах с целью повышения чувствительности и технологичности измерительных методик.

Поглощение микроволнового излучения в водных растворах связано с механизмом ориентационной поляризации молекул. Электрическое поле вызывает поворот молекул воды таким образом, чтобы их дипольные моменты ориентировались по направлению этого поля. Этому препятствует тепловое

движение и взаимодействие соседних молекул. В результате появляется сдвиг фазы поляризации среды относительно поля, что и определяет диэлектрические потери [1]. В микроволновом диапазоне диэлектрические характеристики воды (g -дисперсия) удовлетворительно описывают уравнения Дебая [2].

Экспериментально установленные значения коэффициента поглощения электромагнитного излучения для воды в области ММ длин волн составляют 20-30 дБ/мм.

Диэлектрические свойства растворов солей физиологических концентраций в КВЧ диапазоне длин волн тождественны свойствам воды с точностью до небольшой поправки на величину ионной проводимости. Только при концентрации растворенного вещества выше 0,5 М наблюдается изменение коэффициента поглощения раствора по сравнению с чистой водой. На измерении этой разницы основано использование КВЧ спектроскопии для исследования гидратации различных веществ, а также межмолекулярных взаимодействий [3].

В таких исследованиях обычно используются устройства, основанные на принципе традиционных резонансных методов, которые состоят в сравнении резонансной частоты и добротности резонатора, измеренных сначала без исследуемого образца, а затем с образцом, помещенным в полость резонатора [4]. Основным ограничением, которым приходится руководствоваться при выборе конструкции и размеров резонатора, а также способа введения диэлектрического образца в резонатор, является условие квазистационарности. При нарушении условий квазистационарности размеры системы могут оказаться сравнимыми с длиной волны электромагнитного излучения и учет "полезного" сигнала на фоне "паразитных" параметров может оказаться невозможным.

Для решения поставленной задачи обычно пользуются методом малых возмущений [5], который дает возможность установить связь между мощностью, поглощаемой внутри полости резонатора, и энергией, поступающей в эту полость в единицу времени.

Волноводные кюветы в виде диэлектрической трубки, заполненной жидкостью и помещенной в центре прямоугольного волновода перпендикулярно его широким стенкам, довольно часто использовались при химических анализах [6-7], а также в биофизических исследованиях [8-9]. Такая система проста в изготовлении, удобна в эксплуатации и обеспечивает эффективное взаимодействие объекта с микроволновым излучением, так как трубка с жидкостью располагается в области максимального электрического поля низшего типа волны H_{01} в волноводе.

В отличие от рассмотренных выше и широко применяемых в измерительной технике полых резонаторов с поглощающим образцом, для которых измерения основаны на эффекте малого возмущения поля в резонаторе образцом, в данном случае исходная измерительная система с пустым капилляром не обладает резонансными свойствами, а резонанс возникает только в присутствии исследуемого образца. Эта особенность рассматриваемого волноводного резонатора и определяет высокую чувствительность параметров регистрируемого резонанса к диэлектрическим свойствам образца.

Предложенная конструкция резонансной измерительной камеры [10] отличалась возможностью перестройки и подбора оптимальной связи резонатора с волноводным трактом. Широкие стенки волновода раздвигают два цилиндрических поршня, через осевые отверстия которых проходит капиллярная трубка, изготовленная из радиопрозрачного диэлектрика. Поршни регулируются по высоте в резонаторной камере с помощью винтового механизма перемещения.

Настройка резонанса на максимальную добротность для измеряемой жидкости осуществляется последовательно верхним и нижним поршнем, которые отличаются по диаметру. Чувствительность настроенного таким образом резонатора к изменению диэлектрических параметров жидкости достаточно высока, что позволяет его использовать в простых микроволновых схемах регистрации прошедшего сигнала.

Таким образом, за основу мы взяли опробованную в лабораторных условиях идею создания волноводно-диэлектрического резонатора [10], с очень высокой чувствительностью к изменению диэлектрических свойств анализируемого материала, как с большими, так и с малыми потерями.

В работе исследовались водные растворы гомологического ряда алифатических спиртов, а именно, метанола и этанола в диапазоне небольших концентраций их соединений с водой, а также водных смесей диэтиленгликоля. Для приготовления растворов использовали бидистиллированную воду. Спирты, очищенные многократной перегонкой, высушивали над окисью кальция и далее молекулярными ситами 4А. Для приготовления растворов с заданным содержанием влаги использовались сосуды из гидрофобного материала (полиэтилен), имеющие форму конуса, во избежание разбрызгивания смеси при работе механической мешалки. Мешалка была выполнена на базе двигателя постоянного тока ДПР-32, развивающего скорость вращения мешалки до 10000 об/мин. В наших опытах скорость вращения составляла 6500 об/мин в соответствии с методическими указаниями [11]. Микроволновое облучение образцов выполнялось на установках на основе панорамных измерителей Р2-66 (ГКЧ) и Р2-65(ГКЧ) и индикаторного измерителя КСВН и ослабления Я2Р-67.

2. Экспериментальная часть

Дальнейшее ознакомление с техническим исполнением устройства [10] показало необходимость его всесторонней доработки для наших конкретных задач.

Измерение диэлектрических характеристик жидкостей с помощью данного устройства выполняется следующим образом. В радиопрозрачный капилляр, пронизывающий широкую стенку металлического прямоугольного волновода, наливается исследуемая жидкость. Затем с помощью подвижных поршней добиваются максимального значения добротности резонаторной измерительной системы, что регистрируется по величине амплитуды резонансной кривой на экране. Разность амплитуд резонансной кривой при последовательных

измерениях показывает изменение концентрации вещества в бинарной или же многокомпонентной исследуемой жидкости, связанной с изменением величины диэлектрической проницаемости. Более высокая чувствительность измерений наблюдается при измерениях уровня сигнала на склоне резонансной кривой. В этом случае оценивается смещение пика резонансной кривой по шкале частот, что повышает чувствительность измеряемого параметра жидкости, связанного также с изменением величины диэлектрической проницаемости (рис. 1).

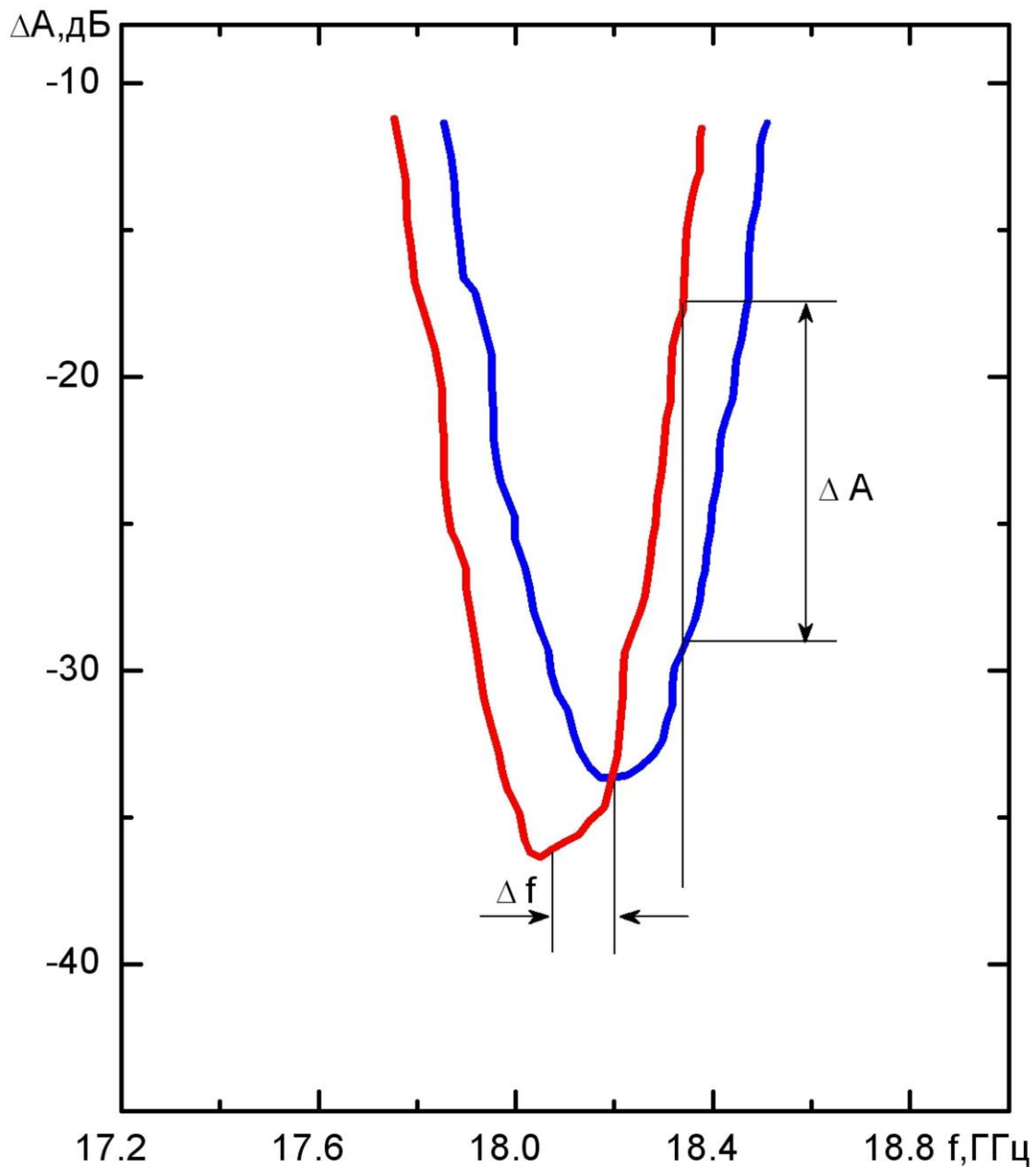
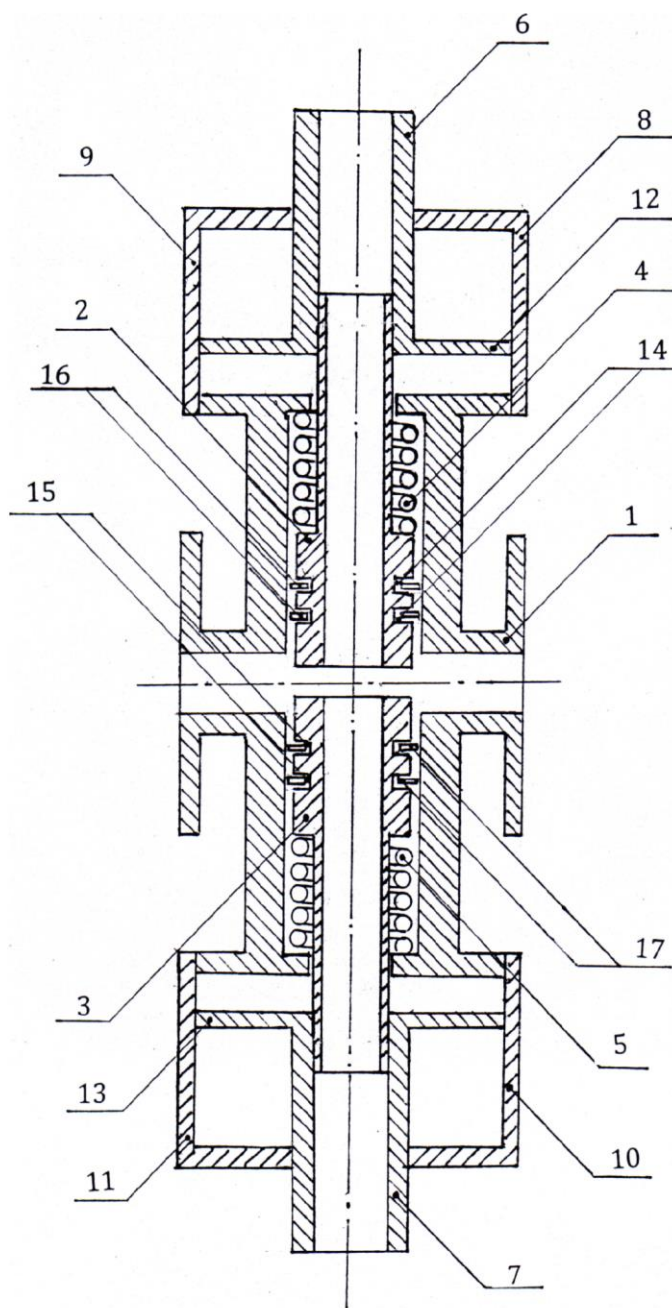


Рис. 1. Иллюстрация реализации метода измерения поглощения микроволнового излучения в резонансной волноводно-диэлектрической камере на фиксированной частоте при разбавлении этанола водой (пояснения в тексте)



1 – волноводная камера; 2, 3 – дроссельные поршни; 4, 5 - пружины для фиксации положения поршней; 6, 7 – дифференциальные винты для плавного регулирования положения поршней в резонаторном волноводе; 8, 9, 10, 11 – стойки с нанесенными на них шкалами отсчета перемещения поршней внутри резонатора, 12, 13 – зубчатые колеса, 14, 15 – дроссельные канавки, 16, 17 – фторопластовые шайбы

Рис. 2. Схема волноводной резонансной перестраиваемой камеры

Перемещение поршней перпендикулярно плоскости широкой стенки волновода осуществляется с помощью регулировочных винтов. Несмотря на высокую чувствительность устройства, его работа отличалась крайней нестабильностью, связанной с механической неустойчивостью элементов конструкции, что приводило к нестабильности результатов измерения амплитуды резонансной кривой отраженного микроволнового сигнала. Доработка измерительного устройства коснулась конструкции дроссельных поршней, и их привода, введения пружин для фиксации положения поршней, а также предусматривалась возможность калибровки положения дроссельных поршней в резонаторе в соответствии с данными нашего патента на изобретение [12].

Экспериментальная проверка новой конструкции показала более стабильную работу устройства, устойчивость работы механического привода поршней и удобство его эксплуатации.

На первом этапе нашей работы мы проводили измерения на водно-спиртовых растворах различных концентраций (рис. 3, 4).

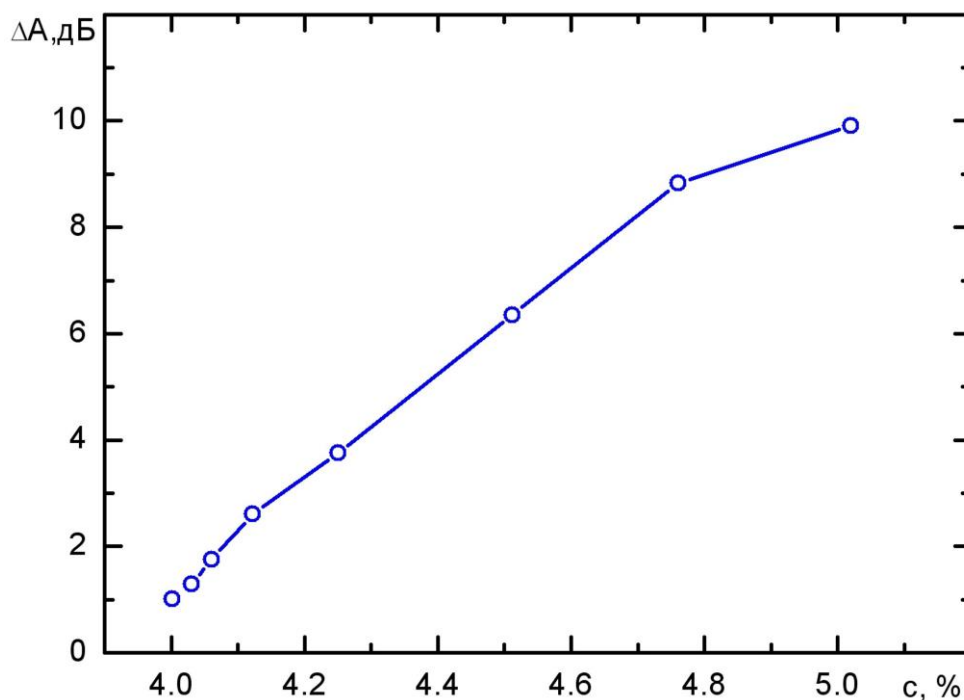


Рис. 3. Пример зависимости изменения поглощения микроволнового излучения в резонансной волноводной диэлектрической камере на фиксированной частоте 21,7 ГГц в зависимости от концентрации воды в этаноле.

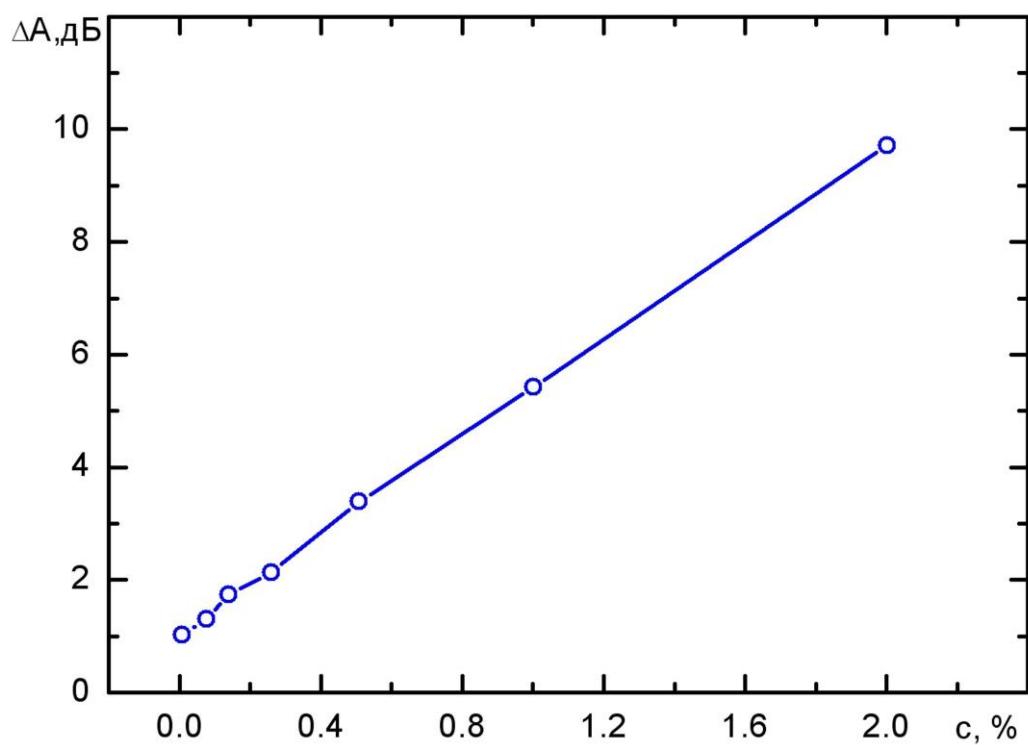


Рис. 4. Пример изменения поглощения микроволнового излучения в резонансной волноводной диэлектрической камере на фиксированной частоте 21,7 ГГц в зависимости от концентрации воды в метаноле.

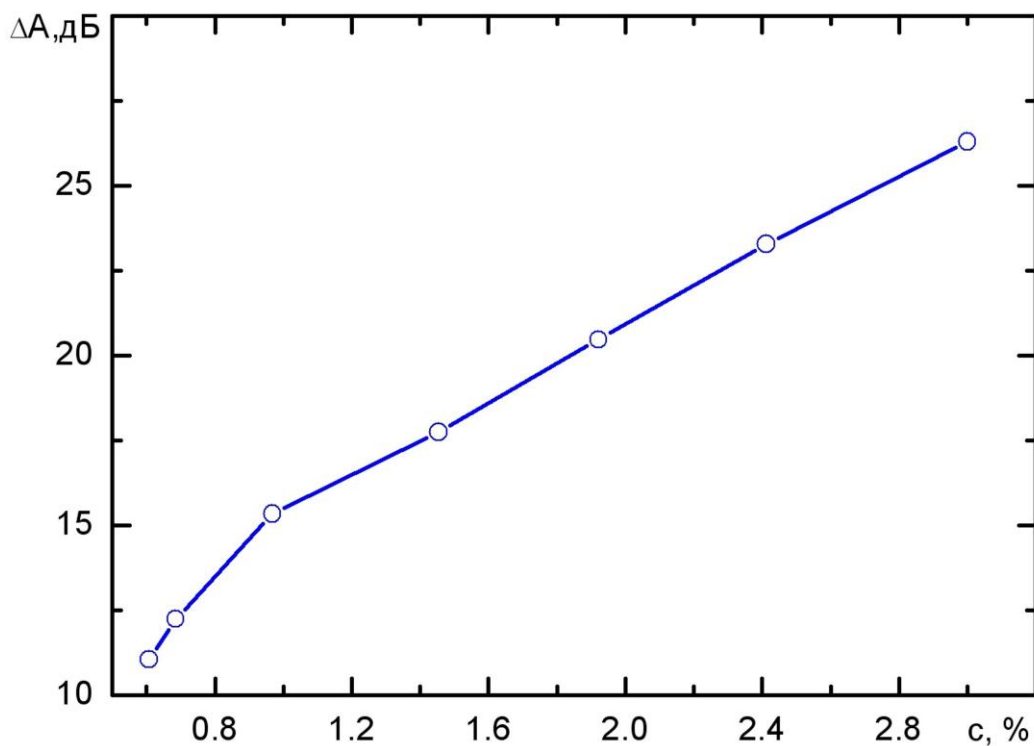


Рис. 5. Пример изменения поглощения микроволнового излучения в резонансной волноводной диэлектрической камере на фиксированной частоте 21,7 ГГц в зависимости от концентрации воды в диэтиленгликоле.

При этом мы учитывали данные о разрушающем действии этанола на кластерную структуру воды, в результате чего образуются водно-спиртовые ассоциаты. Такая модель часто используется для изучения механизма связывания воды [13]. В работе предлагаются экспериментальные результаты измерения поглощения водных растворах диэтиленгликоля (рис. 5.).

В процессе нашей экспериментальной работы нам пришлось столкнуться с неожиданным обстоятельством. Оно заключалось в том, что даже при минимальном уровне мощности генератора СВЧ сигнала 0,1 мВт, обеспечивающего устойчивую работу устройства, мы наблюдали существенное изменение амплитуды резонанса, в зависимости от продолжительности облучения, свидетельствующее о микроволновом нагреве исследуемого экспериментального образца водного раствора.

Изменение амплитуды резонанса при микроволновом облучении образца в течение нескольких минут достигало в некоторых случаях 9 дБ, что свидетельствовало о недопустимой погрешности измерений.

Такая ситуация указывает на необходимость надежного термостатирования измерительной резонаторной кюветы в процессе измерений. Обеспечить условия термостатирования в данных условиях довольно сложно, из-за того, что СВЧ облучаемая часть диэлектрической трубки, в которой находится исследуемый раствор, расположена внутри полого волновода. В случае «проточной» измерительной кюветы, такого нагрева не наблюдается, так как движущаяся жидкость в диэлектрической трубке не успевает нагреться в зоне СВЧ облучения.

Однако, для дорогостоящих биологических препаратов такой «проточный» режим работы измерительной ячейки неприемлем из-за непомерно высоких материальных затрат на проведение эксперимента.

Удачное решение данной проблемы мы подчерпнули из опыта специалистов нефтяной компании «British Petroleum Co LTD», которые предложили определять диэлектрические характеристики углеводородных смесей с водой следующим способом [14].

Учитывая высокий уровень поглощения водой СВЧ излучения, авторы данной работы предлагают в анализируемой водной многокомпонентной смеси измерять повышение температуры контролируемого объекта при его СВЧ облучении, которое оказывается пропорциональным концентрации воды в объекте (например, в сырой нефти).

Температурная зависимость диэлектрических свойств воды и водных смесей хорошо изучена в диапазоне от низких частот до КВЧ [15].

Следует отметить недостаток метода, связанный с необходимостью экранировки термопары при СВЧ облучении, а также влияние самих термопар на температуру объекта в капиллярной трубке, что не может не сказаться на точности измерений.

Мы же решили заменить в данном способе сложную процедуру измерения температуры анализируемого образца на регистрацию изменения его коэффициента поглощения СВЧ излучения при нагревании за фиксированный промежуток времени [16].

Предложенный таким образом новый способ измерения диэлектрических характеристик водных растворов, хотя и несколько уступает по чувствительности прежнему способу измерений с помощью волноводной резонаторной камеры, но зато свободен от необходимости термостатировать измерительную ячейку, что не всегда представляется возможным. По сравнению же со способом, предложенным «British Petroleum Co LTD», наш подход отличается простотой измерительной установки, процедуры измерений и отсутствием влияния датчиков измерителя температуры на контролируемый объект. В связи с тем, что расчетные количественные соотношения между параметрами резонанса и диэлектрическими параметрами образца установлены с большим приближением, то для определения последних удобно пользоваться методом сравнения, калибруя измерительную систему по эталонным растворам.

Как видно из рис. 6, изменение концентрации воды в смеси на 1% приводит, по нашим предварительным данным, к изменению поглощения СВЧ

сигнала приблизительно на 2 дБ. Это позволяет даже при довольно невысокой стабильности амплитудных и частотных характеристик, используемых нами серийных панорамных измерительных установок, измерять концентрацию воды с необходимой точностью. Следует отметить, что данная методика была нами опробована для сравнительно небольших изменений содержания воды в углеводородных смесях, около 1-7%, так как в этом случае наблюдается близкая к линейной зависимость изменения амплитуды СВЧ сигнала от концентрации раствора.

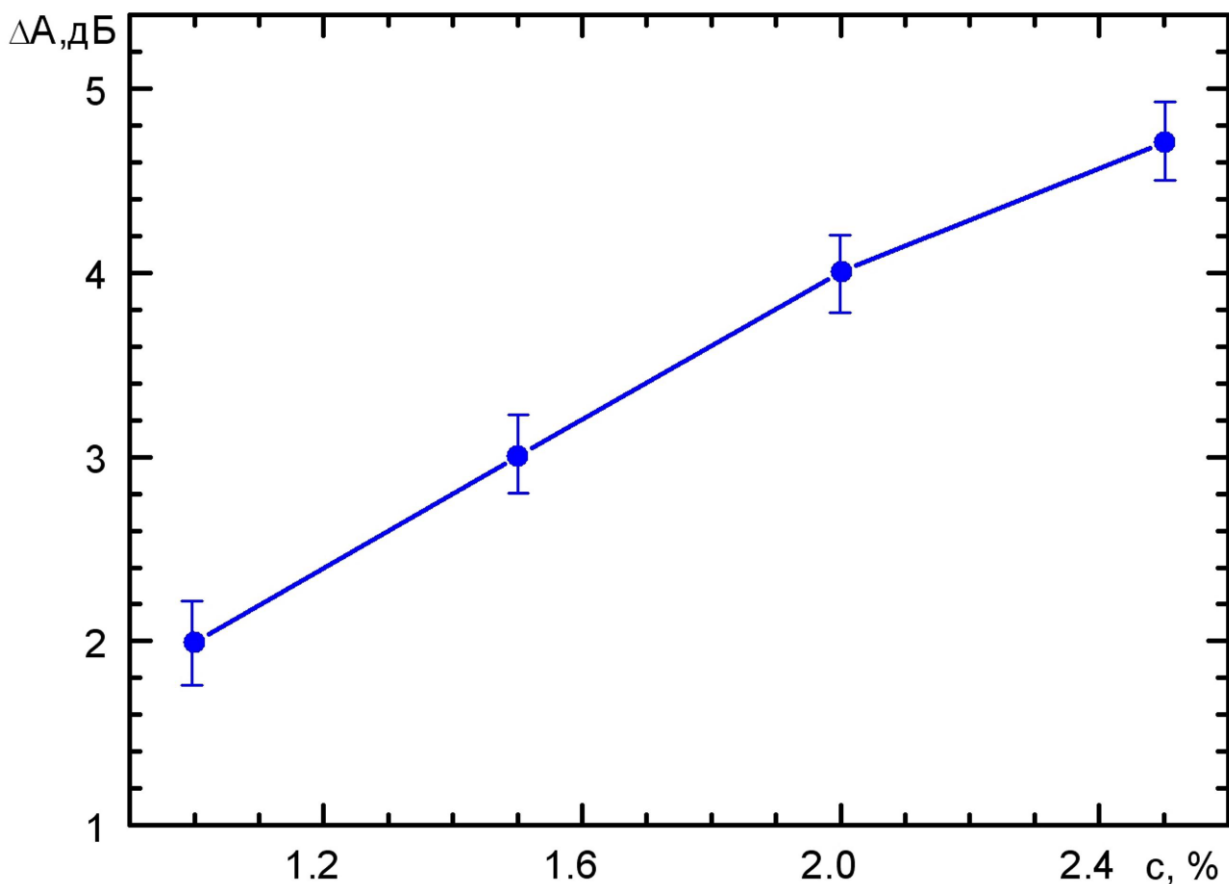
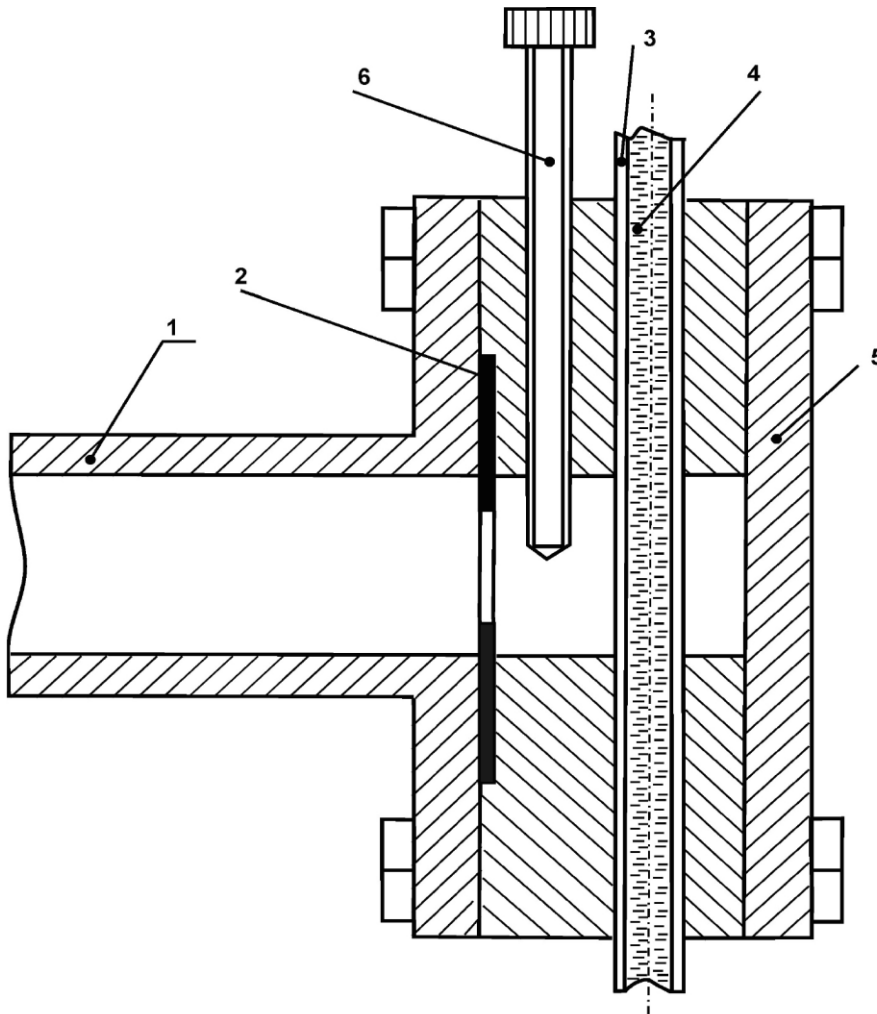


Рис. 6. Зависимость изменения поглощения микроволнового излучения на частоте 21,7 ГГц от концентрации воды в диэтиленгликоле при нагревании образца микроволновым излучением в течение 2-х минут.

Дальнейшее усовершенствование конструкции волноводно-диэлектрического резонатора осуществлялось с целью уменьшения искажения формы резонансной кривой отраженного СВЧ сигнала за счет улучшения контакта контролируемой жидкости, помещенной в диэлектрический капилляр с волноводным измерительным устройством, что должно приводить к

повышению точности и чувствительности измерений.



1 - волновод СВЧ тракта; 2 - резонансная (индуктивно-емкостная) диафрагма; 3 – диэлектрическая трубка с измеряемой жидкостью - 4; 5 - коротко замыкающая пластина; 6 – емкостный штырь

Рис. 7. Конструкция перестраиваемой волноводной диэлектрической камеры

Достигается это тем, что волноводное устройство [17] выполняется разъемным (рис. 7). Прилегающая к фланцу волноводного тракта вставка, содержит резьбовое гнездо для емкостного штыря, который представляет собой цилиндрический проводник, установленный по направлению силовых линий напряженности электрического поля E и соединенный одним концом с широкой стенкой волновода. При некоторой длине штыря, близкой к $\lambda_0/4$, проводимость последовательного контура обращается в бесконечность и волновод закорачивается. Между вставкой и фланцем волновода имеется

неглубокая канавка, вдоль которой может перемещаться полоска тонкого металла в виде резонансной (индуктивно-емкостной) диафрагмы. Размеры и расположение диафрагмы выбираются таким образом, чтобы в волноводном устройстве получить взаимное уничтожение волн, отраженных от конца волновода и от диафрагмы. Волноводная вставка содержит сквозное отверстие для электрической трубки, в которую заливается измеряемая жидкость. Гладкая пластина закрывает сквозное отверстие волновода и является короткозамыкателем тракта. С помощью перемещения тонкой диафрагмы, а также емкостного штыря добиваются максимального значения добротности резонаторной измерительной системы, что регистрируется по величине амплитуды резонансной кривой на экране. Разность амплитуд резонансной кривой при последовательных измерениях показывает изменение концентрации вещества в исследуемой жидкости, связанной с изменением величины электрической проницаемости. Таким образом, предложены регулировочные элементы, совместное действие которых обеспечивает максимальную добротность резонатора для каждой концентрации вещества в исследуемой жидкости и обеспечивающие стабильность результатов измерений электрических параметров контролируемой жидкости [17].

Измерение электрических характеристик жидкостей с помощью данного устройства выполняется следующим образом. В электрический капилляр (3), пронизывающий широкую стенку металлического прямоугольного волновода (1), наливается исследуемая жидкость (4). Затем с помощью настроечных элементов - резонансной диафрагмы (2) и емкостного штыря (6) добиваются максимального значения добротности резонаторной измерительной системы, что регистрируется по величине амплитуды резонансной кривой на экране. Разность амплитуд резонансной кривой при последовательных измерениях показывает изменение концентрации вещества в исследуемой жидкости, связанной с изменением величины электрической проницаемости.

Таким образом, предлагаемое техническое решение позволяет использовать регулировочные элементы, совместное действие которых

обеспечивает максимальную добротность резонатора для каждой концентрации вещества в исследуемой жидкости и обеспечивает повышение чувствительности результатов измерений диэлектрических параметров контролируемой жидкости. Кроме того, упрощается конструкция устройства за счет исключения настроечных поршней с дифференциальными винтами, фторопластовыми шайбами, зубчатыми колесами и спиральными пружинами, уменьшаются габариты устройства и его вес в несколько раз и, следовательно, должна снижаться себестоимость измерительного узла.

3. Заключение

В процессе экспериментальной работы проведена конструктивная доработка резонансной измерительной камеры, которая позволяет обеспечить максимальную добротность резонатора для каждой концентрации вещества в исследуемой жидкости и способствует повышению чувствительности измерений диэлектрических параметров контролируемой жидкости. Кроме того, (в случае без поршневого устройства) упрощается конструкция узла за счет исключения настроечных поршней с дифференциальными винтами, фторопластовыми шайбами, зубчатыми колесами и спиральными пружинами, уменьшаются габариты устройства и его вес в несколько раз и, следовательно, должна снижаться себестоимость измерительного устройства.

Предложенная методика определения диэлектрических характеристик водных растворов и суспензий, основанная на температурной зависимости коэффициента поглощения водных растворов с помощью одной из модификаций волноводно-диэлектрического резонансного метода, позволяет расширить возможности данного метода для некоторых его применений. В процессе выполнения данной работы авторами получено за последние два года три патента на изобретения [12; 16; 17]. Материалы представленной работы были представлены на I Всероссийской конференции с международным участием “Физика и экология электромагнитных излучений” в 2017 г. [18] и на 7-ом Международном Конгрессе «Слабые и сверхслабые поля и излучения в биологии и медицине» [19]. Результаты данной работы могут быть

использованы в нефтегазовой промышленности, фармацевтической и пищевой отраслях производства, в медико-биологических исследованиях.

Литература

1. Pathig R. "Dielectric and electronic properties of biological materials". Chichester: John Wiley & Sons. 1979. 279 p.
2. Аксенов С.И. Вода и ее роль в регуляции биологических процессов. М. Наука. 1990. 117 с.
3. Девятков Н.Д. Взаимодействие миллиметрового излучения с биологически активными соединениями и полярными жидкостями. Радиотехника и электроника. 1978. Т. 23, № 9. С. 1882-1890.
4. Брандт А.А. Исследования диэлектриков на сверхвысоких частотах. М. Физматгиз. 1963. 403 с.
5. Гвоздовер С.Д. Теория электронных приборов сверхвысоких частот. 1956. М. Гостехиздат. 527 с.
6. Храпко А.М., Гайдук В.И., Бакаушина Г.Ф. и др. Волноводные и квазиоптические устройства для измерения поглощения СВЧ-излучения в органических жидкостях. Электронная техника. Электроника СВЧ. 1976. Вып. 10. С. 69-78.
7. Мухтаров Р.Г. Волноводные измерительные ячейки для СВЧ-влажномеров жидких материалов. Электронная техника. Электроника СВЧ. 1991. Вып. 7 (441). С. 45-48.
8. Бецкий О.В., Казаринов К.Д., Путвинский А.В. и др. А.с. 1101750 СССР, G01P21/04. Способ измерения мощности СВЧ-излучения. Бюллетень: "Открытия. Изобретения". 1984. N25. С. 120.
9. Ольшанский Д.И., Любимов Ю.А., Хургин Ю.И. Тепловые эффекты при измерении поглощения водой СВЧ-излучения. //Миллиметровые волны в медицине и биологии: Сб. докладов: -М.: ИРЭ РАН, 1995. – С. 217-218.

10. Беляков Е.В. Перестраиваемый СВЧ-резонатор для измерения поглощающих жидкостей. Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1989. Вып. 10 (424). С. 59-61.
11. Методические указания № 332 пр приготовлению и аттестации образцовых искусственных проб (эмульсий) для проверки и градуировки влагомеров для нефти. “Издательство стандартов”. М. 1974.
12. Казаринов К.Д., Полников И.Г. Патент на изобретение № 2614047. Перестраиваемая волноводно-диэлектрическая камера для контроля жидкостей. Дата гос. регистрации в Гос. Реестре изобретений РФ 22 марта 2017. Бюл. № 9.
13. Абросимов В.К., Крестов А.Г., Альпер Г.А. и др. Достижения и проблемы теории сольватации: структурно-термодинамические аспекты. М.: Наука, 1998. 247 с.
14. ВР (British Petroleum). Measurement of water content of liquids using microwave. Claim. 24. 03. 1980, GB 7910431. G1N Int Cl (G01N22/04).
15. Chamberlain J.E. et al. Submillimetre absorption and dispersion of liquid water. Nature. 1966. V. 210, N5038. P. 1003.
16. Казаринов К.Д., Полников И.Г. Патент на изобретение № 2631340. Способ измерения концентрации водных растворов. Дата гос. регистрации в Гос. Реестре изобретений РФ 21.09.2017. Бюл. № 27.
17. Казаринов К.Д., Тихонова Е.А., Солосин В.С. Патент на изобретение № 2655028. “Волноводное устройство для измерения параметров жидкостей”. Дата гос. регистрации в Гос. Реестре изобретений РФ 23 мая 2018. Бюл. № 15.
18. Казаринов К.Д., Тихонова Е.А., Солосин В.С. Использование ЭМИ микроволнового диапазона для измерения параметров жидкостей. // I Всероссийская конференция с международным участием “Физика и экология электромагнитных излучений”, п. Агой, Краснодарский край. 25 – 30 сентября 2017 г. Научные труды конференции. Т. 1. С. 29. URL: conf.biophys.ru/archive/agoi-2017.pdf#page=29
19. Казаринов К.Д., Городецкая М.В., Полников И.Г. Волноводно диэлектрический метод для исследований сильнопоглощающих жидкостей в

микроволновом диапазоне. // Научные труды VII Международного конгресса «Слабые и сверхслабые поля и излучения в биологии и медицине», СПб, 2015, С.53. URL: www.biophys.ru/archive/congress2015.pdf#page=53

Для цитирования:

К. Д. Казаринов, И. Г. Полников. СВЧ измерители влагосодержания углеводородных смесей (разработка методов и конструкций). Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. № 8. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/aug18/3/text.pdf>
DOI 10.30898/1684-1719.2018.8.3