

---

## Оценка качества питьевой воды на основе микроволновых систем

*О.В. Никишина*

*Казанский национальный исследовательский технический университет им.  
А.Н. Туполева-КАИ, Казань*

**Аннотация:** В данной статье описываются методы измерения характеристик питьевой воды с помощью микроволновых технологий, приведена их сравнительная характеристика, достоинства и недостатки. Показаны преимущества исследования резонансными методами, показаны перспективы их применения для дальнейшего исследования.

**Ключевые слова:** микроволновые технологии, резонансные и нерезонансные методы, очистка воды, питьевые пробы, диэлектрическая проницаемость.

### Введение

Постоянное возрастание антропогенной нагрузки на окружающую среду, в виде увеличивающихся объёмов и номенклатуры загрязняющих веществ, обуславливает повышение требований, предъявляемых к методам и средствам контроля качества природной среды. Использование природных ресурсов распространяется на большую сферу деятельности человека. Пренебрежение вопросами развития централизованного хозяйственно-питьевого водоснабжения приводит к росту инфекционных и неинфекционных заболеваний [1]. В настоящее время системы централизованного водоснабжения далеко не везде подают доброкачественную питьевую воду. Источники питьевой воды должны контролироваться для установления необходимого уровня очистки воды и обнаружения любых загрязнителей, которые невозможно удалить во время обработки [2]. Таким образом, выбор компонентов, которые необходимо включить в программу контроля, зависит от характера источников воды, технологий водозабора и технологий последующей обработки воды. Соответственно, изучение информационных технологий предотвращения поражения людей по показателям мониторинга качества питьевой воды и обеспечивающим их средствам инструментального контроля на основе массива микроволновых датчиков для проверки качества воды является актуальной задачей [3].

## 1. Краткий обзор методов измерения исследуемых характеристик питьевой воды микроволновыми способами

Микроволновым излучением принято называть неионизирующее электромагнитное излучение с частотой от 300 МГц до 300 ГГц. Микроволновое излучение вызывает движение молекул за счет перемещения ионов и вращения диполей, но не приводит к изменению в структуре молекул. Взаимодействие микроволнового излучения с веществом может сопровождаться его отражением, поглощением и прохождением через объем образца без ослабления. По характеру взаимодействия с микроволновым излучением материалы можно разделить на проводники и диэлектрики [4].

Диэлектрики являются плохими электрическими проводниками (неидеальными изоляторами), большинство материалов, включая живые организмы и дистиллированная вода, могут в некоторой степени проводить электрический ток, но все же классифицируются, как диэлектрики. Электрические характеристики воды зависят от её диэлектрических свойств. Эти свойства предоставляют ценную информацию, которая помогает исследователям и инженерам использовать данные в своих проектах или с целью характеристики материала, или для контроля качества воды. Для диэлектрических свойств основным параметром является комплексная диэлектрическая проницаемость ( $\epsilon^*$ ), которая описывает поведение материала, когда он подвергается воздействию электромагнитного поля, она является комплексной величиной:

$$\epsilon = \epsilon' - \epsilon'' j, (1)$$

где  $\epsilon'$  – действительная часть, связанная с поляризацией диэлектрика;  $\epsilon''$  – мнимая часть, связанная с конечной проводимостью диэлектрика.

Для диэлектрических измерений ни один метод не может охарактеризовать все материалы во всем диапазоне частот. Измерение с точностью для обоих типов материала (с потерями и с низкими потерями) является сложной задачей, поэтому для каждой полосы и их потерь требуется

свой метод. Всегда существует неопределенность в измерениях диэлектрической проницаемости при характеристике материалов. При выборе соответствующего метода измерения диэлектрических свойств воды, следует учитывать частоту тестирования и тип тестируемого материала [5], выбор измерительного оборудования, конструкцию. В настоящее время существует множество методов (рис. 1) по измерению диэлектрических свойств материалов, однако не все они подходят для решения данной конкретной проблемы. Согласно [6], все эти методы можно разделить на несколько групп: «резонансные, коаксиальные и волноводные, широкополосные, методы, основанные на использовании волн в свободном пространстве, а также неразрушающие методы. Выбор метода измерения зависит от величины диэлектрической проницаемости  $\epsilon'$ , диэлектрических потерь  $\epsilon''$ , диапазона температур и частот, в котором производятся измерения» [5].



Рис. 1. - Классификация методов измерения диэлектрической проницаемости

**1.1. Метод коаксиального зонда:** это один из самых удобных и часто используемых методов измерения материалов с потерями на высоких частотах (СВЧ), обычно он известен, как коаксиальный зонд или коаксиальный линейный зонд или метод коаксиальной линии с открытым концом.

В коаксиальной линии используется металлический зонд, который улавливает отраженный сигнал (фазу и амплитуду). Для плоских поверхностей

зонд касается образца, а для жидкостей он погружается в образец.

Это довольно простой метод, позволяющий проводить диэлектрические измерения в широком диапазоне частот от 0,5 до 110 ГГц. Но этот метод показывает некоторые отклонение материалов с низкой диэлектрической проницаемостью измерения в диапазоне частот от 0,5 ГГц до 110 ГГц [7].

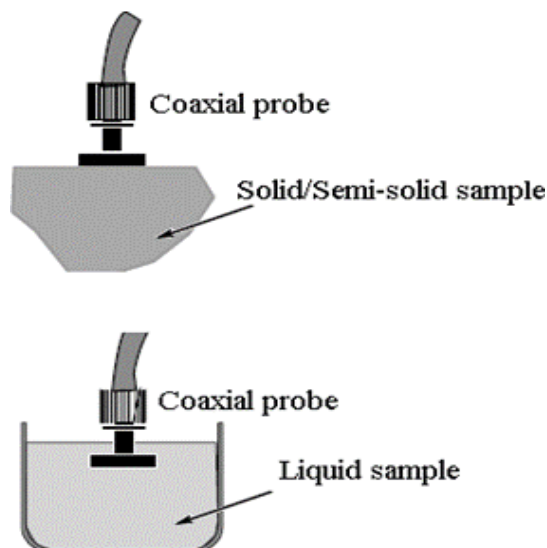


Рис. 2. - Метод коаксиального зонда

**1.2. Метод линии передачи (волновод):** это еще один распространенный метод, при котором образец материала помещается в центр замкнутой линии передачи (как показано на рис. 3). Для измерений отражения и пропускания используются оба коэффициента. Он имеет более высокую точность и большую чувствительность, чем коаксиальная линия, но относительно более узкий частотный диапазон, чем коаксиальная. Подготовка образца относительно сложна, поэтому требует больше времени, поскольку образец должен покрывать всю площадь поперечного сечения линии, поэтому он должен иметь форму плиты или кольцеобразной геометрии [8].

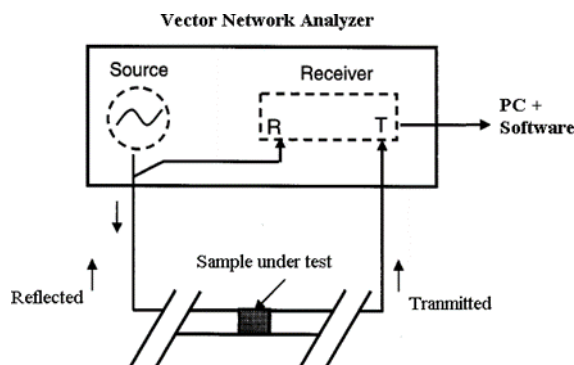


Рисунок. 3. - Метод линии передачи (волновод)

**1.3. Метод свободного пространства:** этот метод является бесконтактным и неразрушающим, обычно используется при более высокой частоте, хотя его можно использовать и при низкой, но он имеет практическое ограничение размера выборки. В методе свободного пространства для измерения диэлектрических характеристик используются большие, плоские и с обеих сторон правильные образцы однородных (однородных без неровностей) твердых материалов.

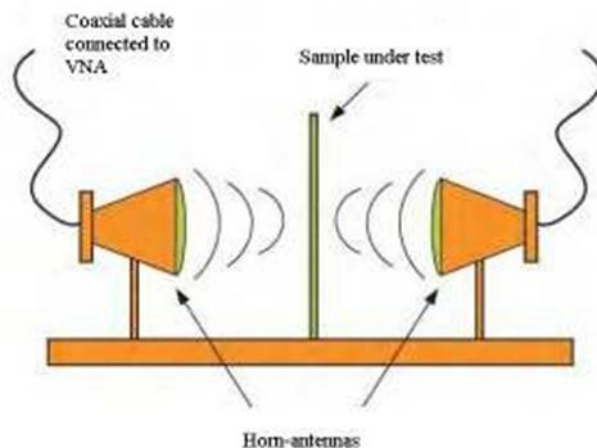


Рисунок. 4. - Метод свободного пространства

Материал помещается между двумя рупорными антеннами для направления энергии на него или через него совместно с векторным анализатором цепей.

Преимуществом использования метода измерения в свободном пространстве является получение коэффициентов отражения и пропускания без физического контакта с образцом, что лучше всего подходит для тонких плоских материалов [9].

**1.4. Метод резонансного резонатора:** этот метод обычно используется для измерения диэлектрической проницаемости материалов из-за однородности его простоты с более высокой точностью и возможностью измерения при высоких температурах, а также для материалов с низкими диэлектрическими потерями и низким коэффициентом потерь, он дает точные результаты. Он разработан либо для (поперечного магнитного), либо для (поперечного электрического) режима распространения. Этот метод основан на том, что сдвиг резонансной частоты резонатора, вызванный введением в него материала с потерями. Образец помещается в центр волновода, круглого или прямоугольного сечения, в результате чего изменяется его центральная резонансная частота и добротность, что дает информацию о вставленном образце для расчета диэлектрической проницаемости. Типичный диапазон измерения для этого метода составляет от 50 МГц до более чем 100 ГГц. По сравнению с другими методами, пробоподготовка проста и быстра, за короткий промежуток времени можно измерить большее количество проб.

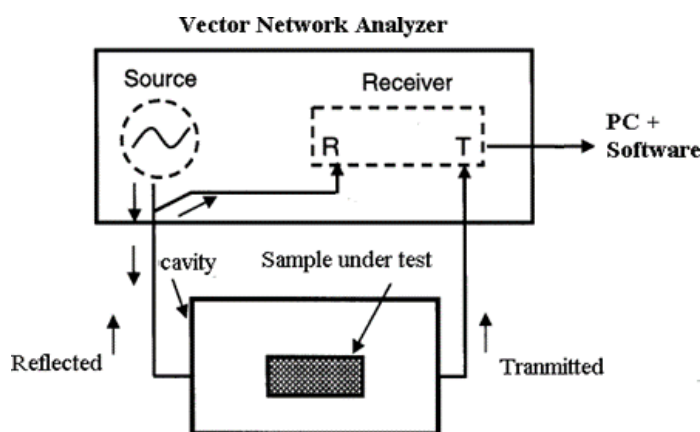


Рисунок. 5. - Метод объемного резонатора

Измерения можно проводить в диапазоне от высоких до низких температур (от 140°C до -20°C) [10].

**1.5. Метод с параллельными пластинами (электродами):** Метод конденсаторов с параллельными пластинами заключается в размещении диэлектрического материала (тонкого листового образца) между двумя электродами для формирования конденсатора. Измерения можно проводить с

помощью LCR-метра или анализатора импеданса и диэлектрической арматуры, см. рис. 6. В этом методе обычно используются низкие частоты ( $<1$  ГГц). Он имеет высокую точность измерения (около  $\pm 1\%$  для  $\epsilon_r'$  и  $5\% \pm 0,005$  для тангенса  $\delta$ ) и требует очень простой подготовки и настройки образца, обычно для этой цели используется диапазон частот от 20 Гц до 1 ГГц. Однако воздушный зазор и его влияние могут вызвать значительную ошибку, если их не учитывать и не калибровать. Также из-за эффекта поляризации электрода ложные измерения приводят к плохим результатам. Его можно уменьшить, используя электроды с большой микроскопической поверхностью или используя более высокие частоты; так как эффект быстро уменьшается с увеличением частоты.

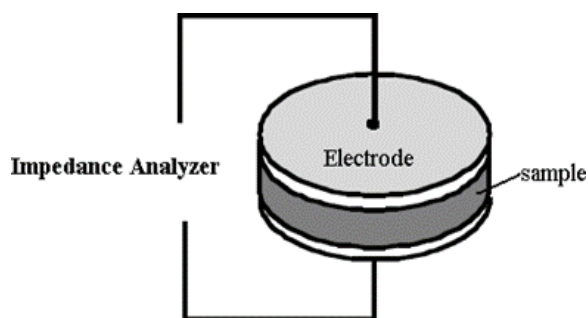


Рисунок. 6. - Метод с параллельными пластинами (электродами)

**1.6. Метод планарной линии передачи:** эти типы линий передачи широко используются в различных радиочастотных и микроволновых компонентах. Микрополосковая линия является наиболее распространенным и простым методом определения характеристик диэлектрических материалов. Он прост в изготовлении, имеет низкую себестоимость, а компактность конструкции делает его более подходящим для промышленного применения. Исследуемый образец можно использовать либо в качестве подложки (в случае твердого тела), либо в качестве суперстрата (как в твердом, так и в жидком состоянии) для измерения диэлектрической проницаемости. Для проведения измерений определяют эффективную диэлектрическую проницаемость в ненагруженном состоянии, после чего образец помещают на сигнальную

полосу (как показано на рис. 7), это изменит эффективную диэлектрическую проницаемость ( $\epsilon_{\text{eff}}$ ) и волновое сопротивление ( $Z_0$ ) МПЛ,

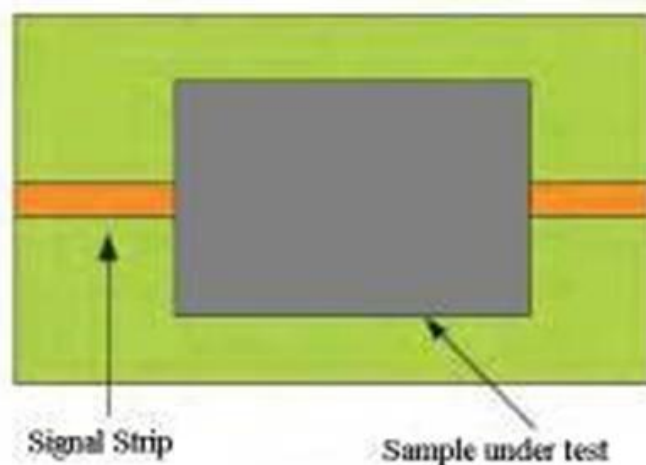


Рисунок. 7. - Планарная линия передачи

который можно использовать для извлечения диэлектрических свойств образца. Этот метод показывает заметный сдвиг резонансной частоты и изменение добротности.

*Сравнительная характеристика данных методов.*

Для метода коаксиального зонда (нерезонансный метод) он может работать в широком диапазоне частот и может использоваться для образцов с большими потерями. Но это требует повторяющихся калибровок, а воздушные зазоры могут вызвать некоторые ошибки. Метод линии передачи (волновод) заключается в использовании измерения электрических и магнитных свойств в высокочастотном диапазоне, его можно использовать для твердых и жидких образцов, но подготовка образца довольно сложна, чем другие. Используя метод свободного пространства, можно использовать широкий диапазон частот при бесконтактном контроле (как в коаксиальном зонде), можно использовать небольшой и плоский образец. Проблема возникает с образцами большого размера, поскольку нижний предел ограничен практическим размером образца, а дифракция от краев образца может вызвать ошибки.

## 2. Резонансные методы



## 2.1. Кольцевой резонансный датчик на основе микрополосковой линии.

Микрополосковый кольцевой резонатор, который можно использовать для обеспечения возможности изменения диэлектрической проницаемости, если на поверхность подложки помещается какой-либо диэлектрический материал; вызывает изменения резонансной частоты.

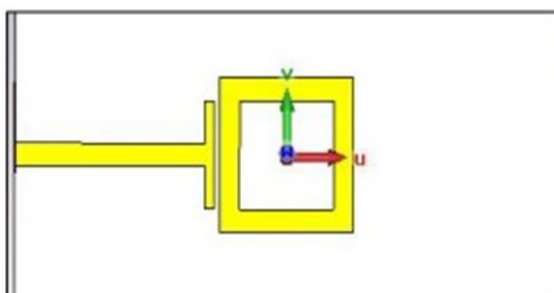


Рис. 8. - Структура резонансного прямоугольного датчика

Датчик построен с использованием подложки Roger 5880 толщиной 0,787 мм и тангенсом потерь 0,009. Прямоугольный резонаторный датчик показан на рис. 8. Для преодоления проблемы низкой производительности в резонаторе из-за больших обратных потерь в конструкцию введен метод усиления.

Исследования датчика проводились на основе метода отражения. Полоса пропускания  $S_{11}$  на уровне 0,707 (-3 дБ) составляет 0,070678 ГГц (Рис. 9.1). Резонансная частота возникает при 3,992 ГГц, добротность составляет 57.

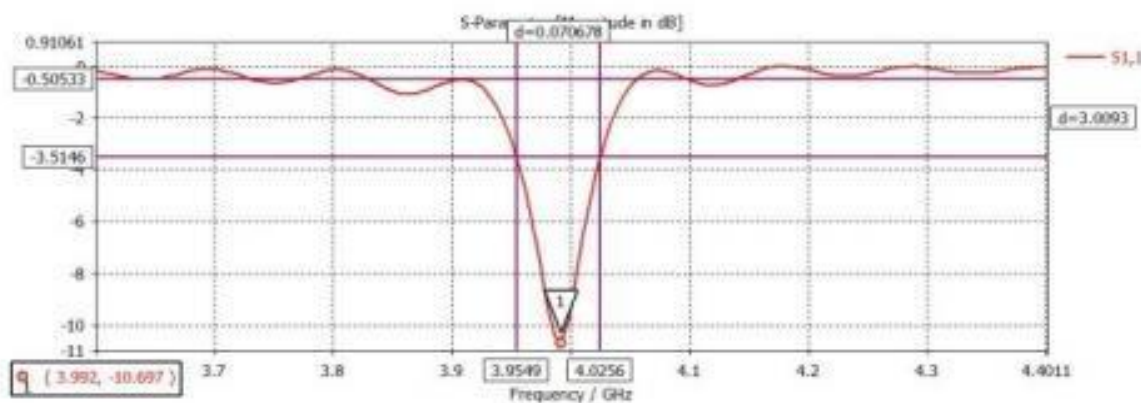


Рис 9.1. - Полоса пропускания датчика

На рис. 9.2. показаны изменения резонансной частоты после того, как на датчик были помещены материалы с различными диэлектрическими свойствами. На графике видно, что чувствительность датчика может быть представлена в зависимости относительного сдвига резонансной частоты с диэлектрической проницаемостью объекта.

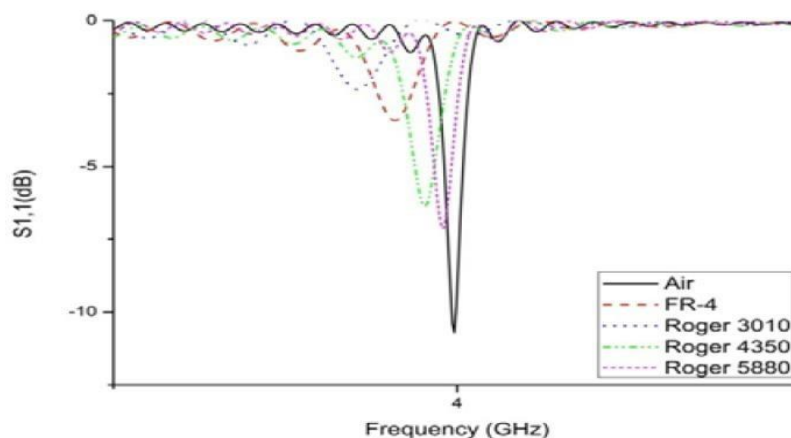


Рис. 9.2. - Сдвиг резонансной частоты при различных значениях диэлектрических свойств материалов

Сделан вывод, что чем выше диэлектрическая проницаемость образцов, тем выше процент сдвига частоты, а чем выше диэлектрическая проницаемость образцов, тем ниже резонансная частота.

Недостатками данного резонансного датчика на основе микрополосковой линии являются: возможность использования его только как лабораторный метод, невозможность полного погружения в жидкий или полутвердый материал [11].

## 2.2. Щелевые резонансные датчики на основе микрополосковой линии

Основу полосковых щелевых излучателей составляет симметричная полосковая линия передачи, в верхнем экране которой прорезана поперечная щель (рис.10).

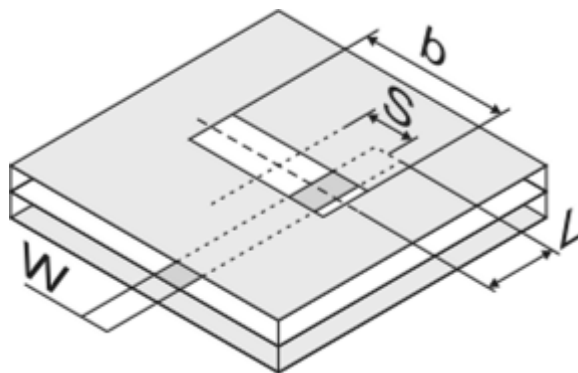


Рис.10. - Полосковый щелевой излучатель

Размер  $W$  в данном случае определяется волновым сопротивлением питающей линии. Расстояние от центра щели до середины полосковой линии  $S$  и длина шлейфа холостого хода  $L$  регулируют связь линии передачи со щелью [12].

Подложка излучателя сплошная и имеет относительную диэлектрическую проницаемость  $\epsilon = 4,5$ . В макете резонатор питается коаксиальной линией через штырь в подложке. Точку питания можно перемещать благодаря отверстиям по трем осям. Если точка находится на линии, параллельной стороне с размером  $B_2 = 80$  мм, то частота резонанса будет определяться этим размером. Размер  $B_1 = 70$  мм будет определять частоту резонанса при расположении точки питания на линии, параллельной стороне с этим размером. При расположении точки питания на диагональной линии возможно возбуждение двух колебаний с ортогональными структурами полей на резонансных частотах, соответствующих размерам сторон резонатора. Передвигая точку питания вдоль осей, можно добиться согласования резонатора с волновым сопротивлением питающей линии (50 Ом). Однако такие методы исследовались строго на одной из частот диапазона, а практически должны работать во всем диапазоне частот, чтобы передать необходимую информацию.

### **2.3. Модифицированный метод микрополоскового кольцевого резонатора**

Предлагаемая модель измерения использует модифицированный метод кольцевого резонатора в однослойной и двухслойной микрополосковых конфигурациях. Этот метод устраняет необходимость металлизации образцов и позволяет определять характеристики диэлектрической проницаемости и диэлектрических потерь в диапазоне частот от 2 до 40 ГГц. Влияние потерь в проводнике и излучения, которые могут привести к значительным ошибкам в вычислении тангенса угла потерь, особенно на очень высоких частотах, сведены к минимуму [13].

На рис. 11 показана конфигурация кольцевого микрополоскового резонатора с двумя портами.

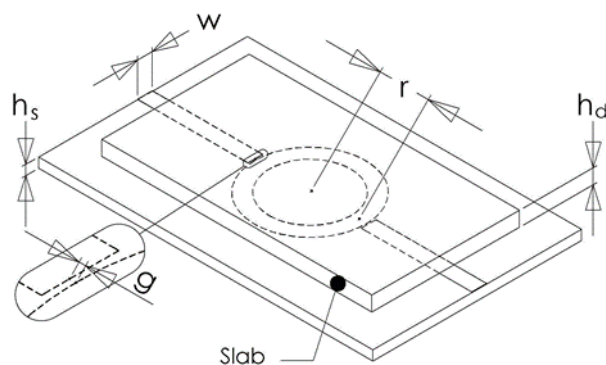


Рис. 11. - Двухпортовая микрополосковая структура кольцевого резонатора с наложенной пластиной.

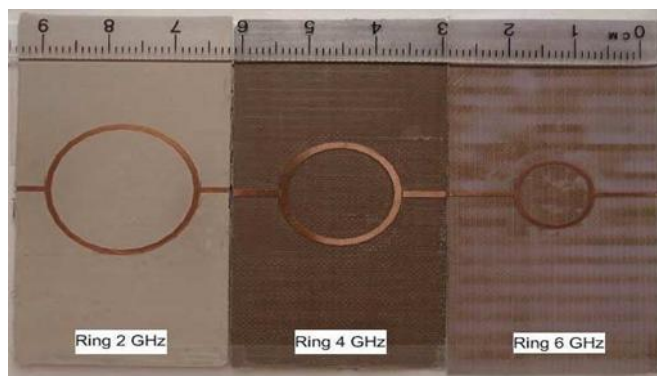
Кольцевой резонатор со средним радиусом  $r$  и шириной  $w$  напечатан на микроволновой подложке толщиной  $h_s$ . Пластинчатый материал толщиной  $h_d$  накладывается на кольцевой резонатор, и различия в добротности и резонансной частоте до и после вставки пластины используются для определения диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь материала.

Схема микрополоскового кольцевого резонатора имеет множественные резонансы, возникающие, когда периметр кольца равен целому числу длин волн направляющей. Однако для этого метода требуются диэлектрические образцы в виде покрытых металлом подложек с микрополосковым кольцевым узором, вытравленным или выточенным на металлическом слое, из-за низкой адгезии металла к некоторым материалам (например, типичным фоторезистам), а также

из-за проблем с измерением материалов в неподложных формах (например, порошков и жидкостей). В данном примере предложен неразрушающий метод измерения тангенса угла диэлектрических потерь, который может быть применен к образцам объемного материала произвольной толщины с использованием комбинации одно- и двухслойных микрополосковых кольцевых резонаторов.

Поскольку параметры кольцевого резонатора, такие как толщина и диэлектрическая проницаемость подложки, ширина линии, диаметр кольца и зазоры связи, могут влиять на точность результатов, микрополосковые кольцевые резонаторы разного диаметра проектировались и изготавливались на разных подложках. Во всех конструкциях отношение ширины линии к радиусу кольца ( $w/r$ ) структуры кольцевого резонатора сохраняется меньше 0,2, чтобы избежать возбуждения возможных мод более высокого порядка. Первые десять резонансов больших колец (исполнения 2 ГГц и 4 ГГц) и первые шесть резонансов малого кольца (исполнения 6 ГГц) находятся в пределах желаемого диапазона частот измерения (до 40 ГГц), имеют четкие и острые пики ( $Q > 100$ ), и подходят для расчетов по определению электрических свойств материалов плит. Пластины накладываются на кольца, и вся схема механически стабилизируется небольшими пластиковыми зажимами, электрически установленными вдали от кольцевого резонатора. На рис. 12 показана экспериментальная установка и схема кольцевого резонатора.

Для измерения вносимых потерь двухпортовых кольцевых резонаторов в диапазоне частот от 1 до 40 ГГц использовался векторный анализатор цепей Agilent 8722ES.



а)



б)

Рис. 12. - (а) Микрополосковые кольцевые резонаторы различной конструкции, изготовленные на разных подложках; (б) экспериментальная установка с наложением прозрачного полиметилметакрилата (ПММА) на микрополосковый кольцевой резонатор 2 ГГц.

Основное преимущество предлагаемой методики заключается в ее простоте для использования с широким спектром подготовленных образцов неразрушающим способом. Изготовив только один кольцевой резонатор, возможно измерить электрические свойства любого количества материалов. Используя несколько кольцевых резонаторов, электрические свойства образцов можно измерять во многих точках в широком диапазоне частот. Это также может быть использовано для повышения достоверности результатов, когда измеренные точки для разных колец совпадают по частоте. Данный метод не зависит от толщины образца и позволяет измерять тестовые пластины любой толщины и размера, если образец полностью покрывает наложенное кольцо.

Нет необходимости металлизировать испытуемые образцы для измерения их электрических свойств. Это особенно важно для конкретных материалов, которые трудно металлизировать, например, из-за низкой адгезии (например, различные полимерные материалы). Предлагаемый метод также может быть использован для измерения материалов в неподложных формах, таких, как порошки и жидкости [14].

### **Выводы**

На основе анализа научно-технических публикаций, затрагивающих вопросы осуществления разработки системы контроля качества питьевой воды с применением различных технологий, выявлено, что отличительной чертой использования возможностей электромагнитных полей СВЧ-диапазона для контроля качества питьевой воды, является наиболее перспективным методом для применения в данной области, за счет экологичности процесса обработки, скорости нагрева больших объемов, и не требует больших финансовых затрат. В настоящее время, с применением микроволновых технологий, активно разрабатываются устройства постоянного мониторинга качества питьевой воды, в частности, планарные резонансные устройства, которые обладают такими преимуществами, как: простота и низкая стоимость производства, компактность, возможность неинвазивных измерений, это путь к появлению нового поколения датчиков воды, гибких для дальнейшей модификации.

В данной работе было предложено использование тройного кольцевого резонансного датчика на основе симметричной полосковой линии. Использование тройного датчика позволяет расширить область рассматриваемых примесей в воде. Данный вид полосковых линий выбран из-за отсутствия прямого контакта подводящей линии с исследуемым объектом для обеспечения локальности измерения. Наличие трех экранирующих поверхностей в кольцевом резонансном датчике позволяет избавиться от указанных ранее недостатков, которыми обладают датчики на основе

микрорезонаторной (несимметричной) линии. Целью работы является проведение анализа существующих методов и способов измерения качества воды, а также разработка кольцевого резонаторного датчика на основе симметричной резонаторной линии.

### Литература

1. Строчан Т. П., Имитационная модель кварцевого биосенсора для экологических исследований. Инженерный вестник Дона. – 2013. – № 3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1755](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1755)
2. Коробкин В.И., Экология и охрана окружающей среды. Изд.2-е, перераб. и доп. - М: Изд-во «Проспект», 2017, 281 с.
3. Муравьева Е.В., Экологические аспекты. Прикладная техносферная рискология – М., 2007 – 355 с.
4. Бахтерев В.В., Первые результаты использования микроволнового излучения для изучения хромитовых руд. Уральский геофизический вестник. – 2013. – № 2(22). – С. 13–17.
5. Касимова А.У., Обзор и анализ современных методов измерения диэлектрической проницаемости горных пород. Проблемы автоматизации и управления. – 2022. – № 1(43). – С. 33-49.
6. Иноземцев М. А., Обзор методов измерения диэлектрической проницаемости горных пород. Электронные средства и системы управления. Материалы докладов Международной научно-практической конференции. – 2020. –№ 1-1. –С. 279–281.
7. Ellison W. J., Moreau J. M., Open Ended Coaxial Probe: Model Limitations. IEEE Trans. Instrumentation & Measurement, Vol. 57, No. 9, Sept. 2008, pp.1-19.
8. Насыбуллин, А. Р. Диэлектрический волновод с периодическими неоднородностями как средство для измерения характеристик диэлектриков.



---

Инженерный вестник Дона., 2018., № 4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5277](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5277)

9. Родионова О. В. Метод измерения комплексной диэлектрической проницаемости почвогрунтов в широкой полосе частот. специальность 01.04.03 "Радиофизика": диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. – Томск, 2016. – 136 с.

10. Guwy A.J., Farley A., Cunnah P., Hawkes F.R., Hawkes D.L., Chase M., Buckland H., An automated instrument for monitoring oxygen demand in polluted waters. *Water Res.* 1999, 33, pp. 3142–3148.

11. Смирнов С.В. Многосенсорная система контроля температуры и влажности для реализации адаптивных процессов СВЧ-обработки органических отходов животноводства. К. с. 2021- 146.

12. Мительман Ю. Е., Абдуллин Р. Р., Сычугов С. Г., Шабунин С. Н., Антенны и устройства (СВЧ): расчет и измерение характеристик. Учебное пособие для вузов. — Москва: Издательство Юрайт, 2022. — 138 с.

13. Ишкаев Т. М., Насыбуллин А. Р., Фархутдино Р. В. в, Самигуллин Р. Р., Применение непланарных микрополосковых СВЧ структур для контроля диэлектрических параметров жидкостей и твердых материалов. *Южно-Сибирский научный вестник.* – 2021. – № 6(40). – С. 56-61.

14. Смирнов, С.В. Применение микроволновых технологий для утилизации отходов животноводства. Прикладная электродинамика, фотоника и живые системы. МНТК молодых ученых, аспирантов и студентов, Казань, 16-18 апреля 2020. – 2020. – С.117-119.

### References

1. Strochan T. P. *Inzhenernyj vestnik Dona.* 2013, № 3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1755](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1755)

2. Korobkin V.I., Jekologija i ohrana okruzhajushhej sredy [Ecology and environmental protection]. Izd.2-e, pererab. i dop. M: Izd-vo «Prospekt», 2017, 281 p.
3. Murav'jova E.V., Jekologicheskie aspekty [Environmental aspects]. Prikladnaja tehnosfernaja riskologija. M., 2007, 355 p.
4. Bahterev V.V., Pervye rezul'taty ispol'zovanija mikrovolnovogo izluchenija dlja izuchenija hromitovyh rud. Ural'skij geofizicheskij vestnik, 2013, № 2(22). pp. 13–17.
5. Kasimova A.U. Problemy avtomatiki i upravlenija, 2022. № 1(43). pp. 33-49.
6. Inozemcev M. A. Jelektronnye sredstva i sistemy upravlenija. Materialy dokladov Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii, 2020, № 1-1, pp. 279–281.
7. Ellison W. J., Moreau J. M., Open Ended Coaxial Probe: Model Limitations. IEEE Trans. Instrumentation & Measurement, Vol. 57, № 9, Sept. 2008, 1-19.
8. Nasybullin, A. R. Inzhenernyj vestnik Dona, 2018., № 4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5277](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5277)
9. Rodionova O. V. Metod izmerenija kompleksnoj dijelektricheskoj pronicaemosti pochvogrunтов v shirokoj polose chastot [Method for measuring complex dielectric constant of soils in a wide frequency band]. special'nost' 01.04.03 "Radiofizika": dissertacija na soiskanie uchenoj stepeni kandidata fiziko-matematicheskikh nauk, Tomsk, 2016. 136 p.
10. Guwy A.J., Farley A., Cunnah P., Hawkes F.R., Hawkes D.L., Chase M., Buckland H. Water Res. 1999, 33, pp.3142–3148.
11. Smirnov S.V. Mnogosensornaja sistema kontrolja temperatury i vlazhnosti dlja realizacii adaptivnyh processov SVCh-obrabotki organicheskikh othodov zhivotnovodstva [Multisensor Temperature and Humidity Control System for Implementation of Adaptive Processes of Microwave Processing of Organic Livestock Wastes]. K. pp, 2021- 146.

12. Mitel'man Ju. E., Abdullin R. R., Sychugov S. G., Shabunin S. N., Antenny i ustrojstva (SVCh): raschet i izmerenie harakteristik [Antennas and devices (microwave): calculation and measurement of characteristics]. Uchebnoe posobie dlja vuzov, Moskva: Izdatel'stvo Jurajt, 2022. 138 p.

13. Ishkaev T. M., Nasybullin A. R., Farhutdino R. V. v, Samigullin R. R. Juzhno-Sibirskij nauchnyj vestnik, 2021, № 6(40). pp. 56-61.

14. Smirnov, S.V. Prikladnaja jelektrodinamika, fotonika i zhivye sistemy. MNTK molodyh uchenyh, aspirantov i studentov, Kazan', 2020, pp.117-119.