



## СВЧ ИЗМЕРЕНИЯ СОЛЕННОСТИ ВОДЫ

Д.А. Полетаев, Б.В. Соколенко

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского»,  
РФ, г. Симферополь, пр. Академика Вернадского, 4  
*e-mail: poletaevda@cfuv.ru*

В данной работе проводится измерение солености воды СВЧ методом. Целью работы является оптимизация параметров резонансного измерительного преобразователя, применяемого для измерения солености водной среды, а также описание порядка работы с данным прибором и его апробация. Описана методика проведения эксперимента. Проведена градуировка разработанного устройства. Показано, что предлагаемый метод измерения солености воды может применяться для поточного контроля в реальном времени.

**Ключевые слова:** СВЧ, резонатор, добротность, частота, датчик, апертура, волновод.

Поступила в редакцию: 25.09.2023. После доработки: 21.12.2023.

**Введение.** Соленость – актуальный показатель, который требует прецизионного измерения для различных водных сред. Анализ растворов такого плана актуален для морей, океанов, водоемов хозяйственного назначения, как пресноводных, так и соленых [1, 2]. Повсеместно применяются гравиметрические, кондуктометрические методы анализа содержания солей. Однако гравиметрические методы весьма длительны по времени и приблизительны по содержанию. Кондуктометрические методы экспрессны, однако требуют дополнительного обслуживания в плане оценки степени окисления элементов датчиков (коррозия). Кроме того, перечисленные методы весьма приблизительны при измерении небольших значений солености. Такие измерения могут быть актуальны для открытых пресных водоемов, находящихся в непосредственной близости от морского побережья. Поэтому требуются современные экспрессные методы оценки качественного и количественного состава воды.

Основным функциональным узлом аппаратуры для СВЧ диагностики материалов является датчик, который включает источник электромагнитных волн, измерительный преобразователь и

устройства выделения информационных сигналов (резонансной частоты, добротности и их изменений для конкретного резонансного измерительного преобразователя). Наибольшее распространение получили датчики на основе резонаторов [3, 4]. При этом, для обеспечения бесконтактности проведения экспресс-измерений, электромагнитное поле резонатора зондирует образец через отверстие в одной из стенок. Такой резонансный измерительный преобразователь относится к апертурному типу [5 – 7].

С учетом востребованности СВЧ методов диагностики и их возможного широкого использования актуальным является численно-аналитическое моделирование резонансного измерительного преобразователя которое, в частности, позволяет рассчитывать его характеристики преобразования – исходный материал для дальнейшей компьютерной обработки и визуализации результатов измерений. Проведение многопараметрической оптимизации, количественное исследование метрологических параметров, обоснование применения новых типов резонансных измерительных преобразователей и их возможностей, также нуждаются в создании адекватной численной модели.

СВЧ методы диагностики находят широкое применение в науке, технике и народном хозяйстве. Повсеместное использование аппаратуры, базирующейся на этих методах, обусловлено неразрушаемостью образца, отсутствием физического контакта, возможностью получения экспресс-данных при проведении исследований [3]. В наибольшей степени подобная аппаратура востребована в агропромышленных хозяйствах (измерители влажности), в различных областях науки и производства (микроволновая микроскопия), и в биологии (для исследования характеристик объектов) [3–5]. Неотъемлемой составляющей аппаратуры при использовании ближнеполевых СВЧ методов являются резонансные измерительные преобразователи, конструкции и геометрия которых определяются областью использования. С учетом многообразия используемых сенсоров рассматривается конструкция резонансного измерительного преобразователя с коаксиальной измерительной апертурой, которая нашла применение для исследований распределенных структур, производящая усреднение измеряемых параметров по объему и площади исследуемого объекта, каковыми и являются растворы жидкостей.

Измеряемыми характеристиками жидкостных сред, как и других диэлектрических объектов, являются электрофизические параметры: относительная диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь. Данные величины однозначно связаны с информационными сигналами резонансного измерительного преобразователя: добротностью, резонансной частотой и их изменениями.

Прямое определение электрофизических параметров диэлектрических объектов весьма трудоемко. Это связано с необходимостью проведения предварительной калибровки датчика с конкретными геометрическими размерами, а также с особенностями проведения экспериментов: на измеряемые параметры

оказывают сильное влияние неплотность прилегания объекта исследования к апертуре, внешние факторы. Кроме того, требуется проведение оптимизации параметров измерительного преобразователя для обеспечения одновременно высокой чувствительности при сохранении усредненного характера измерений.

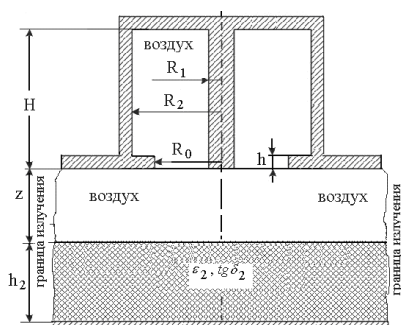
Усреднение получаемых экспериментальных значений легко достижимо в традиционных закрытых резонаторах диэлькометрических методов [7]. Однако необходимость каждый раз помещать объект внутрь резонатора требует немалых затрат по времени, осложняет его применения для серий проб.

Экспресс-контроль электрофизических параметров фактически требует внешнего, по отношению к датчику, расположения объекта и измерений в режиме реального масштаба времени. Концептуально это может быть портативный прибор, легко применимый в измерении солености воды.

Существует большое количество работ экспериментального и теоретического характера, связанных с исследованием применения резонаторных измерительных преобразователей для измерения электрофизических параметров [3–7]. Однако в этих работах не уделяется должного внимания оптимизации чувствительности датчика для различных сред (в особенности – жидкостных). Теоретическое обоснование выбора параметров резонансного измерительного преобразователя базируются на упрощенных моделях, позволяющих учитывать только колебательные потери в резонаторной системе. Современные прямые численные методы позволяют существенно уточнить модель резонансного измерительного преобразователя, то есть учесть геометрию апертуры, расположение, размеры и другие характеристики исследуемого объекта и построить оценочные теоретические характеристики преобразования, связывающие информационные сигналы с электрофизическими параметрами исследуемого объекта [4].

Целью работы является оптимизация параметров резонансного измерительного преобразователя, применяемого для измерения солености водной среды, а также описание порядка работы с данным прибором и его апробация.

**Материалы и методы.** На рис. 1 приведена конструкция рассматриваемого резонансного измерительного преобразователя с прилегающим объектом.



**Рис. 1.** Схема резонансного измерительного преобразователя

**Fig. 1.** Scheme of a resonant measuring converter

Модель включает отрезок коаксиального волновода, образец толщиной  $h_2$  с электрофизическими параметрами  $\epsilon_1$ ,  $\text{tg } \delta_1$ .

Для проведения практических измерений важно, чтобы электрофизические параметры образца оказывали как можно большее влияние на нагруженную добротность резонансного измерительного преобразователя. При этом нагруженная добротность не должна быть меньше 100 [4]. Из теории коаксиальных линий передач [5] известно, что минимальный коэффициент затухания в коаксиальной линии достигается при отношении радиусов:  $R_1 / R_2 = 0,28$ . Очевидно, максимальная добротность четвертьволнового резонатора будет также достигаться при данном отношении. При достижении минимальных значений соотношений, а, следовательно, и добротности, точность измерений резко падает.

Максимум дисперсии для воды приходится на частоту около 10 ГГц [4]. Предварительный анализ позволяет вы-

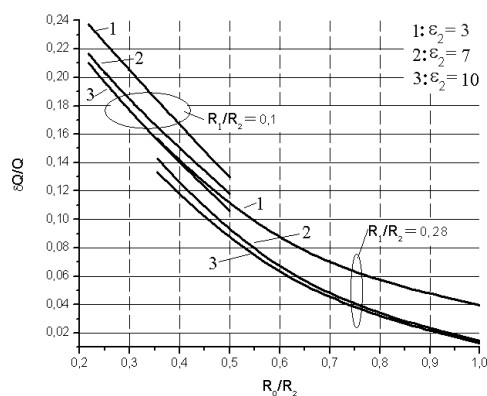
брать геометрические размеры модели:  $H / \lambda = 1,25$ ;  $R_2 / \lambda = 0,17$ ;  $h / H = 5,6 \cdot 10^{-3}$ ;  $z = \infty$  (четвертьволновый резонатор нагружен на свободное пространство); проводимость стенок резонатора принята равной  $\sigma = 5,8 \cdot 10^6$  См/м, где  $\lambda$  – длина волны СВЧ колебания. Значение проводимости выбрано меньше проводимости чистой меди для модельного учета шероховатости стенок. Исследование влияния остальных геометрических размеров и параметров резонатора, апертуры и объекта исследования осуществлялось с помощью численной модели, в основе которой лежит метод конечных элементов. Он предусматривает решение волновых уравнений с заданными краевыми условиями [8] при разделении трехмерного пространства на тетраэдры. Следует отметить, что особенности моделирования и построения сетки конечных элементов могут быть вынесены в отдельную большую работу.

Из общих физических представлений следует, что выбором радиуса  $R_0$  апертуры можно существенно изменять добротность резонаторного измерительного преобразователя.

Целесообразно предусмотреть возможность исследования широкого диапазона солености воды (от 0 до 40 ppm) [1]. Количественно это может характеризоваться изменением относительной диэлектрической проницаемости от 3 до 10 и тангенса угла диэлектрических потерь от 0,01 до 0,4, при  $\lambda = 3$  см. Таким образом, численный расчет целесообразно проводить в данном диапазоне изменения электрофизических параметров. Эти данные применены для оптимизации геометрических размеров резонансного преобразователя.

Расчеты проведены для модели с параметрами:  $H / \lambda = 1,25$ ;  $R_2 / \lambda = 0,17$ ;  $z = 0$ ;  $h_{21} = 0$ ;  $h_2 / \lambda = 0,14$ ;  $h / H = 0,01$ ; проводимость стенок резонатора  $\sigma = 5,8 \cdot 10^6$  См/м;  $\lambda = 3$  см, при изменении величины апертуры  $R_0 / R_2$  от 0,29 до 1, для объектов, параметры которых изменяются в указанных выше пределах. График зависимости чувствительности

измерительного преобразователя от величины  $R_0$  апертуры приведен на рис. 2. Чувствительность по добротности  $\delta Q/Q$  вычислялась исходя из изменения тангенса угла диэлектрических потерь  $\text{ctg } \delta_2 = 0,01$ , при значении  $\text{tg } \delta_2 = 0,01$  и постоянной относительной диэлектрической проницаемости.



**Рис. 2.** Зависимость чувствительности измерительного преобразователя от величины апертуры и параметров объекта  
**Fig. 2.** The dependence of the sensitivity of measuring transducer on the value of the aperture and parameters of the object

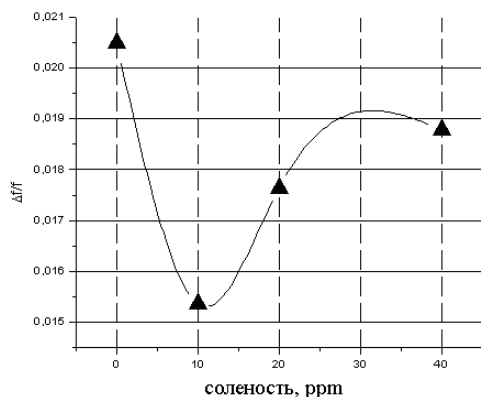
Добротность при наличии объекта, удобная в метрологическом отношении [4], достигается в узком диапазоне значений  $R_0$ . При этом чувствительность к образцам с высокой диэлектрической проницаемостью оказывается недостаточной. Поэтому оптимизировать такой резонаторный измерительный преобразователь следует отдельно для объектов с низким и высоким значением диэлектрической проницаемости.

На основе численной модели проведена оптимизация размеров резонансного измерительного преобразователя (а именно отношений  $R_0 / R_2$  и  $h / H$ ) с целью достижения максимальной чувствительности к изменению солёности воды. Изготовлен прототип прибора, согласно оптимизированных геометрических размеров: соотношения радиусов коаксиальной апертуры — 0,4; соотношение внутреннего и наружного радиусов ко-

аксиального резонатора — 0,28; соотношение высоты коаксиального резонатора к длине волны — 1,25. Материал коаксиального резонатора и стенок — сталь с нанесённым медным покрытием, толщина которого больше скин-слоя на рабочей частоте. В качестве измерительного комплекса применялся векторный анализатор цепей P4226 со стандартной схемой подключения анализируемого устройства — резонатора. В качестве объектов применялись подготовленные пробы воды со следующими значениями солёности: 0 ppm; 10 ppm; 20 ppm; 40 ppm. Такие значения характерны для большинства гравиметрических измерителей. Анализ больших значений солёности возможен при соответствующем подборе геометрических размеров апертуры преобразователя. Подготовка объектов исследования проводилась путем растворения взвешенной поваренной соли в отмеренном объеме дистиллированной воды. Массы компонент отмерялись весами с точностью до 0,1 г. Затем жидкость разливалась в полиэтиленовые пакеты (толщина не более 300 мкм), которые помещались вблизи апертуры измерительного преобразователя. Предварительно было диагностировано отсутствие влияния полиэтилена такой толщины на показания прибора. Каждое измерение проводилось несколько раз с последующим усреднением результатов. Требуется отметить, что разброс численных значений результатов эксперимента составлял не более 2 %. Это подчеркивает высокие эксплуатационные характеристики прибора. В процессе эксперимента выявлено, что исследуемый объект оказывает значительное влияние на характеристики датчика.

**Полученные результаты.** На рис. 3 представлены интерполированные значения относительных изменений резонансных частот датчика с пробой, относительно частоты при открытой апертуре. Точками на рис. 3 отмечены полу-

ченные в ходе эксперимента значения информационных сигналов. Интерполяция производилась по данным значениям.



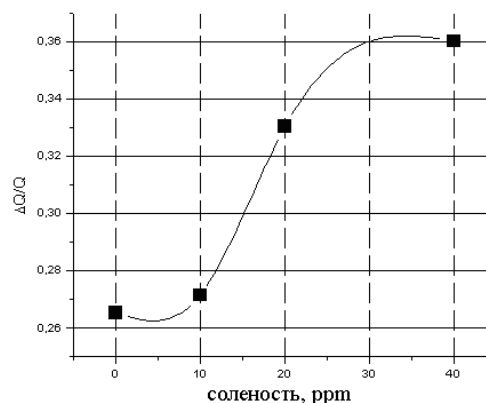
**Рис. 3.** Изменение частоты датчика от солености

**Fig. 3.** Changing the frequency of the sensor on salinity

Вид зависимости (рис. 3), скорее всего, обусловлен особенностями конструкции апертурного датчика. При этом малые значения тангенса угла диэлектрических потерь (при малых концентрациях солей) практически не ограничивают выход электромагнитной энергии из апертуры. При этом высокое значение  $\epsilon$  воды на СВЧ сказывается на уменьшении резонансной частоты прибора. При росте  $\text{tg } \delta$  наблюдается экранирование апертуры, ввиду чего потери электромагнитной энергии уменьшаются. При этом высокое значение диэлектрической проницаемости воды на СВЧ оказывает меньшее влияние на изменение резонансной частоты. Вместе с тем, выявленная зависимость (на рис. 3) может оказаться весьма информативной в диапазоне изменения солености от 10 ppm до 30 ppm.

На рис. 4 представлены интерполированные значения относительных изменений добротностей резонансного измерительного преобразователя, относительно добротности при открытой апер-

туре. Точками на рис. 4 отмечены полученные в ходе эксперимента значения информационных сигналов. Интерполяция производилась по данным значениям.



**Рис. 4.** Изменение добротности датчика при вариациях солености

**Fig. 4.** Changing the frequency of the sensor at salinity variations

Как видно из рис. 4, полученная характеристика монотонна, что упрощает применение описанного датчика для практических измерений. Рост изменения добротности при росте солености воды укладывается в существующие физические представления. Так, рост солености воды приводит к увеличению тангенса угла диэлектрических потерь. Кроме того, на рис. 4 присутствуют фактически плоские участки (в диапазоне от 0 до 10 ppm, а также от 30 до 40 ppm). Для однозначного определения солености требуется, кроме изменения добротности, учитывать дополнительный информационный параметр – изменение частоты.

Технологический процесс измерения солености воды на предлагаемом приборе может осуществляться в следующем порядке:

1. Предварительная градуировка датчика по растворам с известным содержанием солей. В данном процессе

производится сопоставление значения изменения добротности и резонансной частоты датчика показателю солености воды.

2. Определение параметров жидкости. При этом резонансный измерительный преобразователь осуществляет предоставление данных об изменении добротности и частоты, сопоставляя которые с градуировочными данными производится индикация значений солености воды.

**Заключение.** В работе предложен и промоделирован прецизионный датчик солености воды. Изготовлен прототип измерительного преобразователя. Проведен комплекс практических измерений подготовленных проб воды. По проведенным оценкам время измерения составляет не более 100 мкс. Это предполагает применение разработанного датчика в комплексе проточных автоматических измерителей, осуществляющих контроль солености воды в реальном времени. Описан порядок проведения технологических измерений солености воды с применением разработанного устройства.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Забурдаев В.И.* К вопросу методики определения абсолютной солености морской воды с солевым составом, отличающимся от стандартной морской воды // Системы контроля окружающей среды. 2014. № 20. С. 27–32.
2. *Derraik J.G.* The pollution of the marine environment by plastic debris: a review // Marine Pollution Bulletin. 2002. V. 44. P. 842–852.
3. *Егоров В.Н.* Резонансные методы исследования диэлектриков на СВЧ // Приборы и техника эксперимента. 2007. № 2. С. 5–38.
4. *Chen L.* Microwave electronics measurement and materials characterization. New York: John Wiley & sons. 2004. 537 p.
5. *Детинко М.В.* Физические основы неразрушающего СВЧ-резонаторного метода локального контроля электрофизических параметров полупроводников. Томск: Изд-во Томского университета. 1988. 30 с.
6. *Завьялов А.С.* Измерение параметров материалов на сверхвысоких частотах. Томск: Изд-во ТГУ. 1985. 213 с.
7. *Брандт А.А.* Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах. М.: Физматиздат. 1963. 404 с.
8. *Григорьев А.Д.* Электродинамика и техника СВЧ. М.: Высш. шк. 1990. 335 с.

## MICROWAVE MEASUREMENT OF WATER SALINITY

**D.A. Poletaev, B.V. Sokolenko**

V.I. Vernadsky Crimea Federal University, RF, Simferopol, Vernadsky Av., 4

In this work, the water salinity is measured by a microwave method. The aim of the work is to optimize the parameters of the resonant converter used for measuring the salinity of the aquatic environment, as well as to describe the principle of operation of this device and its testing. A theoretical description of the methodology of the experiment is made. Its capabilities are analyzed. Both theoretical and practical graduation of the developed device is carried out. An unambiguous compliance of salinity with information signals is established. It is concluded that the proposed method for measuring the water salinity can be used for streaming control in real time.

**Keywords:** microwave, resonator, volume, frequency, sensor, aperture, waveguide.

REFERENCES

1. *Zaburdaev V.I.* K voprosu metodiki opredeleniya absolyutnoj solenosti morskoy vody s solevym sostavom, otlichayushchimsya ot standartnoj morskoy vody (To the issue of the methodology for determining the absolute salinity of sea water with saline, which differs from standard sea water). *Sistemy kontrolya okruzhayushchej sredy*, 2014, No. 20, pp. 27–32.
2. *Derraik J.G.* The Pollution of the Marine Environment by Plastic Debris: A Review. *Marine Pollution Bulletin*, 2002, Vol. 44, pp. 842–852.
3. *Egorov V.N.* Rezonansnye metody issledovaniya dielektrikov na SVCH (Resonance methods for the study of dielectrics for microwaves). *Pribory i tekhnika eksperimenta*, 2007, No. 2, pp. 5–38.
4. *Chen L.* Microwave Electronics Measurement and Materials Characterization. New York: John Wiley & Sons, 2004, 537 p.
5. *Detinko M.V.* Fizicheskie osnovy nerazrushayushchego SVCH-rezonatornogo metoda lokal'nogo kontrolya elektrofizicheskikh parametrov poluprovodnikov (The physical foundations of the non-destructive microwave method of local control of the electrophysical parameters of the semiconductors). Tomsk: Izd-vo Tomskogo universiteta, 1988, 30 p.
6. *Zavyalov A.S.* Izmerenie parametrov materialov na sverhvysokih chastotah (Measurement of the parameters of materials at ultra-high frequencies). Tomsk: Izd-vo TGU, 1985, 213 p.
7. *Brandt A.A.* Issledovanie dielektrikov na sverhvysokih chastotah (The study of dielectrics at super-high frequencies). Moscow: Fizmatizdat., 1963, 404 p.
8. *Grigoryev A.D.* Elektrodinamika i tekhnika SVCH (Electrodynamics and microwave technique). Moscow: Vysshaya shkola, 1990, 335 p.