

УДК 537.874; 621.3.095

## **МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ НЕФТЕПРОДУКТОВ ВОДЕ С ПОМОЩЬЮ МИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛН**

**Е. Е. Чигряй, И. П. Никитин**

**Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН**

Статья поступила в редакцию 20 апреля 2016 г.

**Аннотация.** Предлагается методика определения малого содержания нефтепродуктов в воде с помощью миллиметровых волн. Устройство, на котором реализуется методика, представляет собой пластину диэлектрика, которая с одной стороны контактирует с анизотропно проводящей пленкой, а с другой стороны граничит с измеряемой средой. Показано, что применение анизотропно проводящей пленки в этом устройстве позволяет проводить настройку прибора простым поворотом оси анизотропии пленки, обеспечивая таким образом максимальную чувствительность к малому содержанию нефтепродуктов в среде.

**Ключевые слова:** диэлектрические свойства, анизотропно проводящая пленка, измерение содержания нефтепродуктов в воде.

**Abstract.** A method is proposed for measuring small concentrations of oil products in water. The device represents a plate of a dielectric material that is in contact with an anisotropically conducting film on one side and adjoins a medium under test on the other side. It is shown that the application of an anisotropically conducting film in the device allows to adjust the device by a simple rotation of the anisotropy axis of the film, thus providing the maximum sensitivity to small concentrations of oil in the medium.

**Key words:** dielectric properties, anistropically conducting film, measurement of small concentrations of oil in water.

## 1. Введение

Создание когерентных источников миллиметровых и субмиллиметровых волн, а также высокочувствительных детекторов для их приема (см., например, [1–3]), во второй половине прошлого века дало толчок широкому применению волн указанного диапазона в исследовательских и прикладных целях. Были достигнуты серьезные успехи в разработке измерительных линий миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов и созданы методики и установки для измерения диэлектрических и магнитных свойств различных материалов [4, 5]. Были проведены исследования широкого класса газообразных, жидких и твердых веществ (см., например, [6]). Результаты этих исследований представляют самостоятельный интерес для физики твердого тела и молекулярной физики, а также послужили основой для создания приборов для материаловедения, радиовидения, интроскопии и локальной связи. Одной из наиболее важных областей применения миллиметровых и субмиллиметровых волн является определение состава сред. Ключевым моментом в этом вопросе является то, что разные материалы могут иметь резко различающиеся значения коэффициента поглощения в указанном диапазоне волн. Так, различие между коэффициентами поглощения полярных и неполярных жидкостей может составить 2–3 порядка, и это различие растет с ростом частоты [7]. Например, коэффициент поглощения воды в миллиметровом диапазоне волн может достигать 60 дБ/мм. На этом принципе основаны многие методы измерения влажности жидких и твердых материалов [8, 9]. Наиболее широкое практическое применение получили влагомеры сырой нефти, разработанные в ИРЭ РАН [10], которые позволяют с высокой точностью определять влажность сырой нефти без коррекции на сорт нефти, ее температуру и соленость.

К сожалению, конструкции, разработанные для измерения содержания воды в нефти, не могут быть использованы для определения небольших концентраций неполярных жидкостей в воде. В данном случае из-за сильного поглощения миллиметровых волн в воде невозможно применить методы,

основанные на измерении коэффициента поглощения измеряемой жидкости, и поэтому приходится изыскивать другие подходы. Одним из таких подходов является измерение величины и частоты минимума коэффициента отражения от резонатора, представляющего собой отрезок прямоугольного металлического волновода, заполненного диэлектриком четвертьволновой толщины с диэлектрической проницаемостью, приблизительно равной корню квадратному от проницаемости исследуемого материала (или воды в случае измерения водных растворов) [11]. Этот метод позволяет определить комплексную диэлектрическую проницаемость материала и, соответственно, концентрацию примесей в воде по изменению величины и частоты минимума коэффициента отражения от описанной структуры. Существует также квазиоптический аналог этого метода, в котором четвертьволновая плоскопараллельная пластина помещается между излучающим рупором и исследуемой средой. Эти методы успешно применялись при исследовании растворов сахара и глюкозы в воде, в физиологическом растворе и в крови в рамках проекта МНТЦ по созданию прибора для неинвазивного определения содержания сахара в крови [11].

## **2. Измерение содержания нефтепродуктов в воде с помощью миллиметровых волн**

Как уже упоминалось, определение содержания нефтепродуктов в воде представляет собой существенно более сложную задачу, чем определение содержания воды в нефти. В то время как для определения влажности нефти разработаны различные приборы, работающие на потоке в миллиметровом диапазоне волн, и такие приборы давно уже выпускаются в промышленном масштабе (см., например, [10]), в настоящее время не существует аналогичных приборов для определения содержания нефтепродуктов в воде. Поэтому разработка прибора для измерения малых концентраций нефти и нефтепродуктов в воде является важной народно-хозяйственной задачей.

Физический принцип, лежащий в основе метода для определения содержания сахара в водном растворе, описанного в [11], заключается в

обеспечении большего проникновения электромагнитных волн в исследуемую среду за счет использования четвертьволновой согласующей пластины, в результате чего удастся извлечь больше информации о диэлектрических характеристиках среды и, соответственно, определить состав среды с большей точностью, чем при измерении коэффициента отражения от границы воздух–среда. Впрочем, эту же методику можно рассмотреть и под другим углом зрения – диэлектрическую пластину можно рассматривать как резонатор Фабри–Перо, нагруженный на исследуемую среду. При заданных показателе преломления и коэффициенте поглощения (который обычно считается пренебрежимо малым) материала пластины, добротность данного резонатора определяется действительной и мнимой частями исследуемой среды. Одним из недостатков этого метода являются довольно высокие требования, предъявляемые к материалу пластины: диэлектрическая проницаемость пластины должна быть приблизительно равной корню квадратному от проницаемости исследуемого материала (воды) и иметь пренебрежимо малые потери. В [11] в качестве материала пластины использовали композиционный материал, состоящий из порошка рутила в полистироле. Изменяя концентрацию рутила в материале, удавалось получить нужную величину показателя преломления при достаточно низких потерях.

В настоящей работе в качестве диэлектрической пластины (в качестве резонатора Фабри–Перо) используется фторопластовая пластина, на переднюю поверхность которой (со стороны излучающего рупора) нанесена анизотропно проводящая пленка. Связь резонатора с возбуждающей линейно-поляризованной волной можно варьировать путем поворота оси анизотропии пленки по отношению к вектору поляризации падающей волны. Схематическое изображение устройства представлено на рис. 1.

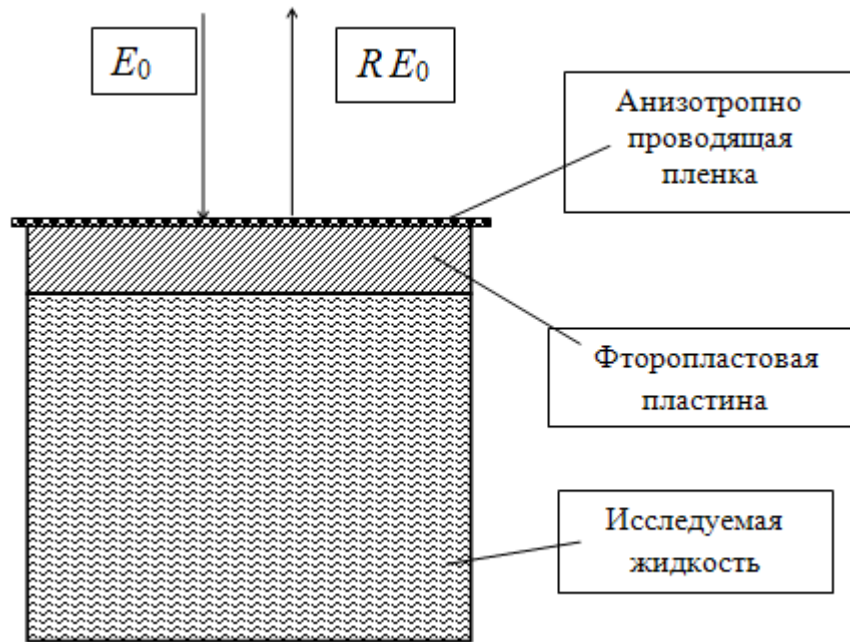


Рис. 1. Схематическое изображение измерительной ячейки для определения концентрации нефти в воде.

В качестве анизотропно проводящей пленки можно использовать обычную плоскую проволочную решетку. Если считать, что такая решетка практически не влияет на прохождение волны, поляризованной перпендикулярно к направлению осей проволок, а волна, поляризованная параллельно проволокам, полностью отражается от решетки, то в случае, когда электрический вектор падающей волны направлен под углом  $\theta$  к направлению проволок, коэффициенты пропускания и отражения (по амплитуде) имеют вид

$$T_p = \sin \theta, \quad R_p = -\cos \theta, \quad (1)$$

где  $\theta$  — величина угла между направлением электрического вектора падающей волны и направлением осей проволок. Эти формулы не учитывают поляризацию прошедшей и отраженной волн. В экспериментах по исследованию свойств диэлектриков обычно имеют дело с фиксированным направлением поляризации. Поэтому коэффициенты пропускания и отражения при фиксированном направлении поляризации принимают вид

$$T_p = \sin^2 \theta, \quad R_p = -\cos^2 \theta. \quad (2)$$

В этом случае, коэффициент отражения от структуры, изображенной на рис. 1 имеет вид

$$R = \frac{r_1 + r_2 e^{-2ik\sqrt{\epsilon}d}}{1 + r_1 r_2 e^{-2ik\sqrt{\epsilon}d}}, \quad (3)$$

где

$$r_1 = \frac{r_0 + R_p}{1 + r_0 R_p} - \quad (4)$$

представляет собой комплексный коэффициент отражения от передней границы пластины, покрытой анизотропно проводящей пленкой,

$$r_2 = \frac{\sqrt{\epsilon} - \sqrt{\epsilon_{cp}}}{\sqrt{\epsilon} + \sqrt{\epsilon_{cp}}} - \quad (5)$$

представляет собой комплексный коэффициент отражения от задней границы пластины (границы раздела между пластиной и измеряемой средой),

$r_0 = \frac{1 - \sqrt{\epsilon}}{1 + \sqrt{\epsilon}}$  – коэффициент отражения от границы воздух–пластина,  $\epsilon$  – (комплексная) диэлектрическая проницаемость материала пластины,  $d$  – толщина пластины,  $\epsilon_{cp}$  – комплексная диэлектрическая проницаемость исследуемой среды и  $k = 2\pi / \lambda_0$ ,  $\lambda_0$  – длина волны в вакууме.

Методика определения содержания нефтепродуктов в воде аналогична методике определения содержания сахара или глюкозы в воде и заключается в измерении коэффициента отражения от структуры рис. 1 при разных исследуемых средах – эталонной жидкости с известной диэлектрической проницаемостью и исследуемой эмульсии нефтепродуктов в воде. На основании этих измерений строится калибровочная кривая, по которой в дальнейшем определяется концентрация нефтепродуктов в воде.

На первом этапе вычисляем коэффициент отражения от измерительной структуры, нагруженной на эталонную жидкость, (воду). Изменяя угол  $\theta$

между направлением электрического вектора падающей волны и направлением осей проволок (оси анизотропии анизотропно проводящей поверхности) добиваемся минимума коэффициента отражения на одной из частот интерференционного минимума. На рис. 2 представлены результаты расчета  $|R|^2$  от структуры со следующими параметрами: толщина фторопластовой пластины – 2,5 мм, диэлектрическая проницаемость фторопласта  $\varepsilon = (2,04 - 1,7 \cdot 10^{-3})$ . Диэлектрическая проницаемость эталонной жидкости (воды) рассчитывалась по дебаевской модели по формулам, приведенным в [12]. Расчеты проводились при разных углах  $\theta$  между направлением электрического вектора падающей волны и осью анизотропии пленки. Для сравнения показана зависимость  $|R|^2$  в отсутствие пленки (при  $\theta = 90^\circ$ ). Из рисунка видно, что наиболее глубокий минимум  $|R|^2$  при данных параметрах структуры достигается при  $\theta = 45^\circ$ . (Более точные расчеты показывают, что минимум достигается при  $\theta = 46,7^\circ$  вблизи частоты 61 ГГц.)

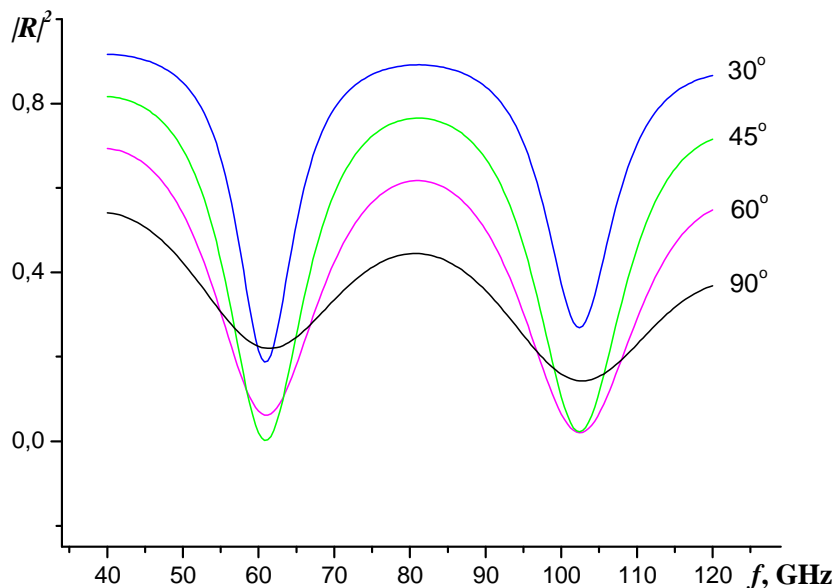


Рис. 2. Частотная зависимость коэффициента отражения от структуры при разных значениях угла  $\theta$  между направлением электрического вектора падающей волны и осью анизотропии пленки. Числа около кривых указывают значение угла  $\theta$ . Случай  $\theta = 90^\circ$  эквивалентен отсутствию пленки.

В дальнейшем, используя вместо эталонной жидкости образцы раствора нефтепродуктов в воде с заданной концентрацией, мы рассчитали зависимость  $|R_{\min}|^2(f)$  для минимума вблизи частоты  $f = 61$  ГГц от концентрации нефтепродуктов  $w$  в воде при значении угла  $\theta = 46.7^\circ$ . Значение диэлектрической проницаемости смеси  $\epsilon_{\text{cp}}$  в данном случае рассчитывалось по формуле Оделевского [13]:

$$\epsilon_{\text{cp}} = \left[ 1 + \frac{w}{\frac{1-w}{3} + \frac{\epsilon_{\text{B}}(f)}{\epsilon_{\text{H}}(f) - \epsilon_{\text{B}}(f)}} \right] \epsilon_{\text{B}}(f)$$

где  $w$  – объемная доля нефти в воде,  $\epsilon_{\text{B}}$  – диэлектрическая проницаемость воды. Диэлектрическая проницаемость нефти  $\epsilon_{\text{H}}$  взята равной  $2.129 - i 9.705 \cdot 10^{-3}$ . На рис. 3 показана частотная зависимость  $|R|^2$  для интерференционного минимума вблизи 61 ГГц в логарифмическом масштабе по оси ординат и увеличенном масштабе по оси абсцисс при разных концентрациях нефти  $w$ .

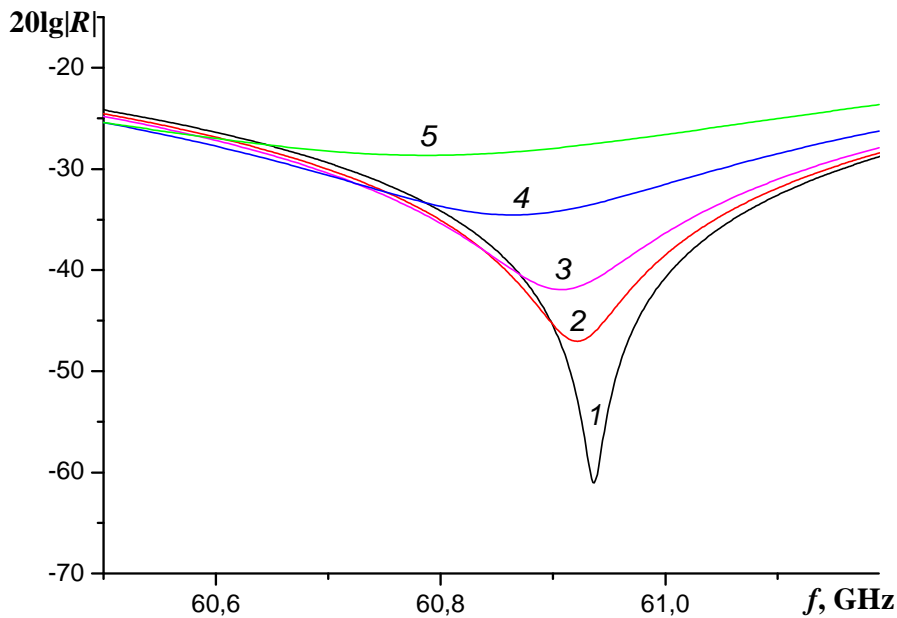


Рис. 3. Поведение минимума коэффициента отражения при  $\theta = 46.7^\circ$  в зависимости от концентрации нефти  $w$ . Кривые 1–5 соответствуют концентрациям  $w = 0, 0.01, 0.02, 0.05$  и  $0.1$ , соответственно.



Сравнение кривых на рис. 3 показывает, что предлагаемый метод может обеспечить высокую чувствительность измерений к содержанию нефти (и нефтепродуктов) воде. Особенно высокая чувствительность достигается при низких концентрациях нефти: изменение концентрации нефти на 1% приводит к изменению коэффициента отражения от структуры более, чем на 15 дБ.

### 3. Заключение

Предложен метод измерения малых концентраций нефти и нефтепродуктов в воде, который может быть реализован на простом устройстве, не требующем сложных технологий и прецизионной обработки. Численные расчеты, проведенные для реальных параметров нефти и воды показали, что чувствительность метода при малых значениях концентрации нефти превышает 15 дБ на 1%. Реализация метода может иметь важное значение для нефтегазовой промышленности и для решения проблем экологического мониторинга окружающей среды. Кроме того, метод может оказаться перспективным для измерений малых концентраций других неполярных примесей в воде.

В заключение авторы выражают глубокую благодарность Д.С. Калёнову за большую помощь при оформлении результатов.

### Литература

1. М. Б. Голант, Р.Л. Виленская, Е.А. Зюлина и др. Серия широкодиапазонных генераторов малой мощности миллиметровых и субмиллиметровых диапазонов длин волн, ПТЭ, 1965, № 4, с.136–139.
2. Е. М. Гершензон, М. Б. Голант, А. А. Негирев, В. С. Савельев, Лампы обратной волны миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов волн. Под ред. Н. Д. Девяткова. М.: Радио и связь, 1985.
3. А.Н. Выставкин, Э.Э. Годик, В.Н. Губанков, Ш.М. Коган, Т.М. Лифшиц, Ф.Я. Надь, А.В. Францессон, Высокочувствительные приемники электромагнитных

излучений. Проблемы современной радиотехники и электроники. М: Наука, 1980, с. 359–412.

4. Н.А. Ирисова, Метрика субмиллиметровых волн, Вестник АН СССР, 1968, № 10, с. 63–71.

5. В.В. Мериакри, Исследование диэлектриков, сегнетоэлектриков и ферритов на субмиллиметровых волнах, Дисс. физ.-мат. наук, ИРЭ РАН, Москва, 1973.

6. В.В. Мериакри, В.Н. Аплеталин, А.Н. Копнин, Г.А. Крафтмахер, М.Г. Семенов, Е.Ф. Ушаткин, Е.Е. Чигряй, Субмиллиметровая лучеводная спектроскопия и ее применения, в сб. Успехи современной радиотехники и электроники, под ред. В.А. Котельникова, М: Наука, 1980.

7. В.В. Мериакри, Спектроскопия миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов, Вестник Московского Университета, сер. 3, 1992, т. 33, № 3, с. 86–94.

8. В.В. Мериакри, И.П. Никитин, Е.Е. Чигряй Контроль влагосодержания в средах и материалах с помощью миллиметровых волн, Радиотехника, 1996, № 2, с. 98–101.

9. В.В. Мериакри, Е.Е. Чигряй, Определение содержания спирта и сахара в водных растворах с помощью сантиметровых и миллиметровых волн, Электромагнитные волны и электронные системы, 2004, т. 9, № 1, с. 55–58.

10. Научно-производственное предприятие «Нефтесервисприбор». URL: <http://nsp-sar.ru>

11. V.V. Meriakri, E.E. Chigryai, D. Kim, I.P. Nikitin, L.I. Pangonis, M.P. Parkhomenko, J.H. Won, Dielectric Properties of Water Solutions with Small Content of Sugar and Glucose in the Millimeter Wave Band and the Determination of Glucose in Blood, Proc. 6th Int. Conf. on Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances, 2005, Weimar (Germany), pp. 65–72.

12. H.J. Liebe, G.A. Hufford, T. Manabe, A model for the complex permittivity of water at frequencies below 1 THz, Int. J. Infrared & Millimeter Waves, 1991, vol. 12, no. 7, pp. 659–675.

13. Электрические свойства полимеров, под ред. Б.И. Сажина, Л.: Химия, 1977.