

ЦИЛИНДРИЧЕСКИЙ РЕЗОНАТОР С РАДИАЛЬНОЙ ПОЛОСТЬЮ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОМПЛЕКСНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ СТОЛОВЫХ ВИН

З. Е. Еременко¹, Е. М. Ганапольский¹, В. Н. Скресанов¹, В. В. Васильченко¹,
В. Г. Гержикова², Т. А. Жилиякова², Н. С. Аникина²

¹*Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины
12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина*

²*Национальный институт виноградарства и виноделия «Магарач» УААН
31, ул. Кирова, Ялта, 98600, Украина
E-mail: z_erenko@ire.kharkov.ua*

Предложен метод измерения комплексной диэлектрической проницаемости для малого объема (порядка 1 мл) сильно поглощающей жидкости в миллиметровом диапазоне длин волн. Метод основан на использовании резонансной ячейки в виде цилиндрического резонатора с радиальной полостью, заполненной исследуемой жидкостью. Получено характеристическое уравнение, позволяющее с использованием экспериментальных данных (резонансной частоты и добротности) и комплексной диэлектрической проницаемости жидкости, принятой за стандартную, получить значение комплексной диэлектрической проницаемости измеряемой жидкости. Определены оптимальные размеры резонатора, спектральные параметры и рабочая мода колебаний для определения комплексной диэлектрической проницаемости сильно поглощающей жидкости, заполняющей радиальную полость резонансной ячейки. Данный метод использован для определения комплексной диэлектрической проницаемости различных образцов столовых вин. Получены и проанализированы коэффициенты парной корреляции комплексной диэлектрической проницаемости вина с его физико-химическими показателями. Ил. 6. Табл. 3. Библиогр.: 23 назв.

Ключевые слова: комплексная диэлектрическая проницаемость, сильно поглощающая жидкость, миллиметровый диапазон длин волн, цилиндрический резонатор, столовое вино.

Работа посвящена измерению комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) сильно поглощающей жидкости в диапазоне СВЧ с использованием резонаторного метода. Проблема измерения КДП сильно поглощающих жидкостей исследуется уже несколько десятилетий [1, 2] и остается актуальной, поскольку такие жидкости широко используются в различных областях науки и техники. В работе рассматриваются сильно поглощающие жидкости, у которых действительная и мнимая части КДП одного порядка и много больше единицы, например, вода и различные водные растворы. Известно, что максимальная частотная дисперсия воды наблюдается на СВЧ. Поэтому определение КДП сильно поглощающих жидкостей представляет наибольший интерес именно в СВЧ-диапазоне. По значению КДП можно изучать физические свойства жидкости и связь их с физико-химическими показателями растворенных в ней веществ.

Резонаторные методы измерения КДП применяются в основном для слабо поглощающих веществ [3, 4]. Эти методы, основанные, например, на использовании колебаний шепчущей галереи в диэлектрических резонаторах [5, 6], позволяют с достаточно высокой точностью определить диэлектрические свойства слабо поглощающих веществ. Для этого необходимо, во-первых, выполнить измерения резонансной частоты и добротности резонатора с необходимой точностью, и, во-вторых, получить характеристическое уравнение. Это становится возможным, если диэлектрический резонатор имеет осевую

или центральную симметрию (диск, шар) и на его границах можно удовлетворить однородным граничным условиям. Применяя это уравнение, зная параметры резонатора и сравнивая теоретические данные (резонансную частоту и добротность резонатора) с экспериментальными, можно вычислить КДП исследуемого вещества.

Следует отметить, что определить КДП таким же способом при условии использования резонаторов правильной формы с однородными граничными условиями возможно и для сильно поглощающих веществ [7–12]. Трудности в определении КДП сильно поглощающих жидкостей связаны с тем, что измеряемые параметры, резонансная частота и добротность зависят как от действительной, так и от мнимой части КДП. Такая задача успешно решается, если для измерений используется симметричный резонатор с однородными граничными условиями, для которого можно, также как и в случае слабо поглощающей жидкости, получить точное характеристическое уравнение.

Особый интерес представляют методы измерения КДП в малом объеме жидкости, поскольку такие методы находят многочисленные применения в различных областях науки и техники, где условие малого объема измеряемой жидкости является определяющим.

Одним из таких методов является метод, в котором измерение КДП производится с помощью заполненного измеряемой жидкостью капилляра, устанавливаемого в волноводном тракте [13]. Такой заполненный жидкостью ка-

пилляр в волноводе образует резонаторную систему, измеряя СВЧ-характеристики которой, можно определить КДП. Поскольку в этой системе отсутствует пространственная симметрия, получить для нее точное характеристическое уравнение довольно проблематично. Поэтому метод капилляра в волноводе пригоден лишь для относительных измерений КДП жидкости по сравнению с жидкостью, принятой за эталонную.

Нами разработан метод определения КДП в малом объеме сильно поглощающей жидкости в цилиндрическом объемном резонаторе с неоднородностью в виде радиальной полости с измеряемой жидкостью. Поскольку в цилиндрическом объемном резонаторе присутствуют элементы симметрии, то для него можно построить характеристическое уравнение и определить КДП с необходимой точностью.

1. Цилиндрический резонатор с радиальной полостью. Измерительная ячейка представляет собой круглый цилиндрический объемный резонатор с кольцевой радиальной полостью в его металлической стенке (рис. 1) (радиально-слоистый цилиндрический резонатор (РСЦР)). Резонатор состоит из цилиндрической полости (диаметр полости $2a = 5$ мм) в металлическом корпусе 1, в ней находится тefлоновый стержень 3 длиной $L = 28$ мм. На торцах резонатора имеются металлические диафрагмы 4 с отверстиями диаметром $b = 3$ мм в центре, предназначенные для связи со стандартными прямоугольными волноводами 5 8-мм диапазона. В корпусе 1 выполнена радиальная полость 2 диаметром $2R = 30$ мм, предназначенная для заполнения измеряемой сильно поглощающей жидкостью. Полость 2 расположена в плоскости симметрии резонатора, ее ширина $d = 1,0$ мм.

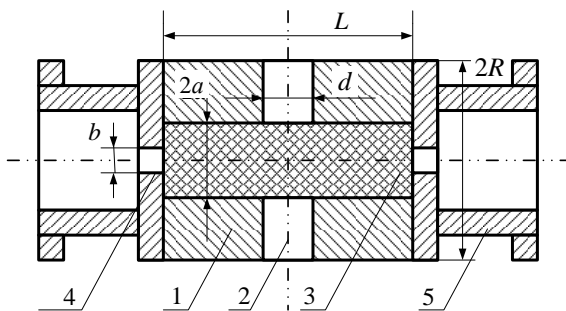


Рис. 1. Цилиндрический объемный резонатор с радиальной полостью: 1 – корпус резонатора; 2 – радиальная полость с сильно поглощающей жидкостью; 3 – диэлектрический стержень; 4 – металлическая диафрагма с отверстием; 5 – волновод

2. Характеристическое уравнение. Хорошо известна методика расчета диэлектрического резонатора в виде цилиндра, ограниченного на торцах идеально проводящими металлическими плоскостями [14], основанная на методе частич-

ных областей. Можно вывести характеристическое уравнение для радиально-слоистого диэлектрического цилиндрического резонатора, у которого радиальные слои имеют одинаковую высоту по аксиальной координате z [15]. В нашем случае имеется радиально-слоистый объемный резонатор с узкой радиальной полостью. Основная трудность при выводе характеристического уравнения для такого резонатора состоит в том, что цилиндр и радиальная полость различаются размерами по аксиальной координате, следовательно, имеют различные постоянные распространения в аксиальном направлении. А это приводит к неоднородным граничным условиям для различных радиальных слоев по аксиальной оси z . Известная методика расчета собственных частот цилиндрического резонатора, описанная, например, в работе [14], предполагает, что слои цилиндрического резонатора одинаковы по высоте, значит, имеют одинаковые постоянные распространения. Таким образом, основная трудность расчета нашей резонансной структуры – это неоднородные граничные условия для различных радиальных слоев.

Для получения характеристического уравнения для рассматриваемой резонансной ячейки будем предполагать следующее. В объемном резонаторе с внутренним диэлектрическим стержнем возбуждается основная TE -мода колебаний, которая «возмущается» неоднородностью, образованной узкой радиальной полостью с сильно поглощающей жидкостью. Можно предполагать, что при этом подходит методика расчета, основанная на теории возмущений. Однако теория возмущений в этом случае неприменима, так как не выполняется основное требование теории возмущений. А именно, параметры малой неоднородности не должны сильно отличаться от основных параметров среды в месте расположения неоднородности (относительное изменение КДП возмущающей среды по отношению к среде, заполняющей резонатор, по модулю должно быть много меньше единицы). В нашем случае, несмотря на то, что радиальная полость с сильно поглощающей жидкостью имеет малый объем, ее КДП сильно отличается от КДП металла, окружающего внутренний стержень резонатора.

Нами предложена следующая методика расчета КДП сильно поглощающей жидкости в радиальной полости резонатора с использованием экспериментальных данных по его резонансной частоте и добротности. Вместо исходной резонансной структуры мы рассматриваем ее модель, которая показана на рис. 2. Модельный резонатор имеет только одно отличие от исходного: его внутренний стержень имеет высоту, равную высоте радиальной полости с жидкостью. Для соответствия спектральных параметров исходной резо-

нансной структуры и ее модели введем величину эффективной КДП внутреннего стержня. Значение эффективной КДП стержня может быть определено с помощью экспериментально полученных значений резонансной частоты и добротности исходного резонатора и жидкости с заранее известной КДП в радиальной полости. Определив значение эффективной КДП стержня, зная резонансную частоту и добротность рабочего колебания и значение КДП известной (тестовой) жидкости, можно определить КДП измеряемой жидкости.

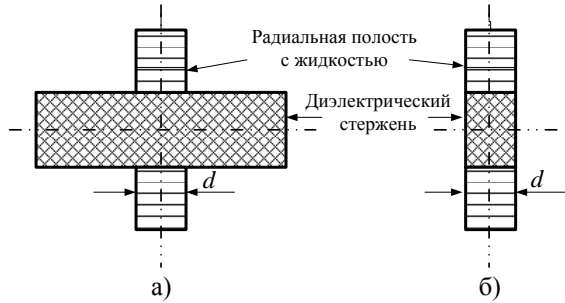


Рис. 2. Исследуемый РСЦР (а) и его модель (б) с одинаковым размером d по аксиальной оси

Для получения характеристического уравнения для модельного РСЦР используем уравнения Максвелла. При этом необходимо записать выражения для составляющих электрического и магнитного полей. Выразим составляющие электромагнитного поля через z -составляющие векторов Герца согласно [14]. В круглом диэлектрическом стержне в цилиндрических координатах (r, ϕ, z) , как известно, выражения для магнитных и электрических составляющих векторов Герца имеют следующий вид:

$$U_1^e = \sum_n A_n^e J_n(k_1 r) \cos(\beta) \exp(in\phi), \quad (1)$$

$$U_1^m = \sum_n A_n^m J_n(k_1 r) \sin(\beta) \exp(in\phi)$$

и в радиальной полости

$$U_2^e = \sum_n \left(\begin{matrix} B_n^e H_n^{(1)}(k_2 r) + \\ C_n^e H_n^{(2)}(k_2 r) \end{matrix} \right) \cos(\beta) \exp(in\phi), \quad (2)$$

$$U_2^m = \sum_n \left(\begin{matrix} B_n^m H_n^{(1)}(k_2 r) + \\ C_n^m H_n^{(2)}(k_2 r) \end{matrix} \right) \sin(\beta) \exp(in\phi),$$

где $\beta = k_z z$, $U_{1,2}^{e,m}$ – электрическая (e) и магнитная (m) составляющие векторов Герца по оси z во внутреннем стержне (1) и в радиальной полости (2); $k_1^2 = \varepsilon_1 k^2 - (k_z)^2$, $k_2^2 = \varepsilon_2 k^2 - (k_z)^2$ – поперечные волновые числа в стержне и радиальной полости; $\varepsilon_1 = \varepsilon_1' + i\varepsilon_1''$ и $\varepsilon_2 = \varepsilon_2' + i\varepsilon_2''$ – КДП стержня и полости, а k_z – продольное волновое

число в стержне и в полости; $J_n(k_1 r)$, $H_n^{(1)}(k_2 r)$ и $H_n^{(2)}(k_2 r)$ – функции Бесселя и Ханкеля первого и второго рода; n – порядок функций и азимутальный индекс колебаний. Зависимость от времени мы взяли в виде $\exp(-i\omega t)$, $\omega = \omega' - i\omega''$, причем $\omega' = 2\pi f'$ и $\omega'' = 2\pi f''/Q$, f – резонансная частота рабочего колебания, Q – его добротность.

Полагаем, что также как и в исходном «невозмущенном» резонаторе, во внутреннем стержне модельного резонатора присутствует основная мода TE -колебаний ($n = 1$). А в радиальном слое с сильно поглощающей жидкостью имеются все возможные моды колебаний из-за неоднородности электромагнитного поля, обусловленной «возмущающим» действием радиальной полости на колебания в стержне. Следует отметить, что мы пренебрегаем потерями в металлических стенках резонатора, так как они много меньше, чем потери в сильно поглощающей жидкости.

Составляющие электрического и магнитного полей имеют вид [14]

$$E_r = \frac{\partial^2 U^e}{\partial r \partial z} + \frac{ik\mu}{r} \frac{\partial U^m}{\partial \phi};$$

$$H_r = \frac{\partial^2 U^m}{\partial r \partial z} - \frac{ik\varepsilon}{r} \frac{\partial U^e}{\partial \phi};$$

$$E_\phi = \frac{\partial^2 U^e}{r \partial \phi \partial z} - ik\mu \frac{\partial U^m}{\partial r};$$

$$H_\phi = \frac{\partial^2 U^m}{r \partial \phi \partial z} + ik\varepsilon \frac{\partial U^e}{\partial r};$$

$$E_z = \left(\frac{\partial^2}{\partial z^2} + k^2 \varepsilon \mu \right) U^e;$$

$$H_z = \left(\frac{\partial^2}{\partial z^2} + k^2 \varepsilon \mu \right) U^m, \quad (3)$$

где $k = \omega/c$ – волновое число и c – скорость света в свободном пространстве.

Используя граничные условия на металлических торцах стержня и радиальной полости по оси z ($E_z = 0$), определяем продольное волновое число в стержне и радиальной полости $k_z = q\pi/d$, где q – количество вариаций поля, соответственно, в стержне и в полости вдоль координаты z . Для получения характеристического уравнения приравняем тангенциальные компоненты составляющих электрического и магнитного полей на поверхности стержня ($r = a$) и на внешней границе радиальной полости ($r = R$). В результате получаем линейную систему уравнений. Приравнивая детерминант этой системы нулю,

приходим к характеристическому уравнению в виде

$$\sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} x_{11n} x_{22m} - x_{21n} x_{12m} = 0, \quad (4)$$

где

$$\begin{aligned} x_{11j} &= d_{12j} d_{31j} - d_{11j} d_{32j}; \\ x_{12j} &= d_{13j} d_{31j} - d_{11j} d_{33j}; \\ x_{21j} &= d_{22j} d_{31j} - d_{21j} d_{32j}; \\ x_{22j} &= d_{23j} d_{31j} - d_{21j} d_{33j}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} d_{11j} &= a_{11j} a_{54j} a_{33j} - a_{11j} a_{34j} a_{53j} - a_{54j} a_{13j} a_{311} + \\ &+ a_{14j} a_{53j} a_{31j}; \\ d_{12j} &= a_{15j} a_{311} - a_{12j} a_{45j}; \\ d_{13j} &= a_{16j} a_{311} - a_{12j} a_{46j}; \\ d_{21j} &= a_{21j} a_{54j} a_{33j} - a_{21j} a_{34j} a_{53j} - a_{54j} a_{23j} a_{311} + \\ &+ a_{24j} a_{53j} a_{31j}; \\ d_{22j} &= a_{25j} a_{311} - a_{22j} a_{45j}; \\ d_{23j} &= a_{26j} a_{311} - a_{22j} a_{46j}; \\ d_{31j} &= a_{64j} a_{53j} - a_{54j} a_{63j}; \\ d_{32j} &= a_{65j}; \quad d_{33j} = a_{66j}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a_{111} &= -ink_z / aJ_1(k_1 a); \\ a_{121} &= -ik_1 k J_1'(k_1 a); \\ a_{13j} &= ink_z / aH_j^{(1)}(k_2 a); \\ a_{14j} &= ink_z / aH_j^{(2)}(k_2 a); \\ a_{15j} &= ikk_2 H_j^{(1)'}(k_2 a); \\ a_{16j} &= ikk_2 H_j^{(2)'}(k_2 a); \\ a_{211} &= -a_{121} \epsilon_1; \quad a_{221} = -a_{111}; \quad a_{23j} = -a_{15j} \epsilon_2; \\ a_{24j} &= -a_{16j}; \quad a_{25j} = -a_{15j}; \quad a_{26j} = -a_{14j}; \\ a_{311} &= J_1(k_1 a) k_1^2; \quad a_{33j} = -H_j^{(1)}(k_2 a) k_2^2; \\ a_{34j} &= -H_j^{(2)}(k_2 a) k_2^2; \quad a_{42j} = a_{31j}; \quad a_{45j} = a_{33j}; \\ a_{46j} &= a_{34j}; \quad a_{53j} = H_j^{(1)}(k_2 R) k_2^2; \\ a_{54j} &= H_j^{(2)}(k_2 R) k_2^2; \quad a_{63j} = -ink_z / RH_j^{(1)}(k_2 R); \\ a_{64j} &= -ink_z / RH_j^{(2)}(k_2 R); \quad a_{65j} = -ikk_z H_j^{(1)'}(k_2 R); \\ a_{66j} &= -ikk_z H_j^{(2)'}(k_2 R); \quad j = 1 \dots n(m). \end{aligned}$$

3. Методика эксперимента. В диапазоне частот 26–37,5 ГГц были проведены измерения спектра РСЦР, в котором радиальная полость была как пустой, так и заполненной сильно поглощающей жидкостью. Возбуждение электромагнитных колебаний в резонаторе осуществля-

лось с помощью стандартного прямоугольного волновода с поперечным сечением $7,2 \times 3,4$ мм² через отверстие в диафрагме диаметром 1,6 мм. Измерение спектра производилось в режиме «на проход» с помощью панорамного измерителя Р2-65. Прибор был сопряжен с персональным компьютером. Частота лампы обратной волны (ЛОВ) измерялась по напряжению на сетке лампы, а амплитуда колебаний – по отношению уровней напряжений квадратичных направленных детекторов из комплекта панорамного измерителя, установленных на входе и выходе резонатора. На рис. 3 представлена запись спектра РСЦР с незаполненной радиальной полостью. В заданном диапазоне частот возбуждалось три типа колебаний TE_{11q} , где q – число вариаций поля вдоль аксиальной оси резонатора ($q = 5, 6, 7$, рис. 3). Спектр был идентифицирован с помощью приближенного характеристического уравнения для объемного резонатора с TE -колебаниями без учета радиальной полости ($J_n'(k_1 a) = 0$). Измерения проводились при температуре 23 °С.

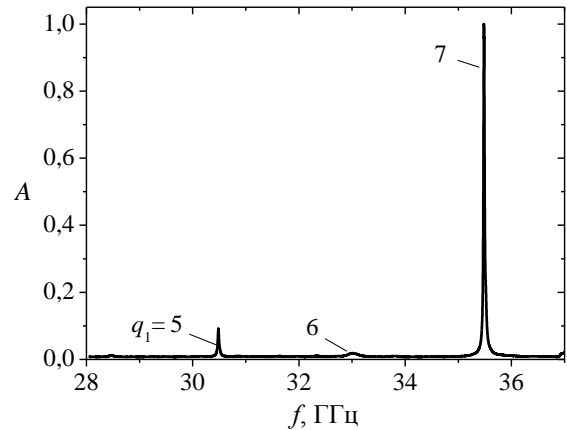


Рис. 3. Частотный спектр РСЦР в миллиметровом диапазоне с пустой радиальной полостью, по оси ординат отложена нормированная амплитуда

Радиальная полость в боковой стенке резонатора была выполнена симметрично относительно торцов резонатора. Поэтому использовались нечетные типы колебаний, для которых один из максимумов электрического поля находится в месте расположения полости. Четные типы колебаний, у которых на место, где расположена полость, приходится минимум, не возбуждались. Поэтому в качестве рабочего типа колебаний измерительной ячейки выбран был выбран TE_{117} -тип колебаний.

Полагая резонансную частоту и добротность модельного резонатора равными значениям, полученным из эксперимента, и решая характеристическое уравнение (4) для модельного

резонатора, можно найти КДП исследуемой жидкости. Эквивалентность резонаторов обеспечивается расчетом эффективной КДП ε_1 диэлектрического стержня модельного резонатора по измеренным резонансной частоте f и добротности Q РСЦР, заполненного стандартной жидкостью с известной КДП. Методическая погрешность, связанная как с переходом к модельному резонатору, так и собственно вычислениями КДП исследуемой жидкости, напрямую зависит от близости значений КДП исследуемой и стандартной жидкостей.

В качестве измеряемых сильно поглощающих жидкостей были взяты несколько сортов белых столовых вин. Известно, что КДП столовых вин в микроволновом диапазоне в первом приближении определяется КДП водно-спиртового раствора, составляющего основу химического состава вина. По этой причине в качестве стандартной жидкости при измерениях КДП вин был взят водный раствор этанола с концентрацией, равной концентрации этанола в исследуемом вине. Поскольку водно-спиртовые растворы требуемой концентрации могут быть сравнительно просто получены в лабораторных условиях, то можно определить зависящую от концентрации спирта КДП диэлектрического стержня модельного резонатора, необходимую для расчетов КДП исследуемых вин. Результаты измерений резонансной частоты и добротности при заполнении радиальной полости водно-спиртовыми растворами различной концентрации приведены на рис. 4.

Для определения эффективной КДП диэлектрического стержня модельного резонатора необходимо иметь значения резонансной частоты и добротности при различной концентрации водно-спиртового раствора. Для этого мы провели аппроксимацию полиномами экспериментальных зависимостей значений резонансной частоты и добротности РСЦР от концентрации водно-спиртового раствора (рис. 4). Аппроксимирующий полином для зависимости резонансной частоты:

$$f = 35,41995 - 6,36716 \cdot 10^{-4} \cdot p + 7,3043 \cdot 10^{-6} \cdot p^2 + 1,09366 \cdot 10^{-9} \cdot p^3 - 1,20897 \cdot 10^{-10} \cdot p^4 \quad (5, a)$$

и для зависимости добротности:

$$Q = 447,27224 + 4,29145 \cdot p - 0,05882 \cdot p^2 + 9,29632 \cdot 10^{-4} \cdot p^3 - 3,63725 \cdot 10^{-6} \cdot p^4, \quad (5, б)$$

где p обозначает концентрацию спирта в воде в процентах.

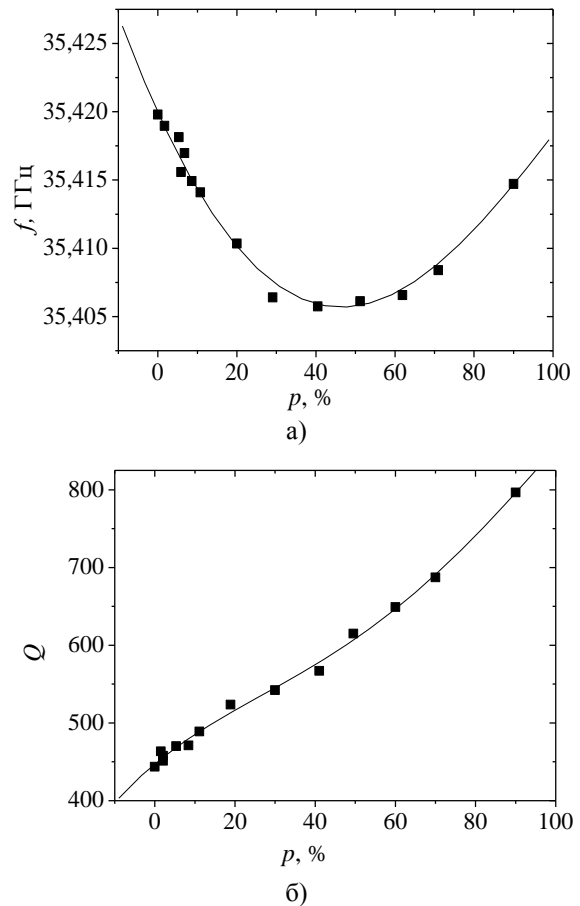


Рис. 4. Зависимость резонансной частоты f РСЦР (а) и добротности Q (б) от концентрации водно-спиртового раствора p , заполняющего радиальную полость резонатора

Также для определения эффективной КДП стержня необходимо знать величину КДП водно-спиртового раствора, заполняющего радиальную полость. Эти значения были получены с помощью данных из работы [16] и представлены на рис. 5 для средней резонансной частоты 35,41 ГГц в диапазоне изменений частот (рис. 4) и температуры 23 °С. При расчете зависимостей, показанных на рис. 4, использовалась известная формула Дебая [16] для ряда мольных долей этанола в воде.

Было установлено, что для вычисления эффективной КДП внутреннего стержня модельного резонатора с помощью характеристического уравнения по формуле (4) можно ограничить бесконечный ряд по азимутальному индексу $n(m)$ до 30 членов ряда. При этом результаты вычислений КДП оказываются устойчивыми в диапазоне $n(m) = 25-30$, а погрешность не превышает 0,01.

Эффективная КДП внутреннего стержня модельного резонатора была определена при количестве вариаций поля $q=1$ по оси z , внешнем радиусе радиальной щели $R=2$ см, длине модельного резонатора $d=1$ мм и представлена на рис. 6.

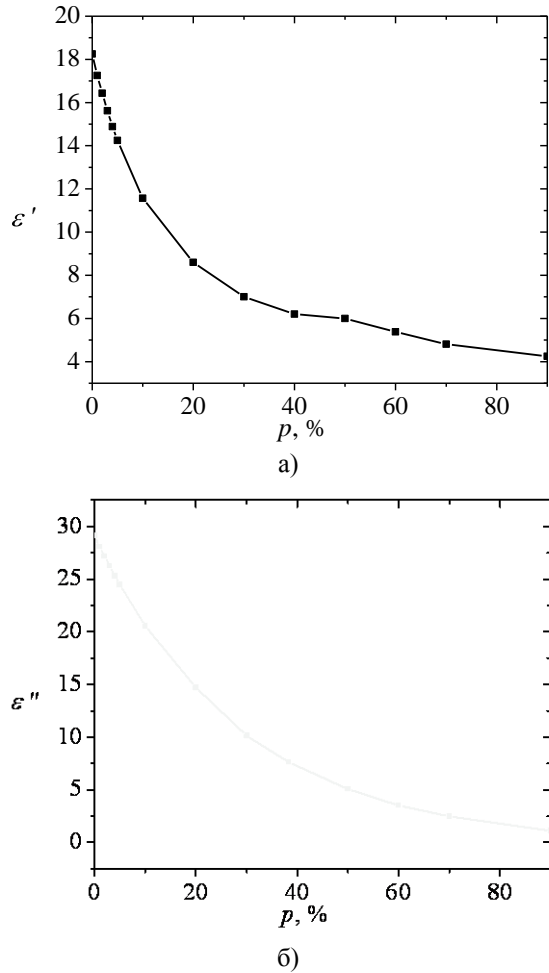


Рис. 5. Зависимость действительной ε' (а) и мнимой ε'' (б) частей КДП водно-спиртового раствора, заполняющего радиальную полость РСЦР, от концентрации p раствора [16]

Для определения КДП исследуемой жидкости необходимо знать эффективную КДП стержня для произвольной концентрации водно-спиртового раствора. При этом полученная аппроксимация полиномами зависимостей на рис. 6 имеет вид

$$\varepsilon'_1 = 17,94753 - 0,0608 \cdot p + 0,00222 \cdot p^2 - 4,30968 \cdot 10^{-5} \cdot p^3 + 4,11965 \cdot 10^{-7} \cdot p^4 - 1,52293 \cdot 10^{-9} \cdot p^5, \quad (6, а)$$

$$\varepsilon''_1 = 1,8966 - 0,06023 \cdot p + 8,7996 \cdot 10^{-4} \cdot p^2 - 6,54354 \cdot 10^{-6} \cdot p^3 + 1,94797 \cdot 10^{-8} \cdot p^4. \quad (6, б)$$

4. Определение КДП столовых вин.

Описанный метод был использован для изучения связи между КДП и физико-химическими показателями белых столовых вин (табл. 1) в связи с выполнением проекта УНТЦ № 3870. Столовые вина выбраны из следующих соображений. Вино – это сильно поглощающая жидкость, в состав кото-

рой входит, в основном, вода и этиловый спирт с малым количеством различных минеральных и органических веществ. Поэтому водно-спиртовые растворы хорошо подходят в качестве тестовой жидкости для определения КДП вина.

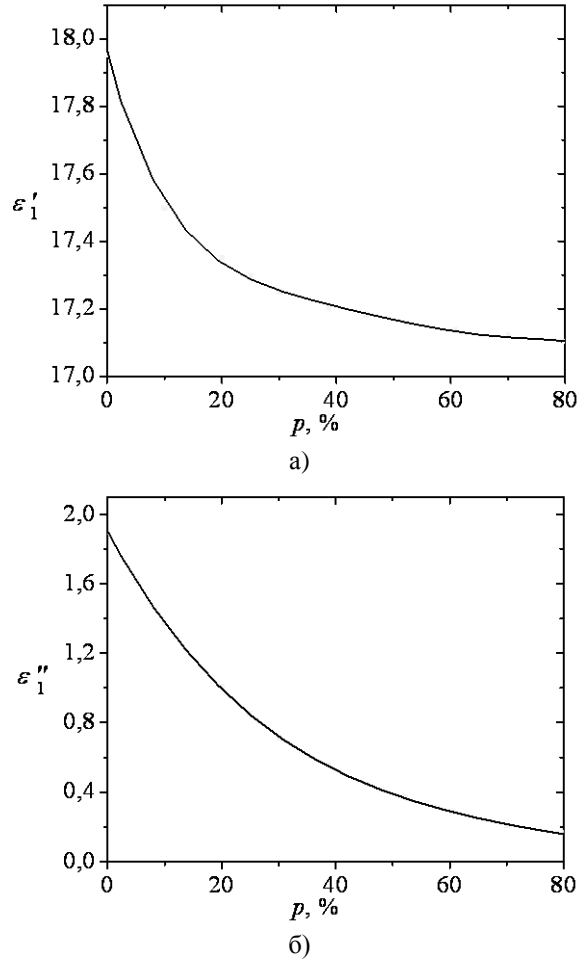


Рис. 6. Зависимость действительной ε' (а) и мнимой ε'' (б) частей эффективной КДП внутреннего стержня модельного резонатора от концентрации p водно-спиртового раствора, заполняющего радиальную полость

Натуральные белые столовые виноградные вина были приготовлены в сезон виноделия 2007 г. на базе ЗАО им. С. Перовской (г. Севастополь) из винограда сортов Шардоне, Алиготе, Рислинг рейнский и Ркацители, относящихся соответственно к сортам раннего, среднего и позднего сроков созревания. Для приготовления вин использовали сушло-самотек, взятое сразу после поступления винограда на линию переработки. Брожение сушла проводили после внесения сернистой кислоты в концентрации 75 мг/дм^3 и чистой культуры дрожжей расы 47к из Национальной коллекции микроорганизмов НИВиВ «Магарач». В полученных после брожения винах проводилось определение регламентируемых нормативной документацией [17, 18] и дополнитель-

ных показателей физико-химического состава по стандартизированным методикам измерений [19]. Качественный и количественный состав органических кислот определялся методом высокоэффективной жидкостной хроматографии на хроматографе *Shimadzu* [20]. Массовую концентрацию неорганических катионов определяли на атомно-абсорбционном спектрофотометре С115-М1 [19].

Величина КДП вина может быть использована в качестве показателя для экспресс-метода идентификации вина, то есть соответствие КДП известного образца вина с исследуемым образцом. В качестве начального приближения при определении КДП вина использовалось значение эффективной КДП внутреннего стержня модельного резонатора (6), которое было вычислено для соответствующей (известной априори для данного вина) концентрации спирта в вине. В табл. 1 для каждого образца представлены измеренные

значения резонансной частоты f и нагруженной добротности Q РСЦР, а также вычисленные по этим данным величины действительной ε'_2 и мнимой ε''_2 частей КДП образцов вин. В соответствии с предложенной процедурой в качестве нулевого приближения использовались КДП водно-спиртовых растворов, которые также приведены в табл. 1. Разность КДП вина и КДП соответствующего водно-спиртового раствора $\Delta\varepsilon_2 = \Delta\varepsilon'_2 + i\Delta\varepsilon''_2$, представленная в табл. 1, показывает по существу, на сколько изменяется КДП водно-спиртового раствора, если в него добавить все другие компоненты, содержащиеся в вине. Усредненные по образцам вин отклонения КДП составили для $\Delta\varepsilon'_2 = 0,54$ и для $\Delta\varepsilon''_2 = -0,19$, или в процентах: 4,9 % по ε'_2 и 1 % по ε''_2 соответственно.

Таблица 1

Экспериментально измеренные резонансная частота и добротность РСЦР и КДП для нескольких образцов натуральных белых столовых вин

№	Образец вина	Процент спирта в вине	f , ГГц	Q	ε'_2 вина	ε''_2 вина	ε'_2 водно-спиртового раствора	ε''_2 водно-спиртового раствора	$\Delta\varepsilon'_2$ (вино – водно-спиртовой раствор)	$\Delta\varepsilon''_2$ (вино – водно-спиртовой раствор)
1	«Алиготе 14 –15.09.07»	12,4	35,445	421	10,76	19,097	10,27	19,27	0,485	-0,173
2	«Рислинг 12 –13.09.07»	12,3	35,453	416	10,92	19,146	10,31	19,35	0,607	-0,204
3	«Рислинг 19 –20.09.07»	12,7	35,451	415	10,74	18,875	10,16	19,08	0,577	-0,205
4	«Рислинг 20 –21.09.07»	12,7	35,449	418	10,72	18,887	10,16	19,08	0,559	-0,193
5	«Ркацителли 27–28.09.07»	11,1	35,447	420	11,29	19,96	10,77	20,14	0,52	-0,18
6	«Шардоне 07 –08.09.07»	13,2	35,443	420	10,45	18,575	9,98	18,76	0,47	-0,185

5. Оценка погрешности определения КДП вина. Измерение нагруженной добротности проводилось динамическим методом по полуширине резонансной кривой (амплитудно-частотной характеристики резонатора). Погрешность таких измерений зависит как от погрешности измерения полосы пропускания, так и от погрешности определения уровня (-3 дБ) относительно резонансного коэффициента передачи. В нашем случае измерение ширины резонансной кривой проводилось по известной крутизне частотной перестройки ЛОВ, которая была измерена с использованием электронно-счетного частотомера в процессе эксплуатации панорамного измерителя Р2-65. Связанная с измерением частоты погрешность определения добротностей величиной до 10^3 не превышала

0,5 %. Погрешность измерения добротности, связанная с измерением уровня -3 дБ, была существенно выше, однако не превышала 5 %.

Относительная погрешность измерения абсолютных значений резонансных частот зависит от дрейфа частоты ЛОВ и после прогрева прибора не превышала 10^{-2} %. Использование эталонного цилиндрического резонатора, установленного в измерительном тракте по схеме режекторного фильтра, позволяет уменьшить эту погрешность до 10^{-3} %.

Проведена оценка погрешности определения КДП вина, которая зависит от многих факторов:

– неточность изготовления элементов резонансной структуры;

- погрешность измерений частоты и добротности рабочего колебания;
- неточность определения концентрации водно-спиртовых растворов;
- погрешность определения содержания спирта в исследуемом образце вина.

Так как погрешности при определении концентрации спирта в водно-спиртовом растворе и в вине непосредственно не зависят от выбранного способа измерения, то рассмотрим влияние инструментальной погрешности измерительного прибора на определение КДП.

Источником погрешности косвенных измерений КДП являются рассмотренные выше погрешности измерения добротности (δQ) и резонансной частоты (δf). Оценка погрешности производилась по известной формуле

$$\Delta F = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\Delta x_i \frac{\partial F}{\partial x_i} \right)^2}, \text{ где } F = F(x_1, x_2, \dots, x_n); x_i - \text{не}$$

посредственно измеряемые независимые величины, имеющие погрешность Δx_i . $F = \Delta \varepsilon_2'(\Delta \varepsilon_2'')$. Эти погрешности связаны между собой через частные производные $\partial \varepsilon_2' / \partial f$, $\partial \varepsilon_2' / \partial Q$, $\partial \varepsilon_2'' / \partial f$ и $\partial \varepsilon_2'' / \partial Q$. Определялось среднее значение изменения действительной и мнимой частей КДП вина (для образца «Алиготе 14–15.09.07») на нескольких малых частотных интервалах (порядка единиц мегагерц от 35,442 до 35,445 ГГц). Оно составляло $\Delta \varepsilon_2' / \Delta f = 15 \text{ МГц}^{-1}$, $|\Delta \varepsilon_2'' / \Delta f| = 0,1 \text{ МГц}^{-1}$, и соответственно, на малых интервалах добротностей (от 400 до 420) составляло $\Delta \varepsilon_2'' / \Delta Q = 0,003$. Следует отметить, что при малом изменении частоты сильно изменяется действительная часть КДП, а при малом изменении добротности – только мнимая часть КДП. Погрешность измерения частоты с помощью Р2-65 составляла $\Delta f = 3 \text{ МГц}$ с учетом предварительной калибровки частотомером ЧЗ-66 и для добротности – 5%. Добротность определялась с помощью анализа резонансной кривой на компьютере. В итоге были получены значения погрешности КДП измеряемой жидкости $\Delta \varepsilon_2' = 0,045$, $\Delta \varepsilon_2'' = 0,075$, что составляет величину 0,4%. Таким образом, установлено, что КДП столовых вин на единицы процентов отличается от КДП водно-спиртовых растворов с равными количествами этанола.

Помимо погрешности, связанной с процедурой измерений, присутствует методическая погрешность, связанная с определением эффективной КДП стержня. Она обусловлена точностью определения содержания спирта тестового водно-спиртового раствора, а также резонансной частоты и добротности резонатора. Установлено, что при погрешности определения процента

спирта в вине на 1% относительная ошибка определения действительной части КДП вина составляет 4%, а мнимой части КДП – 7%. Таким образом, точность определения КДП сильно поглощающей жидкости в основном зависит от точности определения содержания спирта тестового водно-спиртового раствора и в исследуемом образце вина. Относительная погрешность определения содержания спирта тестового водно-спиртового раствора и в исследуемых образцах вин составляла не более 0,5%.

6. Анализ коэффициента парной корреляции КДП столовых вин с физико-химическими показателями. Был проведен анализ коэффициента парной корреляции [21] этой поправки ($\Delta \varepsilon_2'$ и $\Delta \varepsilon_2''$) с основными физико-химическими показателями натуральных белых столовых вин. Коэффициент парной корреляции между двумя переменными измерений, когда для каждой переменной измерение наблюдается для каждого субъекта N . Коэффициент корреляции характеризует область, в которой два измерения «изменяются вместе». Коэффициент масштабируется таким образом, что его значение не зависит от единиц, в которых выражены переменные двух измерений. Любое значение коэффициента корреляции находится в диапазоне от -1 до $+1$ включительно. Корреляционный анализ дает возможность установить, ассоциированы ли наборы данных по величине, то есть большие значения из одного набора данных связаны с большими значениями другого набора (положительная корреляция), или, наоборот, малые значения одного набора связаны с большими значениями другого (отрицательная корреляция), или данные двух диапазонов никак не связаны (нулевая корреляция).

В табл. 2 приведены только те показатели, у которых парная корреляция с КДП по $\Delta \varepsilon_2'$ или по $\Delta \varepsilon_2''$ больше 0,5 по модулю. На основании этих данных можно сделать вывод, что значения $\Delta \varepsilon_2'$ достаточно сильно коррелируют с такими показателями, как массовая концентрация сахаров, титруемых кислот, винной кислоты, лимонной кислоты, кальция, рН, и также с буферной емкостью. А $\Delta \varepsilon_2''$ сильно коррелирует с такими показателями, как приведенный экстракт, массовая концентрация глицерина, титруемых кислот, кальция, рН, и с буферной емкостью.

Показатели, коррелирующие с $\Delta \varepsilon_2'$, разбиваются на две группы по знаку коэффициента парной корреляции. Группа с положительной корреляцией объединяет (в порядке убывания коэффициента парной корреляции) массовую концентрацию кальция, буферную емкость, массовые концентрации титруемых, винной и ли-

монной кислот. В группу с отрицательной корреляцией попадают такие показатели, как массовая концентрация молочной кислоты, рН, массовые концентрации сахаров и калия.

Соотношение составных компонентов в приведенном экстракте обсуждалось авторами работы [17]. В процентах к общему количеству экстрактивных веществ (без восстанавливающих сахаров) содержание органических кислот в приведенном экстракте составляет 32 %, углеводов – 22 %, многоатомных спиртов, среди которых преобладает глицерин, – 20 %, минеральных и фенольных веществ – по 10 %, азотистых – 6 %. Органические кислоты и катионы калия, кальция и магния находятся в вине как в свободном, так и в связанном состоянии в виде кислых и средних солей. В результате чего в вине устанавливается буферная система из свободной кислоты (обычно винной, как наиболее диссоциированной) и ее кислых солей, в связи с чем показатель «буферная емкость» напрямую связан с качественным и количественным составом органических кислот вина. Таким образом, максимальные значения коэффициентов парной корреляции с $\Delta\varepsilon'_2$ имеют показатели, преобладающие в экстракте вина (титруемые кислоты, калий, кальций, остаточные сахара) и формирующие его кислотно-основные свойства.

Показатели, максимально коррелирующие с $\Delta\varepsilon''_2$, не дифференцируются по знаку коэффициента корреляции, но тоже разбиваются на две группы. Кроме массовых концентраций кальция, титруемых кислот и буферной емкости, тесно связанных с величиной $\Delta\varepsilon'_2$ (табл. 2), выделяются три новых показателя – содержание в вине приведенного экстракта, глицерина и магния, которые не обнаружили существенной корреляции с величиной $\Delta\varepsilon'_2$. Последние два показателя также относятся к группам веществ, преобладающих в экстракте, и вопрос об их избирательной корреляции с действительной и мнимой частями КДП требует дальнейшего более подробного исследования.

В табл. 3 представлены результаты определения значения коэффициента парной корреляции между полученными значениями КДП вин и физико-химическими показателями натуральных белых столовых вин. Приведены только те показатели, у которых коэффициент парной корреляции больше 0,8 по модулю.

Из представленных данных следует, что КДП сильно коррелирует с такими показателями, как объемная доля этилового спирта, массовая концентрация сахаров, общего экстракта, глицерина, яблочной и янтарной кислоты, которые являются значимыми показателями в оценке качества вин [18].

Таблица 2

Коэффициент парной корреляции между значениями $\Delta\varepsilon'_2$ и $\Delta\varepsilon''_2$ (вино – водно-спиртовой раствор) и физико-химическими показателями натуральных белых столовых вин

Показатели	$\Delta\varepsilon_2$	
	$\Delta\varepsilon'_2$	$\Delta\varepsilon''_2$
Массовая концентрация: сахаров	-0,65	0,36
Экстракт приведенный	0,28	-0,69
Массовая концентрация: глицерина	0,25	-0,59
Удельная электропроводность	-0,24	0,36
Титруемые кислоты	0,73	-0,54
Винная кислота	0,67	-0,40
Молочная кислота	-0,68	0,27
Лимонная кислота	0,67	-0,44
рН	-0,68	-0,35
Буферная емкость	0,81	-0,62
Калий	-0,62	0,44
Кальций	0,91	0,63
Магний	0,24	-0,52

Таблица 3

Коэффициент парной корреляции между КДП полученных натуральных белых столовых вин и их физико-химическими показателями

Показатели	ε_2	
	ε'_2	ε''_2
Основные		
Объемная доля этилового спирта	-0,98	-1,0
Массовая концентрация: сахаров	-0,88	-0,77
общего экстракта	-0,98	-0,92
Дополнительные		
Массовая концентрация: глицерина	-0,84	-0,93
яблочной кислоты	0,80	0,80
янтарной кислоты	-0,89	-0,92
Удельная электропроводность	0,72	0,80
Кинематическая вязкость	-0,97	-0,94

Так, первые два показателя в табл. 3 (объемная доля этилового спирта, массовая концентрация сахаров) применяются в сертификационных испытаниях для идентификации готовой продукции. Столовые марочные и сортовые вина имеют крепость не ниже 10 %. Глицерин и янтарная кислота относятся к группе вторичных про-

дуктов спиртового брожения, образующихся из сахаров и играющих важную роль в формировании аромата и вкуса вина. Глицерин придает вину ощущение сладости, мягкости, бархатистости во вкусе. Янтарная кислота вносит солоновато-горькие оттенки. Яблочная кислота переходит в вино из винограда и дает кислый вкус [22]. Из физических показателей максимальная корреляция имеет место с кинематической вязкостью, что согласуется с существующими представлениями о том, что механизмы вязкости и диэлектрической релаксации близки по энергии активации [23].

Коэффициенты парной корреляции КДП и рН вина, а также массовых концентраций веществ, содержащихся в нем в незначительном количестве (менее 1 г/л), имеют значения менее 0,5. Этанол и глицерин, присутствующие в вине в преобладающих над всеми другими компонентами концентрациях, уменьшают величину КДП (отрицательная корреляция), так как модуль их комплексной диэлектрической проницаемости меньше, чем у воды. Отрицательный коэффициент парной корреляции КДП и сахаров, присутствующих в вине в виде глюкозы и фруктозы, связан, вероятно, с увеличением за их счет доли неводного компонента (сухого остатка), имеющего более низкую величину модуля диэлектрической проницаемости. То же можно сказать о янтарной кислоте, хотя ее присутствие в вине в небольших концентрациях (порядка 1 г/л) не должно оказывать значительного влияния на КДП и эффект может быть опосредован влиянием этанола, так как и этанол, и янтарная кислота образуются в процессе брожения. Также этот эффект может быть объяснен повышенной концентрацией янтарной кислоты, которой соответствует повышенная концентрация этанола. Такое же опосредованное, только в данном случае не связанное с брожением влияние может давать наблюдаемую положительную парную корреляцию КДП с массовой концентрацией в вине яблочной кислоты, которая переходит в вино из винограда, поскольку ее уровень обратно пропорционален степени зрелости последнего. Повышенные значения концентрации яблочной кислоты в винограде связаны с пониженным накоплением сахаров, в результате чего количество образующегося при брожении этанола меньше (а КДП, соответственно, больше) в тех образцах, где меньше исходного сахара и больше яблочной кислоты, которая практически полностью переходит в готовое вино.

Положительная корреляция КДП и удельной электропроводности опосредована величиной вязкости вина, которая определяется, по видимому, доминирующими компонентами – этанолом и глицерином. Увеличение вязкости

затрудняет движение ионов в электрическом поле, поэтому с увеличением вязкости электропроводность уменьшается.

Выводы. Создан метод определения комплексной диэлектрической проницаемости сильно поглощающей жидкости в малом объеме с помощью цилиндрического объемного резонатора миллиметрового диапазона с кольцевой радиальной полостью, заполняемой измеряемой жидкостью. Разработан алгоритм получения характеристического уравнения для такого резонатора с сильно поглощающей неоднородностью (измеряемая жидкость) путем определения параметров модельного слоистого цилиндрического резонатора.

Преимущества данного метода:

- разреженный спектр колебаний резонатора;
- добротность рабочего резонанса в случае заполнения сильно поглощающей жидкостью радиальной полости достаточно высока (порядка 400);
- малый объем измеряемой жидкости (порядка 1 мл).

Решена задача определения КДП жидкости по экспериментальным значениям резонансной частоты и добротности резонатора. Описанная измерительная резонансная структура дает возможность определить относительно малые концентрации водных растворов спирта путем определения КДП раствора. Проведен анализ парной корреляции между КДП натуральных образцов белых столовых вин и их физико-химическими показателями. Максимальная корреляция наблюдается между величиной КДП и количеством этилового спирта, общего экстракта в вине, а также для кинематической вязкости.

Метод можно использовать для определения диэлектрических характеристик и других сильно поглощающих жидкостей, в частности, для идентификации столовых вин с целью выявления фальсификации винопродукции. Величина КДП вина может быть использована в качестве показателя для экспресс-метода идентификации вина.

Работа была частично поддержана Украинским научно-технологическим центром (УНТЦ), проект № 3870.

Благодарим Ю. В. Тарасова за полезные замечания при обсуждении вариантов расчета резонансной структуры, а также Р. И. Белоус за помощь в определении физических характеристик диэлектриков.

1. *Брандт А. А.* Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах. – М.: Физматгиз, 1963. – 404 с.
2. *Ellison W. J., Lamkaourchi K. Moreau M. J.* Water: A dielectric Reference // *Journal of Molecular Liquids.* – 1996. – 68. – P. 171–279.
3. *Kaatze U., Pottel R., Wallush A.* A new automated waveguide system for the precise measurement of complex permittivity of low-to-high-loss liquids at microwave frequencies // *Meas. Sci. Technol.* – 1995. – 6. – P. 1201–1207.

4. Krupka J. Frequency domain complex permittivity measurements at microwave frequencies // Meas. Sci. Tech. – 2006. – 17, No. 6. – R55–R70.
5. Krupka J., Derzakowski K., Abramowicz A. et al. Use of Whispering-Gallery Modes for Complex Permittivity Determinations of Ultra-Low-Loss Dielectric Materials // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. – 1999. – 47, No. 6. – P. 752–759.
6. Ganapolskii E. M., Golik A. V. A Sapphire sphere resonator for the measurement of low dielectric losses in the millimetre-wave range in liquids // Meas. Sci. Technol. – 1997. – 8. – P. 1016–1022.
7. Еременко З. Е., Каптур В. А. Диэлектрические измерения сильно поглощающих жидкостей в миллиметровом диапазоне длин волн // Биофизический Вестник ХНУ. – 2007. – вып. 19(2). – С. 122–136.
8. Filipov Yu. F., Kharkovskii S. N., Kirichenko A. Ya. Whispering gallery modes of uniform dielectric resonators // Microwave and optical technology letters. – 1995. – 10. – P. 124–129.
9. Eremenko Z. E., Ganapolskii E. M., Vasilchenko V. V. Exact-calculated Resonator Method for Permittivity Measurement of High Loss Liquids at Millimeter Wavelength // Measurement Science and Technology, UK. – 2005. – 16. – P. 1619–1627.
10. Eremenko Z. E. A study of the E-field dependence of resonant modes of a layered semi-ball immersed in lossy liquid // Meas. Sci. Technol. – 2007. – 18. – P. 3303–3308.
11. Barannik A. A., Cherpak N. T., Prokopenko Yu. V. et al. Two-layered disc quasi-optical dielectric resonators: electrodynamic and application perspectives for complex permittivity measurements of lossy liquids // Meas. Sci. Technol. – 2007. – 18. – P. 2231–2238.
12. Мериакри В. В., Пархоменко М. П. Применение диэлектрического волновода для контроля содержания воды в спирте // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2000. – 5, № 1. – С. 38–40.
13. Masaki Kouzai. Complex Permittivity Measurement at Millimetre-Wave Frequencies During Fermentation Process of Japanese Sake // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2007. – 40. – P. 54–60.
14. Вайнштейн Л. А. Электромагнитные волны. – М.: Сов. радио, 1957. – 572 с.
15. Еременко З. Е., Филиппов Ю. Ф., Харьковский С. Н. Открытые слоистые диэлектрические резонаторы с азимутальными колебаниями // Докл. АН УССР. – 1991. – № 3. – С. 62–65.
16. Mashimo S., Yagihara S. The dielectric relaxation of mixtures of water and primary alcohol // Journal Chem. Phys. – 1989. – 90, No. 6. – P. 3292–3294.
17. Кишковский З. Н., Скурихин З. Н. Химия вина. – М.: Пищевая промышленность, 1976. – 312 с.
18. Справочник по виноделию / Под ред. Г. Г. Валуйко, В. Т. Косюры. – Симферополь: Таврида, 2005. – 589 с.
19. Методы теххимического контроля в виноделии. / Под ред. В. Г. Гержиковой. – Симферополь: Таврида, 2002. – 260 с.
20. Compendium of International Methods of Wine and Must Analysis // Organisation Internationale de la Vigne et du Vin. – Paris, 2007. – 1. – 401 p.
21. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике. – М.: Наука, 1981. – 250 с.
22. Рибера-Гайон Ж., Пейно Э., Рибера-Гайон П., Сюдро П. Теория и практика виноделия. – М.: Пищевая промышленность, 1979. – Т. 2. – 352 с.
23. Гордон Д. Органическая химия растворов электролитов. – М.: Мир, 1979. – 712 с.

CYLINDER RESONATOR WITH RADIAL CAVITY FOR COMPLEX PERMITTIVITY DETERMINATION OF TABLE WINES

Z. E. Eremenko, E. M. Ganapolskii, V. N. Skresanov, V. V. Vasilchenko, V. G. Gerzhikova, T. A. Zhyleakova, N. S. Anikina

The complex permittivity measurement method for small volume (of order of 1 ml) of high loss liquid at millimeter wave band was proposed. The method was based on the use of a resonance cell as a cylinder resonator with radial cavity filled with liquid under test. The characteristic equation that allows obtaining the complex permittivity of the liquid under test was determined by the use of experimental data (resonant frequency and Q -factor) and complex permittivity of the liquid taken as standard. The optimal resonator sizes, spectral parameters and the operating oscillation mode were determined to obtain complex permittivity of the high loss liquid that fills the radial resonator cavity. The given method was used for complex permittivity determination of various samples of table wines. The paired correlation coefficients of the complex permittivity of wine with its physical-chemical parameters were obtained.

Key words: complex permittivity, high loss liquid, millimeter wave band, cylinder resonator, table wine.

ЦИЛІНДРИЧНИЙ РЕЗОНАТОР З РАДІАЛЬНОЮ ПОРОЖНИНОЮ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ КОМПЛЕКСНОЇ ДІЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРОНИКНОСТІ СТОЛОВИХ ВИН

З. Є. Єременко, Є. М. Ганапольський, В. М. Скресанов, В. В. Васильченко, В. Г. Гержикова, Т. А. Жилиякова, Н. С. Анікіна

Запропоновано метод вимірювання комплексної діелектричної проникності для малого об'єму (порядку 1 мл) сильно поглинаючої рідини в міліметровому діапазоні довжин хвиль. Метод засновано на використанні резонансної комірki у вигляді циліндричного резонатора з радіальною порожниною, яка заповнена рідиною, що вимірюється. Здобуто характеристичне рівняння, яке дозволяє з використанням експериментальних даних (резонансної частоти та добротності) і комплексної діелектричної проникності рідини, що прийнята за стандартну, здобути значення комплексної діелектричної проникності рідини, що вимірюється. Визначено оптимальні параметри резонатора, спектральні параметри й робоча мода коливань для виміру комплексної діелектричної проникності рідини, що заповнює радіальну порожнину резонаторної комірki. Даний метод використовується для визначення комплексної діелектричної проникності різних зразків столових вин. Здобуто та проаналізовано коефіцієнти парної кореляції комплексної діелектричної проникності вина з його фізико-хімічними показниками.

Ключові слова: комплексна діелектрична проникність, сильно поглинаюча рідина, міліметровий діапазон довжин хвиль, циліндричний резонатор, столове вино.

Рукопись поступила 17 февраля 2009 г.