

МИКРОВОЛНОВЫЙ РЕЗОНАНСНЫЙ МЕТОД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СВЧ ПОТЕРЬ В КАПЛЯХ ВОДЫ НА ТВЕРДОЙ ПОВЕРХНОСТИ

© 2015 В. В. Волков¹, В. Ю. Прищепенко¹, В. Н. Семенов², М. А. Суслин¹

¹Военный учебно-научный центр военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия» (г. Воронеж),
ул. Старых Большевиков 54 А, 394042 Воронеж, Россия
e-mail: vlad-140971@mail.ru

²Воронежский государственный университет, Университетская пл., 1, 394006 Воронеж, Россия
e-mail: deanery@chem.vsu.ru

Поступила в редакцию 18.05.2015 г.

Аннотация. Представлены результаты исследований СВЧ потерь в каплях воды различного объема на твердой поверхности осаждения. В качестве первичного измерительного преобразователя использовали высокочастотный цилиндрический объемный резонатор. Трансформация капель воды в тонкий слой прижатием тонкой диэлектрической пластиной позволяет повысить чувствительность СВЧ резонансного метода к концентрационным зависимостям жидких сред.

Ключевые слова: капли воды, цилиндрический объемный резонатор, добротность.

ВВЕДЕНИЕ

Контроль состояния формируемой поверхности или слоя играет важную роль в методах нанесения красок и покрытий, в пропитке строительных и текстильных материалов специальными составами диспергационным методом [1]. Точный контроль объема и формы капель жидких сред, содержащих воду на твердой поверхности, имеет большое прикладное значение. Так в аэрокосмической технике важным мероприятием является контроль качества органических соединений, в том числе их обводненности. Так, например, вода в авиатопливе может находиться в сложных фазовых состояниях: растворенном, в виде взвешенных мельчайших капелек (эмульсионная вода) и в виде отдельной жидкой фазы — свободная вода, которая попадает в топливо в результате ненадлежащих методов хранения, транспортировки и заправки, в результате прямого попадания дождя, снега и т. д. [2].

Определение концентрации гидратных композиций является важной научно-технической задачей. Применение микроволновых методов открывает широкие перспективы в высокочувствительном определении свободной влаги. Однако СВЧ-методы на «прохождение» и «отражение» в свободном пространстве [3—5] обладают значительной

погрешностью, вызванной множеством факторов: изменение положения приёмно-передающих антенн и исследуемого образца, влияние толщины и формы объекта, наличие помех, влияние которых особенно заметно в области малых исследуемых объемов. В волноводных измерителях [6—7] существуют принципиальные технологические трудности размещения капель воды в первичном измерительном преобразователе — возмущающий объем представляет собой тонкий цилиндр.

Применение в качестве первичного измерительного преобразователя высокочастотной СВЧ резонансной системы, например в виде цилиндрического объемного резонатора (ЦОР), открывает достаточно широкие возможности в контроле капель воды на твердой поверхности [8]. Изучение вопроса повышения точности показали, что применение пустого ЦОР с пространственным колебанием H_{011} и добротностью порядка трех десятков позволяет реализовать диапазон измерения 1—2 мл в абсолютных значениях объемной доли осажденной влаги при внутреннем объеме резонатора примерно 1800 мл. В относительной доле это составляет больше 0.055 %, что недостаточно для контроля обводненности жидких топлив в полевых условиях.

Цель данного исследования — определение СВЧ потерь в каплях воды различной формы на твердой поверхности и, как следствие, выработка мер по повышению чувствительности метода при трансформационном изменении геометрии капель.

Для понимания происходящих изменений произведем моделирование физических процессов, протекающих при измерении потерь.

Основным инструментом измерения концентрации поля является электромагнитное взаимодействие электрического поля с веществом. В качестве измерителя выбран метод включения в объем резонатора исследуемого вещества и оценка его влияния на изменение характеристик ЦОР.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Электрическое поле пространственного колебания H_{011} невозмущенного резонатора представляет собой замкнутые концентрические окружности, его поле максимально по середине длины и радиуса. И одной из мер повышения чувствитель-

ности является помещение капель воды в пучность электрического поля. Однако осаждение фазового конденсата-осадка на диэлектрическую пластину-основание, расположенную симметрично относительно середины длины ЦОР, с точки зрения технологии сбора капель воды из исследуемого органического растворителя, размещения и удаления этого осадка из полости резонатора имеет множество недостатков. И очевидно более простым технологическим решением является применение специального концентратора поля в виде диэлектрика, расположенного на одной из торцевых стенок резонатора [9].

Моделирование осуществлено в математическом пакете Comsol Multiphysics. Результат численного моделирования электрического поля пространственного колебания H_{011} цилиндрического объемного резонатора возмущенного диэлектриком высотой h , диэлектрической проницаемостью ϵ_d , расположенным на одной из его торцевых стенок и диаметром, равным диаметру удвоенного радиуса резонатора, рис. 1. В этой части силовые элек-

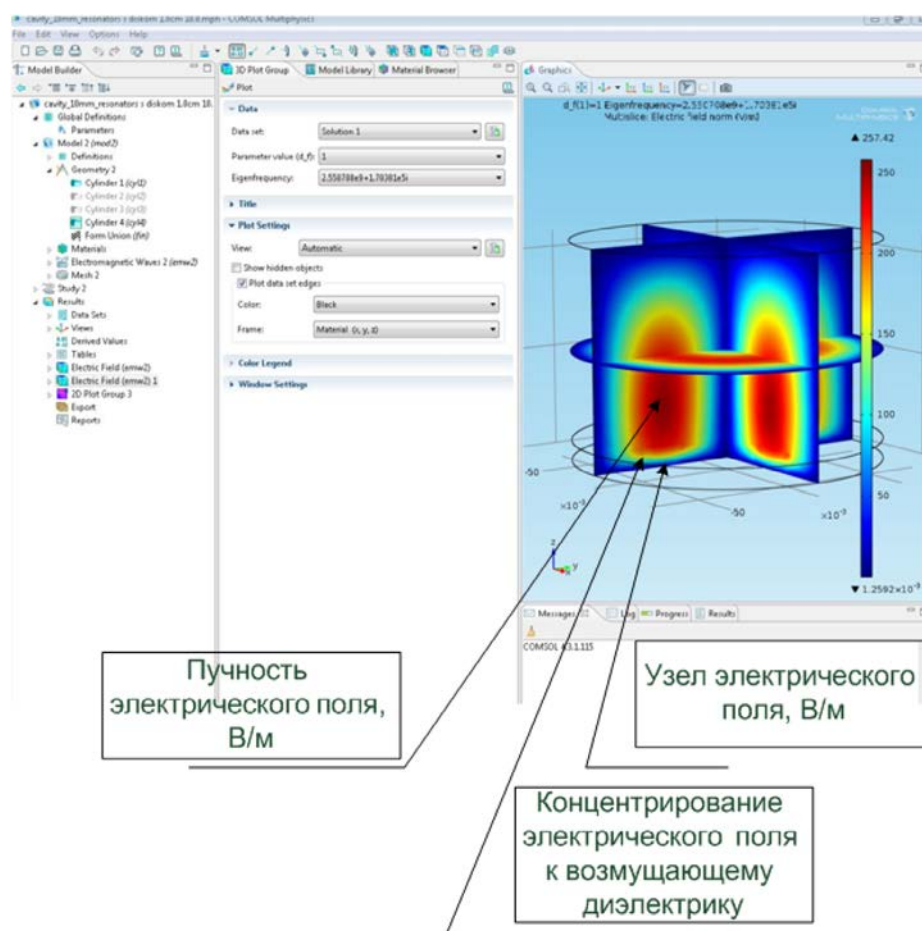


Рис. 1. Интерфейс программы с результатом численного моделирования электрического поля колебания H_{011} ЦОР возмущенного диэлектриком

трические линии по-прежнему представляют собой замкнутые концентрические окружности, но поле при этом концентрируется к возмущающему диэлектрику (узел смещается к торцевой стенке, где расположен диэлектрик). Степень концентрации поля увеличивается с ростом диэлектрической проницаемости ϵ_d и высоты диэлектрика h . На противоположной торцевой стенке так же наблюдается пучность поля.

С целью определения практических величин, необходимых для использования в промышленности, был проведен научный эксперимент.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

При исследовании СВЧ потерь был использован информативный параметр в виде нагруженной добротности цилиндрического объемного резонатора (ЦОР). Измерения проводились на разработанной и изготовленной оригинальной установке.

На рис. 2 показана структурная схема данной экспериментальной установки для измерения нагруженной добротности.

В качестве источника СВЧ сигнала был применен генератор Г4-80, в котором внешнее управление частотной модуляцией осуществлялось управляющим пилообразным сигналом с осциллографа С1-65А. СВЧ энергия посредством приемной петли 4 выводилась из резонатора 1, и далее полученный сигнал детектирования подавался на вход вертикальной развертки осциллографа. При этом на экране С1-65А наблюдается характерный отклик, соответствующий резонансу ЦОР. Средняя частота СВЧ сигнала контролировалась частотомером ЧЗ-54 с блоком преобразователя частоты ЯЗЧ-72 (после перевода режима генератора частоты Г4-80 в «непрерывный»). Девияция частоты составила порядка 1 МГц. Точность измерения частоты — 1 кГц.

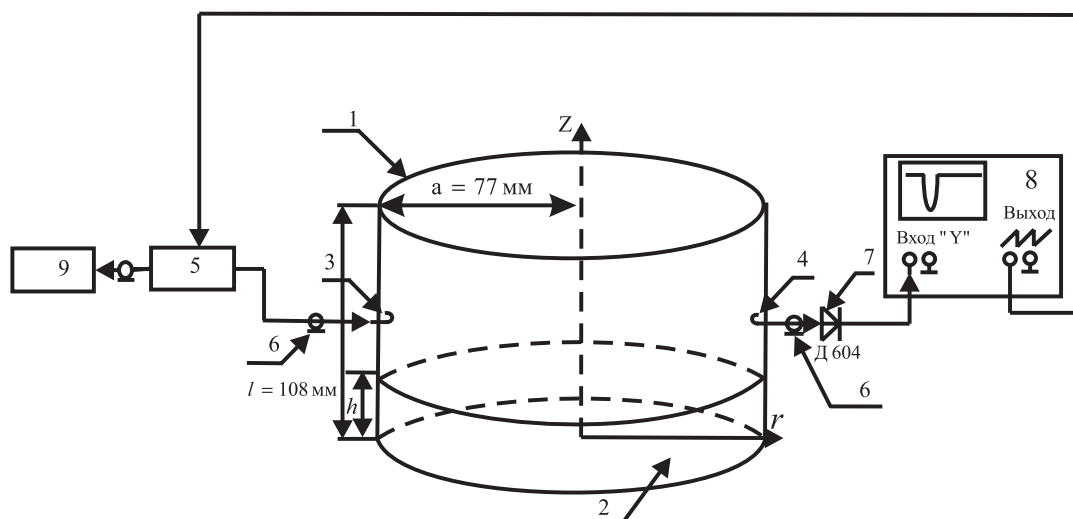


Рис. 2. Структурная схема экспериментальной установки:

1 — ЦОР; 2 — диэлектрический концентратор поля; 3 — возбуждающая петля; 4 — приемная петля; 5 — генератор СВЧ Г4-80; 6 — коаксиальный кабель; 7 — детектор СВЧ колебаний; 8 — осциллограф С1-65А; 9 — частотомер ЧЗ-54 с блоком ЯЗЧ-72

В проведенных исследованиях использовали следующую геометрию резонатора: радиус a — 77 мм, высота l — 108 мм; объем V — примерно 1800 мл. Внутренняя поверхность резонатора посеребрена. Отношение квадрата диаметра к квадрату длины резонатора в экспериментальном резонаторе равно 2.25. Одна из торцевых стенок выполнена подвижной без гальванического контакта с боковой стенкой. Выбор для установки «короткого» резонатора устраняет перепутывание колебания H_{011} с другими пространственными модами. Возбуждение и прием электромагнитной волны в резонаторе осуществляется петлями, вы-

ступающими над плоскостью боковой стенки примерно на 1.5—2.0 мм, при этом плоскости петель перпендикулярны оси резонатора Z . Резонансная частота колебания H_{011} пустого резонатора равна 2767 МГц. Диэлектрический концентратор поля выполнен из фторопласта ФТ-4 в двух вариантах с толщинами $h_1=15$ и $h_2=10$ мм. Абсолютные значения резонансной частоты с возмущением названной выше толщины равны $f_{01} = 2728$ и $f_{02} = 2739$ МГц соответственно. Внешний вид внутренней полости ЦОР с возмущающим концентрирующим диэлектриком показан на рис. 3.



Рис. 3. Внешний вид внутренней полости ЦОР с возмущающим концентрирующим диэлектриком

Для оценки численного и натурного моделирования необходимо теоретически обосновать физические процессы в ЦОР.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ

При решении задач электростатики [10] было показано, что в объеме диэлектрического шарика электрическое поле деформируется из-за граничных условий. Напряженность электрического поля внутри шарика жидкости E_1 связана с невозмущенной напряженностью электрического поля вне шарика E_ϕ следующим выражением:

$$E_1 = \frac{3\varepsilon_0}{\varepsilon_{H_2O} + 2\varepsilon_0} \cdot E_\phi = \alpha E_\phi, \quad (1)$$

где ε_0 и ε_{H_2O} — абсолютные диэлектрические проницаемости окружающего каплю воздуха и воды

соответственно; $\alpha = \frac{3\varepsilon_0}{\varepsilon_{H_2O} + 2\varepsilon_0}$. Таким образом,

поле внутри шара значительно меньше первичного поля E_ϕ . В той же работе показано, что поле внутри сформированного эллипсоида вращения имеет вид:

$$E_1 = E_\phi \cdot \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_{H_2O} n_s + (1 - n_s) \varepsilon_0}, \quad (2)$$

где n_s — коэффициент деполяризации, учитывающий форму эллипсоида. Для шара $n_s = 0.33$; для эллипсоида вращения с отношением осей 100 $n_s = 0.0004$. Для оценки чувствительности метода выдвинута гипотеза о том, что тонкий слой жидкости есть экспериментальный эллипсоид.

Применяемая в эксперименте трансформация капель воды в тонкий слой эквивалентна увеличению отношения осей эллипсоида, как показано на рис. 4.

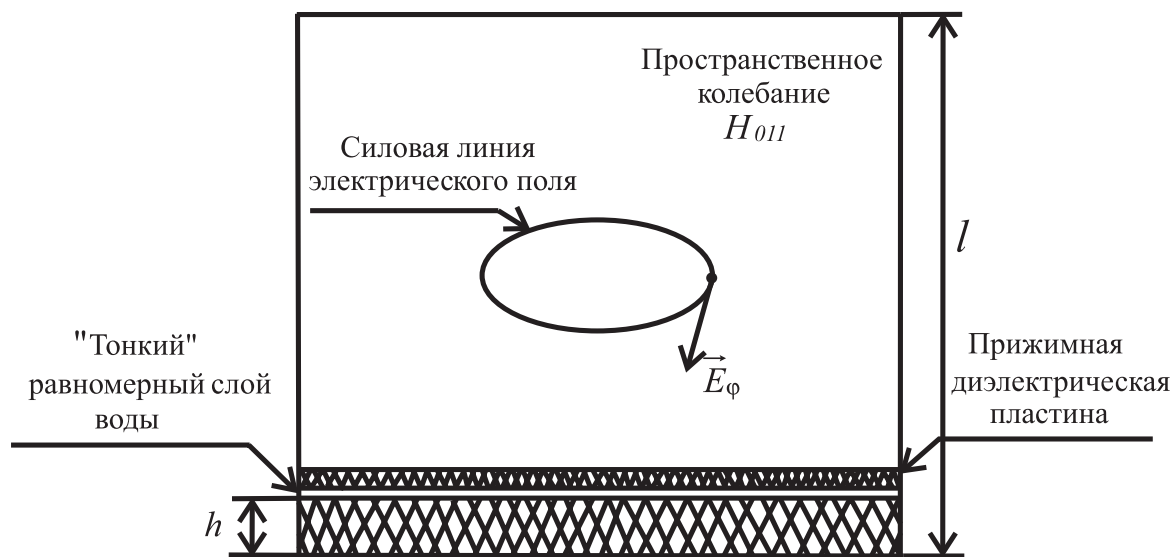


Рис. 4. Расчетная схема трансформации капель жидкости в тонкий слой

С ростом указанного отношения коэффициент деполаризации n , уменьшается, поле внутри эллипсоида растет и приближается к значению поля вне E_ϕ эллипсоида.

С целью понимания трансформационных преобразований выразим поле внутри капли через поле вне его для электромагнитного колебания диапазона СВЧ.

Следует отметить, что при объеме капель на твердой горизонтальной поверхности $V(1\text{мм}^3)$ их форма при некоторых углах смачивания близка к сферической [1]. При таком размере капель градиентом электрического поля в объеме влаги можно пренебречь.

Для электромагнитного колебания в свободном пространстве известна зависимость эффективной площади σ поглощения энергии капельками воды в атмосфере [11] с радиусом капель $d \leq 0.1$ мм (формула Релея для среды с потерями):

$$\sigma = \frac{4\pi}{\lambda} d^3 \frac{6\varepsilon''^2}{(\varepsilon' + 2)^2 + \varepsilon''^2}, \quad (3)$$

где λ — длина волны; ε' и ε'' — относительные действительная и мнимая диэлектрические проницаемости воды в СВЧ диапазоне.

Преобразуем формулу (3) для граничных условий воздух—шарик воды, как показано на рис. 5:

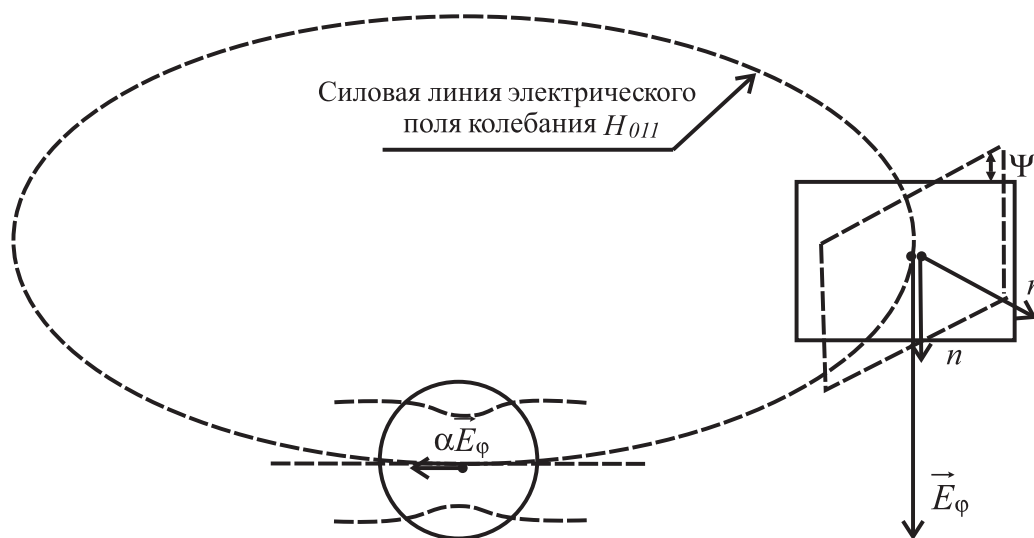


Рис. 5. Представление силовых линий электрического поля колебания H_{011} , возмущенного каплей воды и капилляром с влагой в виде пластины

$$\sigma = \frac{P_n}{\Pi}, \quad (4)$$

где P_n — мощность потерь в шарике воды; Π — поток энергии, падающий на эффективную поверхность σ . Мощность потерь находится как:

$$P_n = \frac{1}{2} E_\phi \cdot H \cdot \sigma, \quad (5)$$

где напряженность магнитного поля H в воздухе связана с напряженностью электрического поля E_ϕ

через волновое сопротивление вакуума $Z_c = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}}$;

μ_0 — абсолютная магнитная проницаемости вакуума:

$$H = \frac{E_\phi}{Z_c}. \quad (6)$$

Мощность потерь выражается формулой:

$$P_n = \frac{1}{2} \varepsilon'' \cdot \varepsilon_0 \cdot \omega \cdot V_{шар} \cdot E_\kappa^2, \quad (7)$$

где E_κ — напряженность электрического поля

в объеме капли; $V_{шар} = \frac{1}{3} \pi \cdot d^3$ — объем шарика;

ω — угловая частота.

Длина волны, выраженная через скорость света c и ω :

$$\lambda = c \cdot \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\omega} \cdot \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}}. \quad (8)$$

Поле внутри капли в конечном виде с учетом (3) — (8):

$$E_\kappa^2 = E_\phi^2 \cdot \frac{11,5 \cdot \varepsilon''}{(\varepsilon' + 2)^2 + \varepsilon''^2}. \quad (9)$$

Сравнивая электростатическое приближение (1) и электрическое поле диапазона СВЧ в капле (9), можно сделать вывод — электрическое поле внутри возмущающего сферического объема значительно меньше, чем вне его. Электрическое поле на поверхности диэлектрика, где прижата влага, не отличается от значения в резонаторе с концентратом поля без исследуемой влаги.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе экспериментальных исследований были получены результаты, близкие к изложенным в теоретических положениях влияния формы капель на СВЧ потери.

На рис. 6 показаны полученные экспериментальные значения нагруженной добротности резонатора Q_n с возмущающим диэлектриком от абсолютных значений объемной доли осажденной влаги (в мл) при различной величине отношений

$\frac{h}{l} = 0.15$ и $\frac{h}{l} = 0.10$. Штриховые линии — это

линии средних значений. Для получения необходимой достоверности было выбрано число измерений равном 10, при этом каждый раз влага заново дозировалась. Доверительная вероятность — 0.9. Средний объем капель не превышал 2 мм².

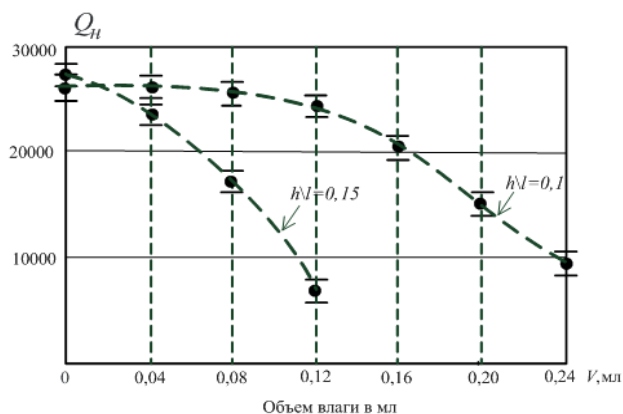


Рис. 6. Результаты измерений добротности для резонатора с каплями на твердой поверхности

Вышеуказанное влияние концентратора на смещение узла к возмущающему диэлектрику позволяет изменять чувствительность к объемной концентрации осажденной влаги. Изменяя отношение

$\frac{h}{l}$ или диэлектрическую проницаемость концентратора, можно варьировать диапазон измерений.

На рис. 7 представлены результаты экспериментальных исследований нагруженной добротности для резонатора с тонким слоем влаги на твердой поверхности. Дозировка влаги осуществлялась микрошприцем Gastinght, серия 1700 с точностью дозирования 0.001 мл. Капли помещались на линии радиусом примерно равным половине радиуса резонатора. Капли прижимались кварцевой пластиной толщиной 0.7 мм. Отдельное исследование показали, что влиянием этой пластины на нагруженную добротность можно пренебречь. Штриховые линии на рис. 7 — это линии средних значений.

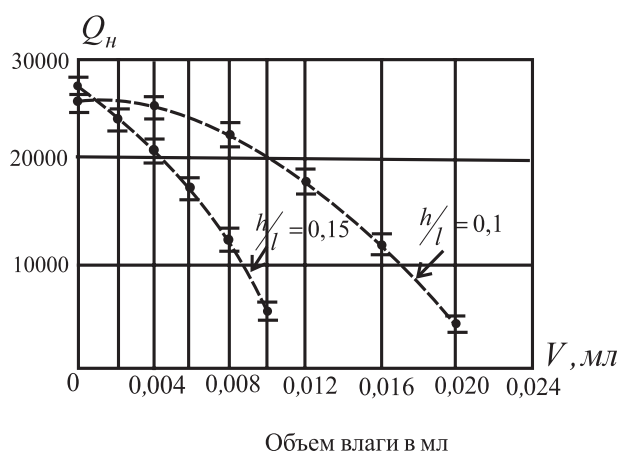


Рис. 7. Результаты экспериментальных исследований для резонатора с тонким слоем влаги на твердой поверхности

Полученная на порядок большая чувствительность объясняется трансформацией капель воды в тонкий слой. Когда межфазные границы исчезают, и тонкий слой влаги становится частью поверхности диэлектрика, поле в этом объеме влаги становится равным полю на поверхности концентрирующего диэлектрика.

Определение структуры поля и оценка влияния граничных условий осуществлены на основе дополнительного ряда экспериментов. Так был создан плоский капилляр с влагой между двумя пластинами из поливинилхлорида, толщина капилляра составила примерно 400 мкм.

На рис. 8б представлены экспериментальные значения нагруженной добротности от площади пластины (капилляра) при ее перемещении вдоль радиуса резонатора и расположенной горизонтально на возмущающем диэлектрике. Высота возмущающего диэлектрика выбрана равной $\frac{h}{l} = 0.15$.

На рисунках 8, 9, 10 и 12 штриховые линии — это линии средних значений.

Наблюдается максимум потерь для положения, равном половине радиуса a , что свойственно для

структуры электрического поля пространственного колебания H_{011} .

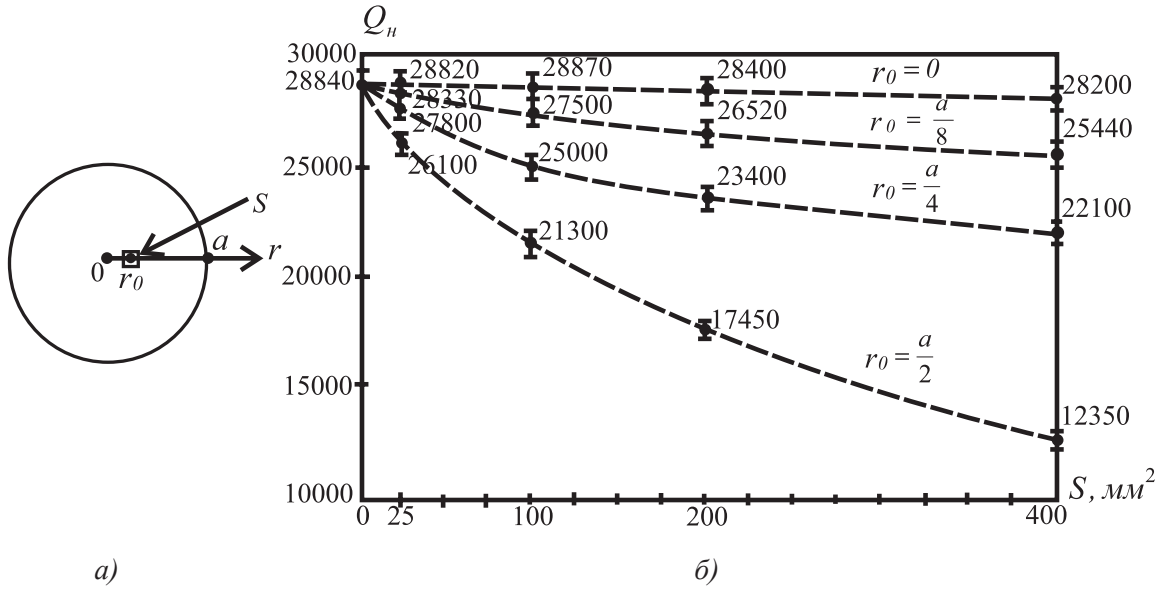


Рис. 8. Нагруженная добротность от площади капилляра:

а) — измерительная схема; б) — экспериментальные значения при разных положениях вдоль радиуса резонатора

На рис. 9б представлены экспериментальные значения нагруженной добротности от углового положения капилляра и расположенного также, как на рис. 8а — горизонтально на возмущающем диэлектрике. Угловое перемещение осуществлялось на расстоянии $r_0 = 0.48a$ от оси резонатора,

как показано на рис. 9а. Также как и электрическое поле СВЧ потери инвариантны угловому положению. Приведенные выше два эксперимента подтверждают правомерность анализа процессов применительно именно к деформированному возмущающим диэлектриком колебанию H_{011} .

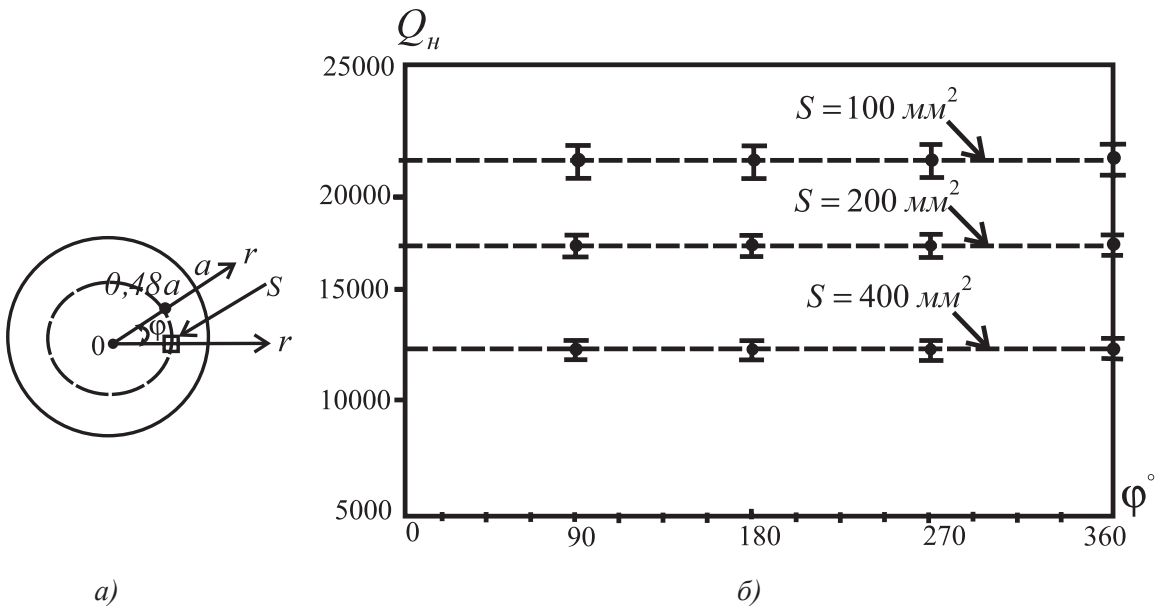


Рис. 9. Нагруженная добротность от углового положения капилляра:

а) — измерительная схема; б) — экспериментальные значения при различной площади пластины

На рис. 10 показаны экспериментальные значения нагруженной добротности от ориентации нормали капилляра относительно направления силовой линии напряженности электрического поля. В случае, когда плоскость капилляра перпендикулярна вектору напряженности электрического поля ($\psi = 0$), наблюдается минимум потерь, а когда касательная ($\psi = \pi/2$) — максимум, что полностью согласуется с граничными условиями на границе воздух — капилляр в виде пластины.

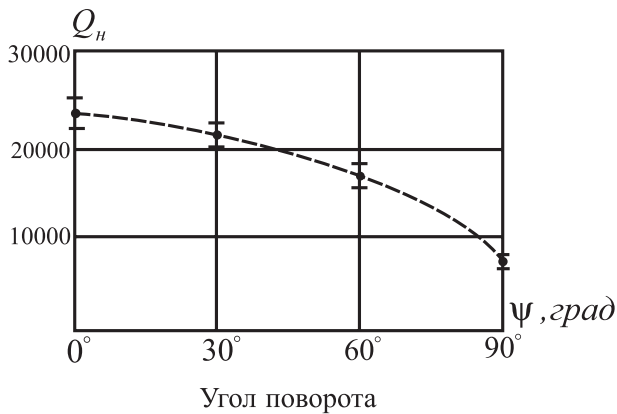
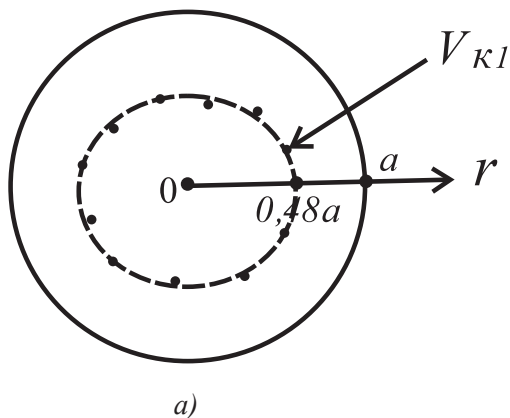
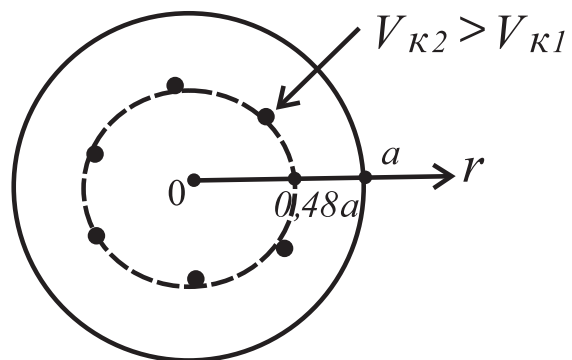


Рис. 10. Нагруженная добротность от ориентации нормали капилляра относительно направления силовой линии

На рис. 11 представлена расчетная схема для исследования размера капель на СВЧ потери. Кап-



а)



б)

Рис. 11. Расчетная схема для исследования размера капель на СВЧ потери:

а) — капли меньшего диаметра; б) — капли большего диаметра

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные в статье исследования показали, что трансформация капель воды в тонкий слой путем прижатия тонкой диэлектрической пласти-

ли помещались по радиусу на расстоянии $r_0 = 0,48a$ от оси резонатора. Исследования проведены для трех объемов капель V_k . Объем капель рассчитывался как общий влаги V_Σ , деленный на количество капель.

На рис. 12 показаны результаты измерений в эксперименте, который подтверждает электростатическую аналогию, что с ростом коэффициента деполяризации поле внутри эллипсоида растет и приближается к значению поля вне E_ϕ эллипсоида. В предельном случае при трансформации капель воды в тонкий слой резко возрастают СВЧ потери.

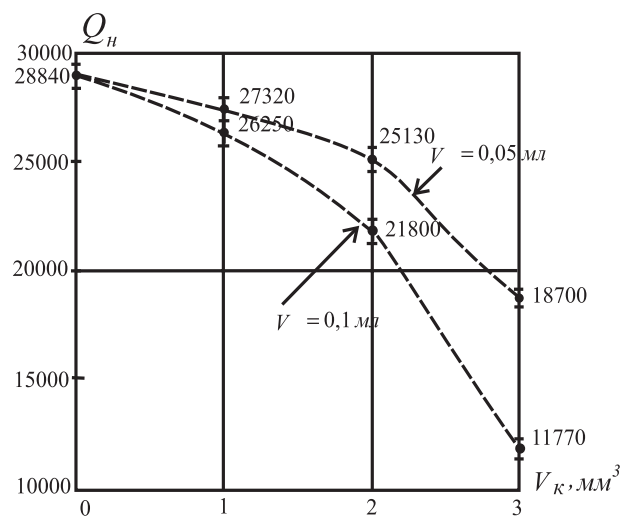


Рис. 12. Нагруженная добротность от объема капель на твердой поверхности

ной позволяет повысить чувствительность СВЧ резонансного метода с использованием ЦОР. Физической основой является влияние геометрии капли на поле в ее объеме.

Полученные результаты могут быть положены в основу разработки приборов контроля состояния исследуемой поверхности при ее обработке поглощающими СВЧ энергией составами. Использование рассмотренной методики повышения чувствительности путем интеграции с современной микроэлектронной базой СВЧ техники позволяет также реализовать портативные приборы определения свободной влаги органических топлив в статических условиях. Так по представленным оценкам прибор будет реагировать на 0.01 мл. в абсолютных значениях объемной доли влаги. Аккумулируя, например, с помощью мембранного фильтра, этот объем влаги с двух литров исследуемого топлива (что предусмотрено указанием МГА № 247/У), чувствительность в относительных единицах составит не хуже 0.0005 %. Применение резонатора с меньшим внутренним объемом пропорционально увеличивает чувствительность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Матюхин С. И., Фроленко К. Ю. // *Конденсированные среды и межфазные границы*, 2013, т. 15, № 10, с. 292.

2. Беликов А. М., Корабельников Э. В. *Авиационные топлива и смазочные материалы*. Ставрополь, СВВАИУ им. Маршала авиации В. А. Судца, 2009, 246 с.

3. Викторов В. А., Лункин Б. В., Савлуков А. С. *Радиоволновые измерения параметров технологических процессов*. Москва, Энергоатомиздат, 1989, 208 с.

4. Мищенко С. В., Малков Н. А. *Проектирование радиоволновых (СВЧ) приборов неразрушающего контроля*. Тамбов, ТГТУ, 2000, 128 с.

5. Данилин А. А. *Измерения в технике СВЧ*. М.: Радиотехника, 2008. 183 с.

6. Лилеев А. С., Лященко А. К., Остроушко А. А., Сенников А. Ю. // *Журнал неорганической химии*, 2006, т. 51, № 4, с. 714.

7. Логинова Д. В., Лилеев А. С., Лященко А. К. // *Журнал физической химии*, 2006, т. 80, № 10, с. 1830.

8. Суслин М. А., Кардашев Г. А., Думболов Д. У., Прищепенко В. Ю., Галко С. А., Дроздов Д. А. // *Территория нефтегаз*, 2013, № 10, с. 24.

9. Белов Ю. Г., Пихтеев Н. А. // *Датчики и системы*, 2003, № 3, с. 21.

10. Кугушев А. М., Голубев Н. С. *Основы радиоэлектроники*. Москва, Энергия, 1969, с. 372.

11. Красюк Н. П., Дымович Н. Д. *Электродинамика и распространение радиоволн*. Москва, Высшая школа, 1974, 536 с.

RESEARCH OF MICROWAVE LOSSES OF WATER DROPS ON THE SOLID SURFACE USING MICROWAVE RESONANCE METHOD

© 2015 V. V. Volkov¹, B. U. Prischepenko¹, V. N. Semenov, M. A. Suslin¹

¹Military Scientific Educational Center of Air Force «Air Force Academy», (Voronezh), Starych Bol'shevikov str., 54A, 394042 Voronezh, Russia

²Voronezh State University, Universitetskaya pl., 1, 394006 Voronezh, Russia
e-mail: deanery@chem.vsu.ru

Received 18.05.2015

Abstract. The purpose of this article is research of microwave losses in water drops of various volume on the solid surface. By research of microwave losses an informative parameter in the form of loaded Q of cylindrical cavity resonator was used. Measurement were carried out on developed and constructed original mounting. Modeling of disturbed spatial oscillation H_{011} is realized in the mathematical tool set *Comsol Multiphysics*. An electrical field in side the water drop on the solid surface is obtained. It is shown, that in an extreme case during water drops transformation in to a thin layer microwave losses are spiking. Experiments with a flat capillary in the form of moisture between two water plates confirm legality of processes' analysis with regard to just that oscillation H_{011} which is deformed by disturbing dielectric. Obtained results could be assumed as basis for development of state control devises of researched surface by its processing with microwave absorbing compositions.

Keywords: water drop, cylindrical cavity resonator, quality factor.

REFERENCES

1. Matyuxin C. I., Frolenko K. U. *Kondensirovannyye sredy i mezhfaznye granitsy*, 2013, vol. 15, no. 3, p. 292—304. Available at: http://www.kcmf.vsu.ru/resources/t_15_3_2013_012.pdf
2. Belikov A. M., Korabel'nikov E. V. *Aviatsionnyye topliva i smazochnyye materialy* [Aviation fuel and lubricants]. Stavropol', SVVAIU im. Marshalaaviatsii V. A. Sudt-sa, 2009, 246 p.
3. Viktorov V. A., Lunkin B. V., Savlukov A. S. *Radi-ovolnovyye izmereniya parametrov tekhnologicheskix protsessov* [Radio wave measuring process parameters]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1989, 208 p.
4. Mishenko S. V., Malkov N. A. *Proektirovaniye radi-ovolnovykh (SVCH) priborov nerazrushayshogo kontrolya* [Design of microwave non-destructive testing instruments.]. Tambov, TGTU, 2000, 128 p.
5. Danilin A. A. *Izmereniya v tekhnike SVCH* [Measurements in the microwave.]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2008, 183 p.
6. Lileev A. S., Lyashenko A. K., Ostroushko A. A., Sennikov A. Y. *Zhurnal neorganicheskoi himii* [Russian Journal of Inorganic Chemistry], 2006, vol. 51, no. 4, pp. 656—661. DOI: 10.1134/S0036023606040267
7. Loginova D. V., Lileev A. S., Lyashenko A. K. *Zhur-nal fizicheskoi himii* [Russian Journal of Physical Chemistry A], 2006, vol. 80, no. 10, pp. 1626—1623. DOI:10.1134/S003602440610013X
8. Suslin M. A., Kardashev G. A., Dumbolov D. U., Prishchenko V. Y., Galko S. A., Drozdov D. A. // *Territori-ya neftegaz* [Territory Neftegaz], 2013, no. 10, p. 24.
9. Belov Y. G., Pixteev N. A. *Datchiki i Sistemy* [Sen-sors and Systems], 2003, no. 3, p. 21.
10. Kugushev A. M., Golubev N. S. *Osnovy radioele-ktroniki* [Basics of Electronics.]. Moscow, Energiya Publ., 1969, p. 372.
11. Krasnyk N. P., Dymovich N. D. *Elektrodinamika i rasprostraneniye radiovoln* [Electrodynamics and Propa-gation of Microwave]. Moscow, Vyshaya Shkola Publ., 1974, 536 p.

Волков Виталий Витальевич — к. т. н., доцент, за-меститель начальника кафедры, Военный учебно-на-учный центр ВВС «Военно-воздушная академия» (г. Во-ронеж); тел.: +7(910) 2402587

Прищепенко Владислав Юрьевич — преподаватель кафедры радиоэлектроники, Военный учебно-научный центр ВВС «Военно-воздушная академия» (г. Воронеж); тел.: +7(920)4184285, e-mail: vlad-140971@mail.ru

Семенов Виктор Николаевич — д. х. н., профессор, заведующий кафедрой общей и неорганической химии, Воронежский государственный университет; тел.: +7(473) 2208610, e-mail: deanery@chem.vsu.ru

Суслин Михаил Алексеевич — к. т. н., доцент, заме-ститель начальника кафедры радиоэлектроники, Воен-ный учебно-научный центр ВВС «Военно-воздушная академия» (г. Воронеж); тел.: +7(910) 8570105

Volkov Vitaly V. — Cand. Sci. (Eng.), Associate Profes-sor, Deputy Chief of the Department, Military Scientific Educational Center of Air Force «Air Force Academy», (Voronezh), ph.: +7(910) 2402587

Prishchenko Vladislav Yu. — Lecturer of the Depart-ment of Radio Electronics, Military Scientific Educational Center of Air Force «Air Force Academy», (Voronezh); ph.: +7(920) 4184285, e-mail: vlad-140971@mail.ru

Semenov Viktor N. — Dr. Sci. (Chem.), Professor, Head of the Department of General and Inorganic Chemistry, Voronezh State University; tel.: +7(473) 2208610, e-mail: deanery@chem.vsu.ru

Suslin Mikhail A. — Cand. Sci. (Eng.), Associate Pro-fessor, Deputy Chief of the Department of Radio Electron-ics, Military Scientific Educational Center of Air Force «Air Force Academy», (Voronezh); ph.: +7(910) 8570105