

Исследование потерь в видах топлива с растворённой и эмульсионной влагой на сверхвысоких частотах

В. В. ВОЛКОВ¹, М. А. СУСЛИН¹, В. Н. МЕЛЬКУМОВ², В. Ю. ПРИЩЕПЕНКО¹

¹ Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина, Воронеж, Россия

² Воронежский государственный архитектурно-строительный университет, Воронеж, Россия, e-mail: kottlac@yandex.ru

Приведены результаты эксперимента по определению потерь в видах топлива с растворённой и эмульсионной влагой при использовании сверхвысокочастотной резонансной системы — цилиндрического объёмного резонатора. Анализ электромагнитного поля методом конечных элементов проведён в системе COMSOL Multiphysics.

Ключевые слова: цилиндрический объёмный резонатор, влага, электрическое поле.

The experiment to determine losses in fuels with dissolved and emulsion moisture, using a microwave resonance system — the cylindrical cavity resonator — is carried out and its results are presented. The finite elements method is used for the analysis of electromagnetic field transformation, which is performed in the COMSOL Multiphysics system. The investigation results can be implemented for developing techniques for determining free moisture content.

Key words: cylindrical cavity resonator, humidity, moisture, electrical field.

В топливе, используемом в современных летательных аппаратах, автомобильной и бронетанковой технике, всегда содержится небольшое количество естественной растворенной влаги. Введение присадок изменяет её содержание. Эмульсионная влага в авиационном топливе нежелательна, так как может привести к серьёзным последствиям. Попадание влаги в виде эмульсии на фильтрующую поверхность топливного фильтра двигателя под большим давлением и при низкой температуре окружающей среды может вызвать образование кристаллов льда и, следовательно, создать аварийную ситуацию. Существующий субъективный визуальный контроль проб в проходящем свете перед заправкой из баков и систем нельзя признать достаточно надёжным [1]. В настоящее время появились сведения о разработке и использовании пожаровзрывобезопасного дизельного топлива для бронетанковой и автомобильной техники, которое содержит до 15 % эмульсионной влаги. Экспресс-контроль такого топлива с высокой точностью в процессе производства и перед непосредственным заливом достаточно актуален из-за ограниченного времени хранения эмульсии.

Использование первичного измерительного преобразователя (ПИП) в диапазоне сверхвысоких частот (СВЧ) открывает широкие возможности высокочувствительного определения обводненности топлив. Примером практической реализации этого метода могут служить СВЧ-влажмеры строительных материалов фирмы «Микрорадар», работающие в диапазоне влажностей больше 2 %. Проточные влажмеры нефти, например УВДН-1ПМ, МВН-1 с нижним пределом измерений объёмной доли влаги 0,01 %. Такая чувствительность прибора возможна только при использовании дифференциального метода.

Применение в качестве ПИП высокодобротной резонансной СВЧ-системы, например цилиндрического объёмного резонатора (ЦОР), позволяет на порядок повысить чувствительность с сохранением возможности измерений при высоком влагосодержании (больше 1 % об.). Однако существу-

ющие резонаторные измерители являются приборами лабораторного типа. К их недостаткам можно отнести трудности изготовления резонаторов высокой добротности, необходимость обеспечения стабильности СВЧ-колебаний [2]. Не решены полностью вопросы надёжной фильтрации паразитных колебаний с сохранением высокой добротности основного колебания, не проведён анализ пространственной структуры электромагнитного поля при увеличении диаметра и диэлектрической проницаемости исследуемой кюветы.

Резонаторные СВЧ-методы находят широкое применение для измерений диэлектрических проницаемости ϵ' и потерь ϵ'' бинарных растворов [3]. Однако для определения объёмной доли эмульсионной влаги по названным параметрам необходимо знать напряжённость электрического поля внутри капли воды. В существующих моделях применяют электростатическое приближение [4] или градуировку измерителя на эталонных эмульсиях. При этом модель, в которой используется электростатическое приближение, имеет значительную методическую погрешность. На практике важно сравнить СВЧ-потери в эмульсионной и растворенной влаге топлива.

В качестве информативного параметра при исследовании СВЧ-потерь использована нагруженная добротность ЦОР. Измерения проводили на оригинальной установке с применением скалярного измерителя цепей Р2М-18. Измеритель обеспечивает визуализацию и автоматическое слежение за максимумом коэффициента передачи по мощности на частотах до 18 ГГц с дискретностью 1 МГц, погрешность измерения мощности составляет 0,001 дБ, а частоты — 1 кГц. Режим детектирования — линейный, полосу пропускания колебательной системы измеряли по уровню 0,5 максимального значения (–3 дБ) и по ней определяли нагруженную добротность диаметр резонатора $2a = 154$ мм, высота $l = 108$ мм, объем 1,8 л, одна из торцевых стенок выполнена подвижной без гальванического контакта с боковой стенкой; внутренняя поверхность резонатора посеребрена.

Отношение квадратов диаметра и длины экспериментального резонатора равно 2,25. Такой выбор резонатора устраняет смешивание рабочего колебания H_{011} с другими пространственными модами. Резонансная частота пустого резонатора $f_0 = 2768,8$ МГц. Выбор дециметрового диапазона длин волн обусловлен необходимостью отработки технологии изготовления ПИП. Переход на сантиметровый диапазон позволит уменьшить габаритные размеры всей измерительной системы с одновременным повышением чувствительности, но это также усложнит технологию изготовления ПИП. Вдоль оси резонатора располагают полиэтиленовую кювету в виде трубки внутренним диаметром 11 или 21 мм, высотой 105 мм.

Оценим внешнюю добротность резонатора, связанную с потерями энергии через его оболочку. С этой целью проведём численный анализ электромагнитного поля пространственного колебания H_{011} методом конечных элементов в системе COMSOL Multiphysics для резонатора, внутри которого расположена полиэтиленовая кювета, заполненная жидкостью с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon' = 2,2$. Размеры моделируемого резонатора и кюветы выбираем как в экспериментальной установке. Результаты численного анализа показывают, что, как и у пустого ЦОР, электрическое поле внутри диэлектрика максимально на середине длины и радиуса, стремится к нулю вдоль оси и у торцевых стенок, электрические силовые линии по-прежнему представляют замкнутые концентрические окружности. Структура поля не изменяется при увеличении диаметра кюветы до 40 мм и диэлектрической проницаемости до $\epsilon' = 20$.

Нагруженная добротность Q_n выражается через ненагруженную Q_0 и внешнюю $Q_{вн}$ как $Q_n^{-1} = Q_0^{-1} + Q_{вн}^{-1}$. Оценим $Q_{вн}$ экспериментальной установки.

Мощность излучения магнитного диполя площадью S и моментом $p_m = \mu_0 I_m S$ представим в виде [5]:

$$P_\Sigma = p_m^2 \omega^4 \epsilon_0^2 Z_c / (12\pi), \quad (1)$$

где I_m — ток, наводимый в проводе диполя; Z_c — волновое сопротивление среды.

Петля вывода электромагнитной энергии расположена у боковой стенки ($r = a$) и на середине длины ($z = l/2$) ЦОР. Напряжённость магнитного поля на всей площади диполя полагаем постоянной:

$$H_z = 2AJ_0(3,832), \quad (2)$$

где A — постоянная величина; $J_0(gr)$ — функция Бесселя первого рода нулевого порядка; $g = 3,832/a$.

Ток выражается формулой

$$I_m = 4 \int_0^{\pi/2} H_z \sin(\varphi) r_0 d\varphi = 8AJ_0(3,832)r_0,$$

где φ — угол между нормалью $\mathbf{n}$ к внешней поверхности провода петли и вектором $\mathbf{H}_z$ (рис. 1); на рисунке $\mathbf{j} = \mathbf{H}_z \times \mathbf{n}$ — линейная плотность тока на проводе; r_0 — радиус провода.

С учётом (1), (2) энергия потерь за время $t = 2/\omega$ составляет

$$W_n = 2\pi P_\Sigma / \omega = 1280\mu_0^2 A^2 J_0^2(3,832) \epsilon_0^2 r_0^2 S^2 \omega^3. \quad (3)$$

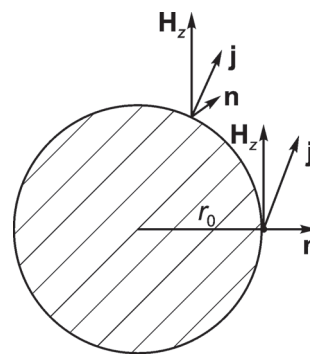


Рис. 1. Сечение провода петли

Максимальная энергия магнитного поля в пустом резонаторе объёмом V [6]:

$$W = \mu_0 \int_V (H_z)^2 dV = \mu_0 A^2 \pi a^2 J_0^2(3,832) \left(1 + \frac{\pi^2 a^2}{3,832^2 l^2} \right). \quad (4)$$

Внешняя добротность $Q_{вн} = 2\pi W / W_n$ или с учётом (3), (4):

$$Q_{вн} \approx 0,0075 \frac{la^2}{Sr_0} \left(1 + \frac{\pi^2 a^2}{3,832^2 l^2} \right) \frac{\lambda^3}{Sr_0}, \quad (5)$$

где λ — длина волны.

При выводе формулы (5) было принято во внимание, что $\mu_0 \epsilon_0 = c^{-2}$; $\omega^3 = (2\pi)^3 c^3 / \lambda^3$; c — скорость света; волновое сопротивление вакуума $Z_b = \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0} = 120\pi$.

В экспериментальной установке $l = 108$ мм; $a = 77$ мм; $S = 3$ мм²; $r_0 \approx 1$ мм; $\lambda \approx 10,9$ см. Нагруженная добротность ЦОР с возмущением в виде кюветы составляет $Q_0 = 22400 \pm 450$. В этом случае $Q_{вн} \gg Q_n$, и потерями энергии на ввод-вывод можно пренебречь, т. е. $Q_n \approx Q_0$.

Для анализа СВЧ-потерь в эмульсионной влаге экспериментально исследовали объёмный резонатор с полиэтиленовой кюветой, заполненной жидким углеводородом с эмульсионной влагой — моторным маслом FELIX SAF 10W 40-го класса вязкости. Использование моторного масла вместо реального топлива объясняется тем, что эмульсия в масле сохраняется около суток, полное расслоение составляет порядка недели, возможно её диспергирование до десятков процентов влаги. Эмульсию готовили путём диспергирования моторного масла с заданным количеством воды 5, 10 и 15 % для кюветы диаметром 11 мм; 0,1, 1 и 5 % для кюветы диаметром 21 мм. Такое количество эмульсионной влаги больше чем на порядок превышает естественную растворённую влагу в жидком углеводороде. При этом вязкостные характеристики эмульсий изменяются незначительно.

В ходе эксперимента при различных значениях эмульсионной влаги в исследуемом жидком углеводороде нагруженную добротность ЦОР определяли по уровню половинной

мощности при перестройке частоты генератора СВЧ. Для каждого фиксированного значения эмульсионной влаги подготовили серию из десяти проб.

Проанализируем СВЧ-потери в эмульсионной влаге жидкого углеводорода. Модуль электрической составляющей колебания H_{011} пустого резонатора имеет вид

$$E_{\varphi} = AJ_1(gr) \sin(\pi z/l), \quad (6)$$

где $J_1(gr)$ — функция Бесселя первого рода первого порядка; другие электрические составляющие равны нулю ($E_r = 0$; $E_z = 0$).

В основу анализа положена известная формула ненагруженной добротности резонатора:

$$Q_0^{-1} = (Q')^{-1} + (Q'')^{-1},$$

где Q' , Q'' — парциальные добротности, обусловленные потерями в стенках резонатора и в кювете с исследуемым углеводородом соответственно без эмульсионной влаги и при её наличии.

В [5] приведена формула для эффективной площади поглощения капель воды в атмосфере, когда радиус капель, представляемых в форме шара, $a \leq 0,1$ мм (формула Релея для среды с потерями):

$$\sigma = \frac{4\pi}{\lambda} a^3 \frac{6\varepsilon''^2}{(\varepsilon' + 2)^2 + \varepsilon''^2}. \quad (7)$$

Здесь ε' , ε'' — относительные действительная и мнимая диэлектрические проницаемости воды, соответственно.

Адаптируем (7) для граничных условий углеводород — капля воды к виду $\sigma = P_n/\Pi$, где P_n — мощность потерь в капле воды; $\Pi = E_{\varphi}H/2$ — поток энергии, падающий на эффективную поверхность σ , откуда

$$P_n = E_{\varphi}H\sigma/2. \quad (8)$$

Здесь H — напряжённость магнитного поля в углеводороде, связанная с напряжённостью электрического поля через волновое сопротивление среды $Z_c = Z_b/\sqrt{\varepsilon_y}$, где ε_y — относительная диэлектрическая проницаемость углеводорода;

$$H = E_{\varphi}/Z_c. \quad (9)$$

Ввиду малости диаметра капли воды мощность потерь в её объёме выражается формулой

$$P_n = \varepsilon'' \varepsilon_0 \omega V_{\text{ш}} E_{\text{ш}}^2/2, \quad (10)$$

где $E_{\text{ш}}$ — напряжённость электрического поля в объёме $V_{\text{ш}} = \pi a^3/3$ капли (шара) воды; ε_0 — абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума.

С учётом (7)—(10) и скорости света в среде $c/\sqrt{\varepsilon_y}$ получим

$$E_{\text{ш}}^2/E_{\varphi}^2 = 11,5\varepsilon''\varepsilon_y / [(\varepsilon' + 2)^2 + \varepsilon''^2].$$

Парциальная добротность

$$Q'' = \frac{\int_0^a J_1^2(gr) r dr + \varepsilon_y \int_0^b J_1^2(gr) r dr}{\varepsilon'' W \frac{11,5\varepsilon''\varepsilon_y}{(\varepsilon' + 2)^2 + \varepsilon''^2} \int_0^b J_1^2(gr) r dr}, \quad (11)$$

где числитель представляет максимальную запасенную энергию в резонаторе, а знаменатель — энергию потерь за период свободных колебаний; a — радиус резонатора; b — радиус кюветы.

Нагруженная добротность для случая поглощения по Релею

$$Q_n \approx Q_0 = Q' Q'' / (Q' + Q''). \quad (12)$$

В известной модели на основе электростатического приближения [4]:

$$E_{\text{ш}} = 3E_{\varphi}\varepsilon_y / (\varepsilon' + 2\varepsilon_y).$$

Парциальная добротность для этого случая

$$Q''' = - \frac{\int_0^a J_1^2(gr) r dr + \varepsilon_y \int_0^b J_1^2(gr) r dr}{\varepsilon'' W \left(\frac{3\varepsilon_y}{\varepsilon' + 2\varepsilon_y} \right)^2 \int_0^b J_1^2(gr) r dr}$$

и нагруженная добротность

$$Q_n \approx Q_0 = Q' Q''' / (Q' + Q'''). \quad (13)$$

В табл. 1 приведены экспериментальные и теоретические нагруженные добротности для кювет диаметрами 11 и 21 мм при различном содержании эмульсионной влаги в моторном масле. Для воды на частоте 2768 МГц принято $\varepsilon = 72 + j13$, $\varepsilon_y = 2,3$.

Таблица 1
Экспериментальные $Q_{н.э}$ и теоретические $Q_{н.т}$ нагруженные добротности при различном содержании эмульсионной влаги W для кювет диаметрами 11 и 21 мм

W_{11}	$Q_{н.э}$	$Q_{н.т}$ по (12)	$Q_{н.т}$ по (13)	W_{21}	$Q_{н.э}$	$Q_{н.т}$ по (12)
0	16570±400	16570	16570	0	14970±410	14970
0,05	14010±300	13750	16150	0,001	14140±420	14340
0,10	11560±200	11700	15780	0,01	9860±380	10386
0,15	8140±150	8280	15410	0,05	4320±320	4670

Из сравнения экспериментальных и теоретических результатов следует, что в качестве модели нагруженной добротности можно выбрать модель на основе формулы Релея для среды с потерями. При этом контролируемое поведение поля при изменении диаметра кюветы и её диэлектрической проницаемости позволяет изменять диапазон измерения эмульсионной влаги без дополнительной градуировки измерителя с конкретными типами углеводородов. Экспериментальные исследования СВЧ-потерь в растворённой влаге выполнены на авиационном керосине марки ТС-1 путем растворения в нем моноэтилового эфира этиленгликоля (принятое в авиации название жидкость «И») после добавки воды не более 4 %. Раствор моноэтилового эфира этиленгликоля в керосине не связывает большую долю воды, которая может выпасть в осадок [1].

Рассмотрим модель парциальной добротности $Q_{пр}$ из-за потерь в растворенной влаге в предположении, что мощность потерь пропорциональна объёмной доле растворенной влаги W . С учётом (9) получим

$$Q_{пр} = \left[\int_0^a J_1^2(gr) r dr + \varepsilon_y \int_0^b J_1^2(gr) r dr \right] / \left[\varepsilon'' W \int_0^b J_1^2(gr) r dr \right].$$

Нагруженная добротность

$$Q_n = Q' Q_{пр} / (Q' + Q_{пр}),$$

где Q' — парциальная добротность, обусловленная потерями в стенках резонатора и в исследуемой кювете с исследуемым керосином без жидкости «И». На рис. 2 представлены нагруженные теоретическая Q_1 и экспериментальная Q_2 добротности от объёмной доли растворённой влаги в керосине ТС-1.

Модель (12) для случая поглощения по Релею может быть положена в основу не только измерителей жидкостей с высоким значением влагосодержания, но и для измерений объёмной доли влаги ниже 0,1 %. Для иллюстрации чувствительности резонаторного метода был проведен эксперимент с каплями на твёрдой поверхности. Капли помещали на тонкой диэлектрической пластине в средней части по длине и радиусу ЦОР. При некоторых углах смачивания форма капли объёмом менее 3 мм³ на твёрдой горизонтальной поверхности близка к сферической [7]. В эксперименте капли объёмом менее 2 мкг наносили микрошприцем.

Модуль электрической составляющей колебания H_{011} в средней части ЦОР имеет вид

$$E_{\phi 0} = A J_1(3,832/2).$$

Для описания потерь в каплях воспользуемся моделью (11) на основе формулы Релея для среды с потерями. Парциальная добротность, определяемая потерями для капель влаги на тонкой пластине, имеет вид

$$Q_{пр}^k = \pi l \int_0^a J_1^2(gr) r dr / \left[\frac{11,5 \varepsilon''}{(\varepsilon' + 2)^2 + \varepsilon''^2} J_1^2(3,832/2) V_{вл} \right].$$

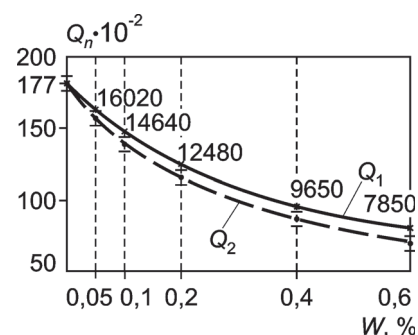


Рис. 2. Нагруженные теоретическая Q_1 и экспериментальная Q_2 добротности от объёмной доли растворённой влаги в керосине ТС-1

В табл. 2 приведены экспериментальные и $Q_{н.э}$ теоретические $Q_{н.т}$ значения нагруженной добротности для капель влаги на тонкой пластине в средней части ЦОР. При этом $Q_{н.т}$ определяли по (12) с учётом, что ненагруженная добротность ЦОР с кварцевой пластиной $Q' = 22730 \pm 620$. Для подтверждения достоверности число измерений выбрано равным десяти (каждый раз влагу дозировали), доверительная вероятность $P = 0,95$.

Таким образом, получаем высокую чувствительность данного метода при малом влагосодержании. Использование более коротких волн

Таблица 2

Экспериментальные и теоретические нагруженные добротности при различных объёмах капель $V_{вл}$ на твёрдой поверхности

$V_{вл}$, мл	$Q_{н.э}$	$Q_{н.т}$ по (12)
0	22730±620	22730
0,01	19840±760	20430
0,02	17720±690	18550
0,03	15260±640	16000
0,04	14820±640	15670
0,05	13580±610	14540
0,10	9840±590	10680

Из сравнения СВЧ-потерь в эмульсионной и растворённой влаге следует, что устранение межфазных границ, например, перевод части эмульсионной влаги в растворённую или изменение формы капель на твёрдой поверхности, приводит к резкому возрастанию СВЧ-потерь. Данный факт может быть положен в основу способов определения свободной влаги топлив.

Литература

- Беликов А. М., Корабельников Э. В. Авиационные топлива и смазочные материалы. Ставрополь: СВВАИУ, 2009.
- Гусев Ю. А. Основы диэлектрической спектроскопии: Учеб. пособие. Казань: КГУ, 2008.
- Ахадов Я. Ю. Диэлектрические свойства бинарных растворов. М.: Наука, 1977.
- Кугушев А. М., Голубев Н. С. Основы радиоэлектроники. М.: Энергия, 1969.
- Красюк Н. П., Дымович Н. Д. Электродинамика и распространение радиоволн. М.: Высшая школа, 1974.
- Федоров Н. Н. Основы электродинамики. М.: Высшая школа, 1980.
- Матюхин С. И., Фроленко К. Ю. Форма капель жидкости, помещенных на твердую горизонтальную поверхность // Конденсированные среды и межфазные границы. 2013. Т. 15. № 10. С. 292—304.

Дата принятия 28.09.2015 г.