

УДК 66.067.3.812

Д.У. Думболов, к.т.н., доцент; **С.А. Галко**, к.т.н., доцент; **Д.А. Дроздов**, аспирант, младший научный сотрудник, ФАУ «25 ГосНИИ химмотологии Минобороны России» (Москва); **Г.А. Кардашев**, д.т.н., профессор, Московский государственный университет инженерной экологии (МГУИЭ); **М.А. Суслин**, к.т.н., доцент; **В.Ю. Прищепенко**, ВУНЦ ВВС «ВВА им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (Воронеж)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕМНОГО РЕЗОНАТОРА СВЧ, ПРЕДНАЗНАЧЕННОГО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СВОБОДНОЙ ВЛАГИ В ТОПЛИВЕ

В статье приведены результаты экспериментального исследования цилиндрического объемного резонатора с тонким слоем влаги на нижней торцевой стенке. Анализ известных методов проведен с использованием моделирования методом конечных элементов в системе ANSYS. Практическим применением результатов исследований может служить определение осажденной влаги в авиационных керосинах.

Ключевые слова: объемный резонатор, свободная влага, качество топлив, авиационный керосин, метод конечных элементов, обводнение нефтепродуктов.

Одной из важнейших задач при сохранении качества нефтепродуктов является предотвращение обводнения при их хранении. Актуален также вопрос оперативного определения свободной влаги в топливах непосредственно перед их выдачей потребителю.

Вода в топливе может находиться в растворенном виде (гигроскопичная вода), в виде взвешенных мельчайших капелек (эмульсионная вода) и отдельной жидкой фазы (свободная вода, попадающая в топливо в результате ненадлежащих методов хранения, транспортировки и заправки, в результате прямого попадания дождя, снега и т.д.) [1].

Известные косвенные методы определения свободной влаги – механические, радиометрические, оптические, теплофизические [2, 3] обладают низкой чувствительностью, или требуют сложной дорогостоящей реализации, или субъективны. Так, авиационный керосин перед непосредственной заправкой в баки и перед вылетом контролирует-

ся на предмет «следов» осажденной влаги методом визуального контроля. При подготовке летательного аппарата к вылету берется образец топлива из точки слива топливного бака. Содержание свободной воды более 0,002% уже опасно, так как приводит к:

- забивке фильтров – нарушается подача топлива или прекращается совсем;
- снижению смазывающей способности топлива, вызывая сухое трение, следствием чего являются задиры и преждевременный износ силовой установки летательного аппарата;
- усилению химической и электрохимической коррозии;
- повышению коррозионной активности органических кислот.

Как известно, интегральные характеристики СВЧ-резонансных систем с одномодовыми режимами весьма чувствительны к изменению электрофизических характеристик исследуемых сред. Для определения осажденной влаги предлагается применять цилиндри-

ческий объемный резонатор (ЦОР), частично заполненный исследуемым керосином. Электромагнитное поле (ЭМ) такой системы – резонатор с возмущающим объемом в виде керосина со свободной влагой в виде осадка – исследовалось методом конечных элементов в системе ANSYS. Геометрия ре-

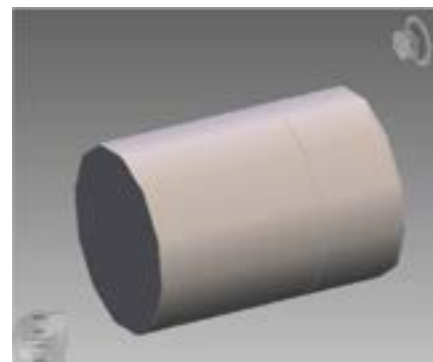


Рис. 1. Геометрия резонатора и заполнения: радиус – 75 мм; высота – 103,7 мм; высота керосина с водой – 34 мм; высота слоя воды под керосином – 1 мм

зонатора и его заполнение следующие (рис. 1): радиус резонатора – 75 мм, высота – 103,7 мм; высота керосина с водой – 34 мм, высота слоя воды под керосином – 1 мм.

Результаты моделирования представлены на рисунках 2 и 3.

Известно, что электрические силовые линии пустого резонатора с колебанием H_{011} – это замкнутые концентрические окружности, поле максимально посередине длины резонатора, на стенках протекает поверхностный ток: на торцевых стенках – кольцевой ток, плотность которого равна нулю в центре и у боковых стенок, по боковым стенкам резонатора также течет кольцевой ток, плотность которого максимальна в среднем сечении. Возмущение в виде слоев керосина и воды приводит к тому, что возмущенный объем начинает концентрировать поле (поле максимально на границе «воздух – керосин», см. рисунок 2), при этом концентрация растет при увеличении диэлектрической проницаемости керосина (относительная диэлектрическая проницаемость керосина изменяется в пределах 2,1–2,3). Поверхностный ток торцевой стенки со слоем воды на порядок больше поверхностного тока другой торцевой стенки (рис. 3). Перераспределение поверхностных токов в возмущенном по сравнению с пустым резонатором изменяет парциальную добротность, вызванную потерями в стенках. Таким образом, наблюдается неконтролируемое изменение электрического поля и добротности пустого резонатора.

Для устранения названных недостатков предлагается сливать керосин и исследовать тонкий слой влаги на нижней торцевой стенке.

Экспериментально был исследован объемный резонатор с осадком в виде влаги на дне. Возбуждающая петля в резонаторе выступает от плоскости боковой стенки примерно на 1,5–2,0 мм (рис. 4). Это обеспечивает фильтрацию всех колебаний, кроме H_{011} , в диапазоне 2,56–4,0 ГГц (диапазон изменения частоты генератора Г4–80), это проверено экспериментально. Резонансная частота колебания H_{011} пустого резонатора равна 2761,3 МГц, а добротность – 7240 (внутренняя поверхность резонатора посеребрена, это видно на рисунке 4). Резонансная частота колебания H_{013} – $f = 4804$ МГц, добротность – 2871.

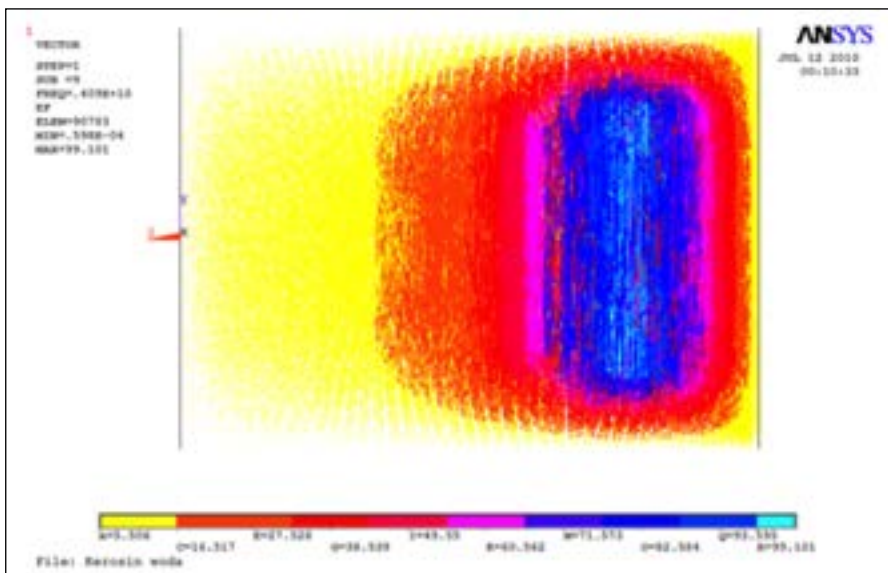


Рис. 2. Электрическое поле моды H_{011} в возмущенном резонаторе

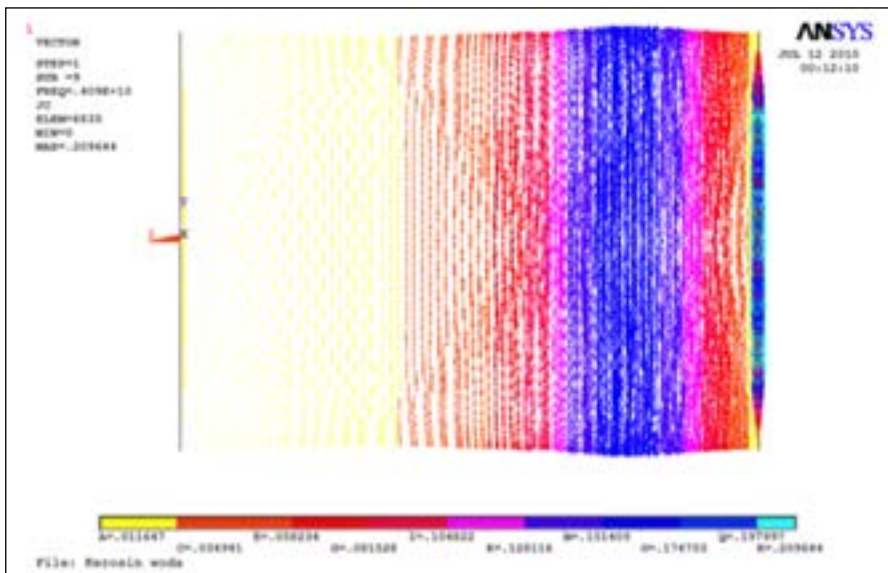


Рис. 3. Поверхностные токи резонатора с модой H_{011} в возмущенном резонаторе



Рис. 4. Внешний вид исследуемого резонатора с колебаниями H_{011} и H_{013}

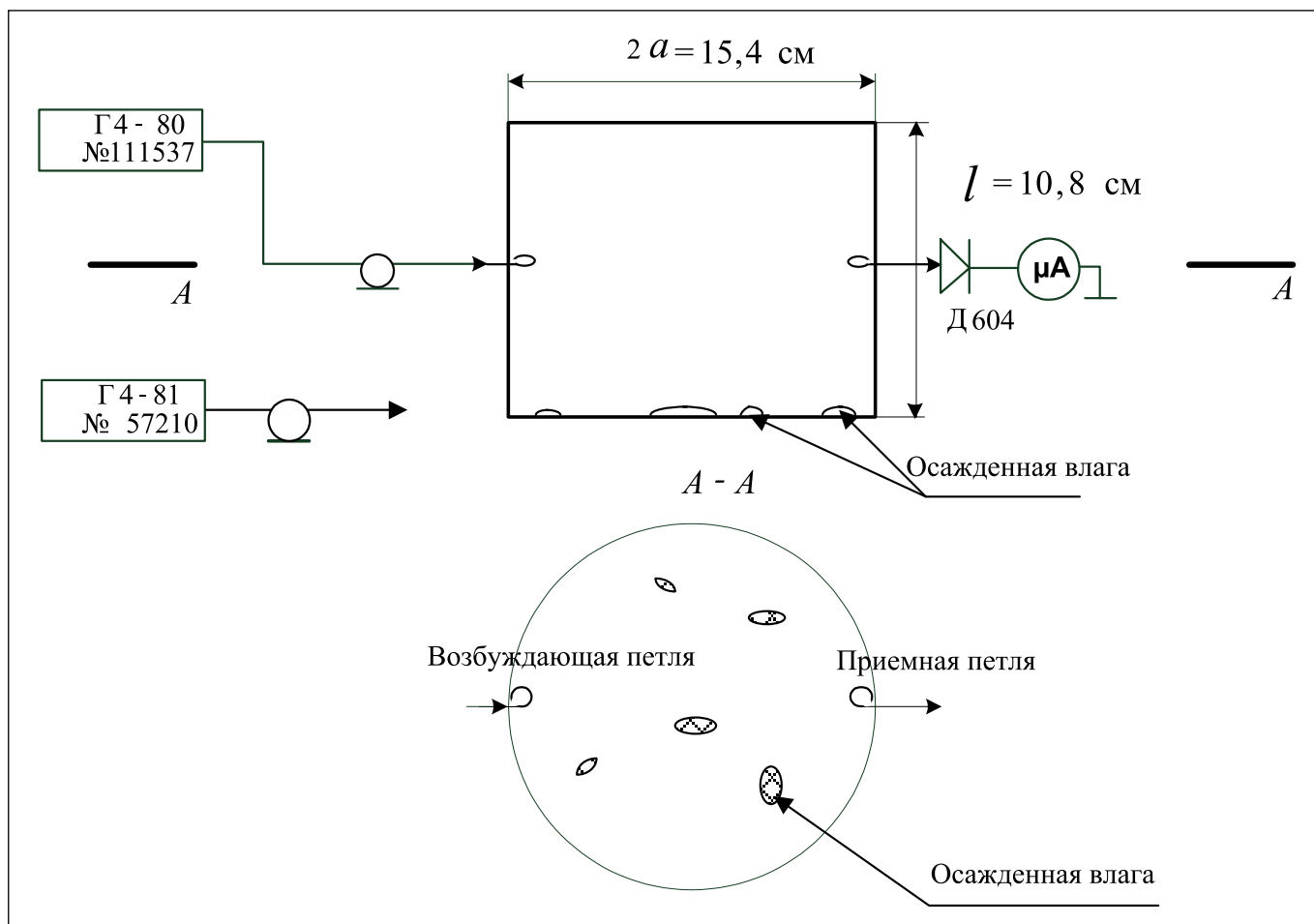


Рис. 5. Структурная схема экспериментальной установки

В резонатор дозированно добавлялась вода (на нижнюю торцевую стенку) от 1 до 10 мл, измерялись частота и нагруженная добротность по уровню «0,5» показаний микроамперметра. Объем влаги был пересчитан исходя из геометрических размеров резонатора в эффективную высоту влаги. Структурная схема экспериментальной установки представлена на рисунке 5. Применялась следующая методика из-

мерения нагруженной добротности по полосе пропускания:

1. Определялся резонанс колебания H_{011} .
2. Максимальное отношение (при резонансе) устанавливалось в пределах 120–130 мкА.
3. Полоса пропускания отыскивалась по уровню половинной мощности (60–65 мкА) показаний микроамперметра.

4. Один оператор производил отсчет начала и конца перестройки частоты генератора.

5. Ручка «частота» при измерении $\Delta f_{\text{нп}}$ вращалась во всех измерениях только по часовой стрелке, скорость перемещения стрелки равнялась примерно 20 делений мкА за 5 секунд.

6. Второй оператор производил точный отсчет граничных частот полосы пропускания.

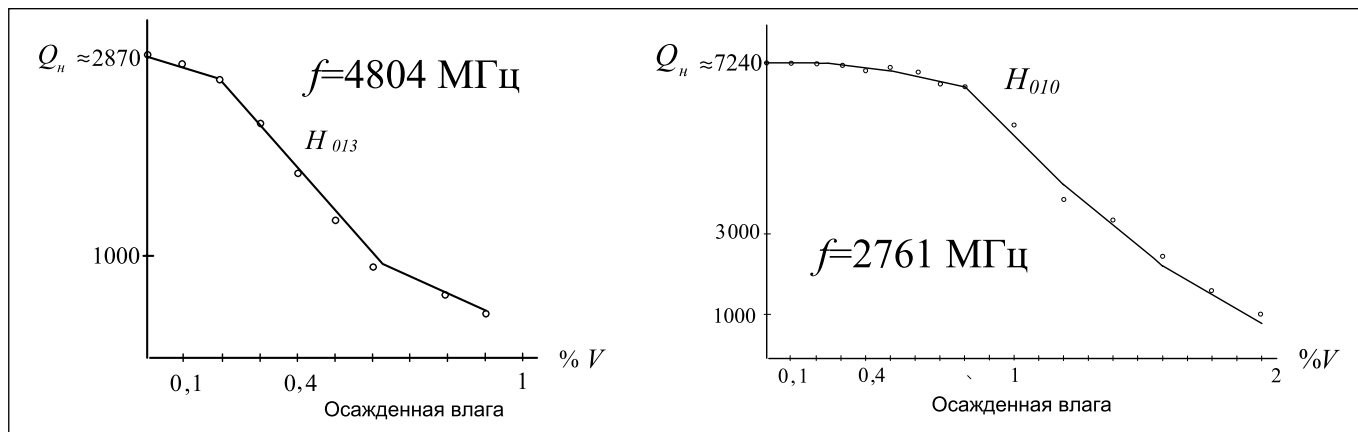


Рис. 6. Зависимость нагруженной добротности резонаторов от объемного влагосодержания в осадке: а – для колебания H_{013} ; б – для колебания H_{011}

Наличие тонкого слоя влаги на нижней торцевой стенке резонатора структуру поля мод H_{011} и H_{013} не искажает совершенно. Наличие тонкого слоя практически не изменяет резонансную частоту колебаний (частота остается в пределах полосы задержания ненагруженной системы), а добротность изменяется значительно.

На рисунке 6 показаны экспериментальные значения нагруженной добротности резонатора с колебаниями H_{011} и H_{013} от объемной концентрации влаги в осадке %V. Объемная концентрация влаги в осадке %V рассчитывалась как отношение эффективной высоты влаги $l_{эф}$ к высоте резонатора $l_{ор}$.

$$V\% = \frac{l_{эф}}{l_{ор}} \quad (1)$$

До концентрации порядка 1% информативным параметром может служить изменение добротности колебания H_{013} в диапазоне порядка 1–2% – изменение добротности колебаний H_{011} . Это объясняется тем, что электрическое поле колебания H_{011} имеет один максимум по длине резонатора, а колебания H_{013} – три. С увеличением добротности пустого резонатора пропорционально увеличивается чувствительность к содержанию свободной влаги.

Для реализации предлагаемой методики с использованием двух пространственных мод цилиндрического объемного резонатора необходим СВЧ-генератор одновременно с широкой (для возбуждения колебаний H_{011} и H_{013}) и прецизионной перестройкой частоты (для измерения добротности нагруженной колебательной системы по полосе пропускания). Такой генератор сложен в исполнении и настройке.

Моделирование ЭМ поля методом конечных элементов и экспериментальные исследования показывают, что увеличить чувствительность можно путем введения в резонатор диэлектрического трубопровода, расположенного по оси. На рисунке 7 показана такая система. Толщина стенок трубопровода составляет 1 мм, диаметр – 25 мм. Материал – пластик с относительной диэлектрической проницаемостью 5,3.

На рисунках 8 и 9 представлены результаты моделирования ЭМ-поля.

Наличие возмущающего диэлектрического полого стержня приводит к трансформации поля. Посередине длины трубопровода и у торцевых стенок



Рис. 7. Внутренний объем резонатора с трубопроводом на оси

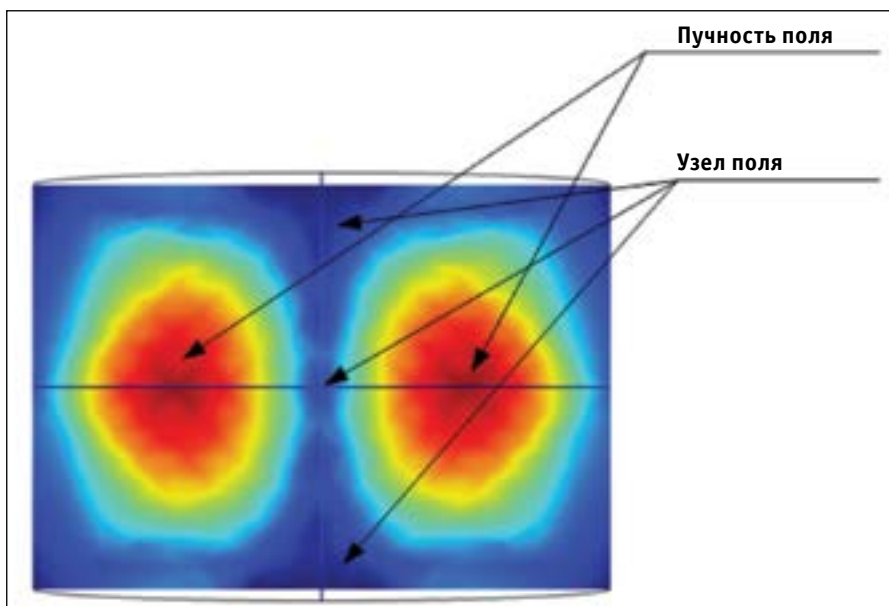


Рис. 8. Электрическое поле электромагнитного колебания H_{011} пустого резонатора

наблюдается концентрация поля. При этом резонансная частота по отношению к резонансной частоте основного колебания H_{011} , равной

$$f_{011} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\epsilon_0\mu_0}} \sqrt{\left(\frac{x_1^0}{a}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{l}\right)^2}, \quad (2)$$

где a – радиус; l – длина резонатора, для колебания H_{011} характеристическое число $x_1^0 = 3,832$, изменяется примерно на 10 МГц. Добротность в этом случае вырастает примерно на 30%.

Такая трансформация наблюдается при отношении диаметра полого стержня

из диэлектрика d_d к диаметру резонатора $d_{ор}$

$$\frac{d_d}{d_{ор}} \geq 0,1 \quad (3)$$

и толщине стенок более 0,5 мм. Два максимума электрического поля по радиусу на торцевой стенке значительно увеличивают чувствительность к содержанию на этой стенке влаги.

На рисунке 10 показана зависимость экспериментальных значений нагруженной добротности резонатора с трубопроводом и колебаниями H_{011} от

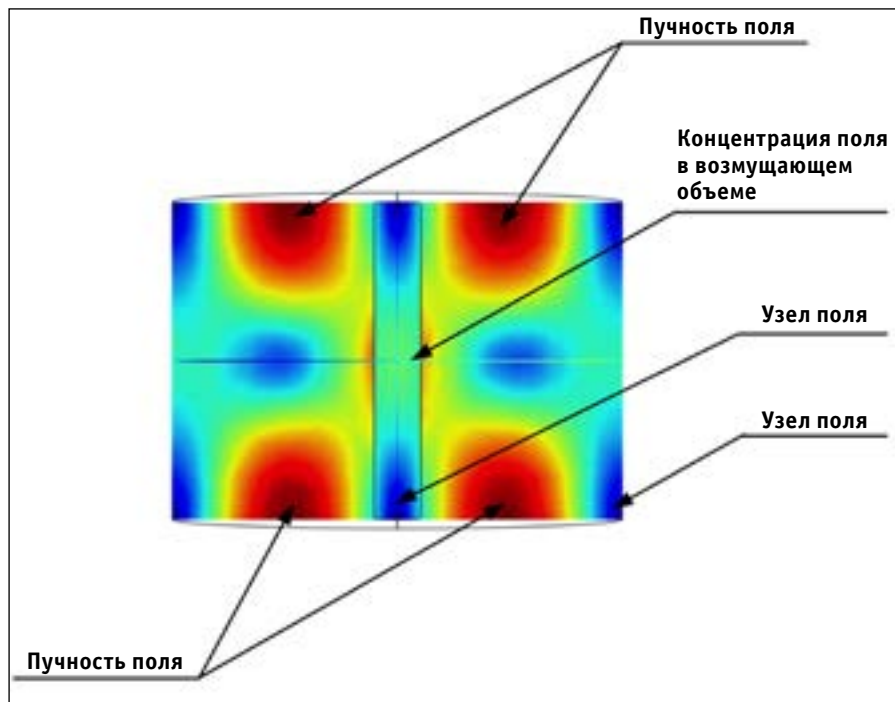


Рис. 9. Трансформация электрического поля электромагнитного колебания H_{011} резонатора с диэлектрическим трубопроводом

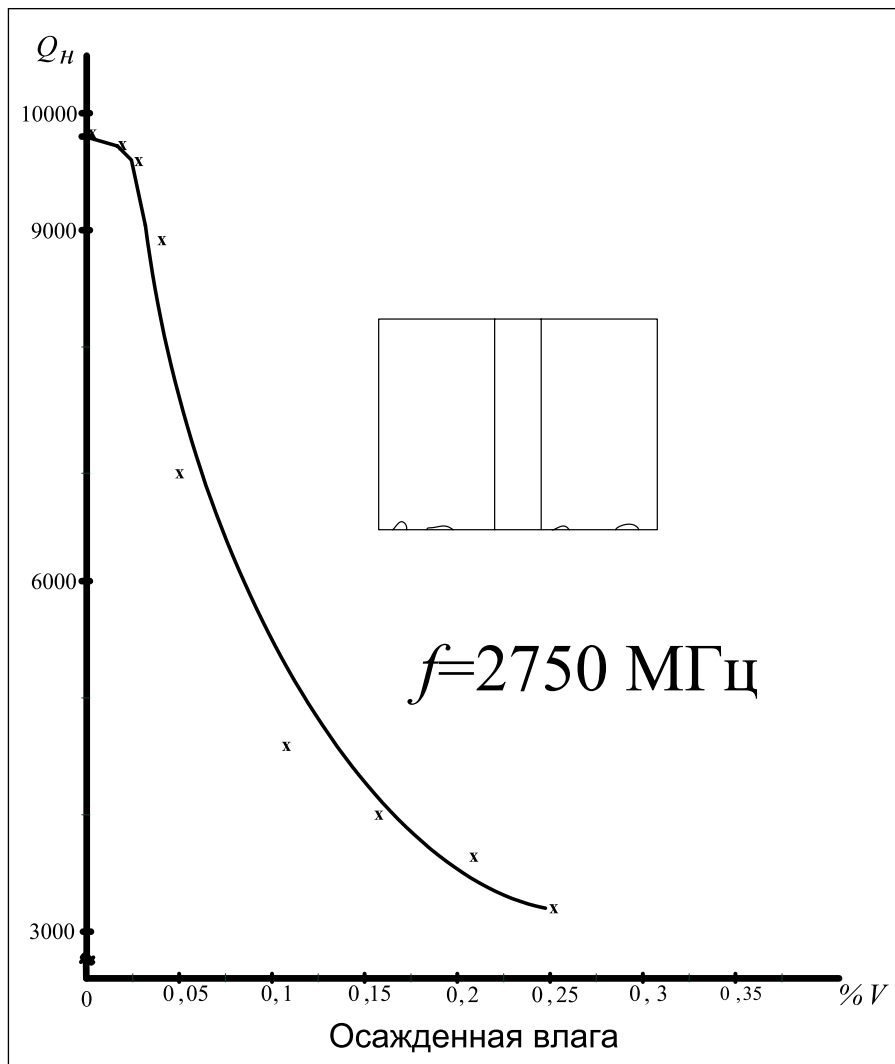


Рис. 10. Зависимость нагруженной добротности резонатора с трубопроводом на оси и колебанием H_{011} от объемного влагосодержания в осадке

объемной концентрации влаги в осадке %V. Концентрация поля у торцевых стенок резонатора приводит к увеличению чувствительности от содержания влаги в осадке.

Применение в схеме измерения двух резонаторов (пустого и с трубопроводом) и одного генератора СВЧ с небольшим диапазоном перестройки частоты (десятки МГц против единиц ГГц в схеме с одним резонатором) позволяют реализовать более высокую чувствительность к содержанию влаги в осадке и одновременно упростить аппаратную реализацию устройства.

Литература:

1. А.М. Беликов, Э.В. Корабельников. Авиационные топлива и смазочные материалы. – Ставрополь: СВВАИУ им. маршала авиации В.А. Судца, 2009. – 246 с.
2. Неразрушающий контроль и диагностика: справочник / Под ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 1995. – С. 487.
3. Берлинер М.А. Измерение влажности. – М.: Энергия, 1973. – С. 201.

Automation

D.U. Dumbolov, Philosophy Doctor, Associate Professor; **S.A. Galko**, Philosophy Doctor, Associate Professor; **D.A. Drozdov**, junior research scientist, Federal Autonomous Enterprise «The 25-th State Research Institute of Himmotology, Ministry of Defense of Russian Federation»; **H.A. Kardashev**, Doctor of Engineering, Professor, Moscow State University of Engineering Ecology; **M.A. Suslin**, Philosophy Doctor, Associate Professor; **V.Y. Prishchepenko**, lecturer, The Air Force Academy name of professor Zhukovsky and Gagarin, Voronezh

Experimental research of SHF parametres cavity resonator in relation to the measurements of free moisture in fuel

In this article results of an experimental study of cylindrical cavity resonator with a thin layer of humidity on the lower end wall are presented. Analysis of the known methods was carried out using simulation by finite element method in the system ANSYS. Practical application of research results can be a detection of precipitated water in aviation kerosene.

Keywords: cavity resonator, precipitated water, fuel quality, aviation kerosene, finite element method, supplying with water of oil products.

References:

1. A.M. Belikov, E.V. Korabelnikov. Aviatsionnye topliva i smazochnye materialy (Aircraft fuel and lubricants). – Stavropol: Stavropol Higher Military Aviation Engineering School named after Air Marshal V.A. Sudets, 2009. – 246 p.
2. Nerazrushayutshiy kontrol' i diagnostika (Non-destructive inspection and diagnostics): reference book / Under the editorship of V.V. Klyuev. – Moscow: Mashinostroyeniye, 1995. – P. 487.
3. Berliner M.A. Izmerenie vlazhnosti (Humidity measurement). – Moscow: Energy, 1973. – P. 201.



15-я международная выставка

НЕФТЕГАЗ



26—29 мая 2014

**Оборудование и технологии
для нефтегазового комплекса**

Организаторы:

ЗАО «Экспоцентр» (Россия),
фирма «Мессе Дюссельдорф ГмБХ» (Германия)



Самая крупная выставка России 2011–2012 гг. по тематике «Нефть и газ» в номинациях: «Выставочная площадь», «Международное признание», «Охват рынка». Рейтинг составлен ТПП РФ и РСВЯ. Все выставки – участники рейтинга прошли независимый аудит статистических показателей в соответствии с международными правилами



www.neftegaz-expo.ru

ДО ВСТРЕЧИ В МАЕ В «ЭКСПОЦЕНТРЕ»!

Реклама

5-й МЕЖДУНАРОДНЫЙ ФОРУМ

ЭНЕРКОН

ОТ СОВРЕМЕННЫХ НЕФТЕГАЗОВЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ К СТАБИЛЬНОМУ
ОТРАСЛЕВОМУ РАЗВИТИЮ

26–28 мая
www.enercon-ng.ru

12+