

**ТОПИЛЬСКИЙ Алексей Викторович**

**МИКРОВОЛНОВЫЕ РЕЗОНАТОРНЫЕ МЕТОДЫ  
ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЪЕМНОГО ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ  
В ЖИДКИХ УГЛЕВОДОРОДАХ**

Специальность 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Тамбов 2004

Работа выполнена на кафедре «Криминалистика и информатизация правовой деятельности» Тамбовского государственного технического университета.

**Научный руководитель** доктор технических наук, профессор  
*нышов Владимир Николаевич*

**Чер-**

**Официальные оппоненты:** доктор технических наук, профессор  
*Мордасов Михаил Михайлович*

кандидат технических наук, доцент  
**Федоров Николай Павлович**

**Ведущая организация** Всероссийский научно-исследовательский и проектно-технологический институт по использованию техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве

Защита диссертации состоится « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2004 г. в \_\_\_\_ ч на заседании диссертационного совета Д 212.260.01 Тамбовского государственного технического университета по адресу: 392000, г. Тамбов, ул. Советская, 106, ТГТУ, Большой зал.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных гербовой печатью, просим направлять по адресу: 392000, г. Тамбов, Советская, 106, ТГТУ, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.260.01.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2004 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

А.А. Чуриков

---

---

Подписано к печати 22.11.2004  
Гарнитура Times New Roman. Формат 60 × 84/16. Бумага офсетная  
Печать офсетная. Объем: 0,93 усл. печ. л.; 0,9 уч.-изд. л.  
Тираж 100 экз. С. 814

Издательско-полиграфический центр ТГТУ  
392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Интенсивное развитие современной автомобильной и авиационной техники диктует особые требования к качеству используемых горючесмазочных материалов (ГСМ), от которых зависит безаварийная эксплуатация и долговечность работы. В частности, в настоящее время очень высокие требования предъявляются к авиационным горюче-смазочным материалам, таким как авиационный керосин, содержащий жидкость «И» (моноэтиловый эфир этиленгликоля). Так содержание растворенной влаги в авиационном керосине не превышает 0,01 % от общей массы керосина. Добавка жидкости «И» содержащей растворенную влагу (в зависимости от сортности 0,2 – 0,6 %), увеличивает процентное содержание влаги. В зависимости от температуры добавляется от 0,1 до 0,3 %. Жидкость «И» связывает растворенную влагу, не давая ей образовывать капли (эмульсию). Очень актуальна проблема определения качества бензина (повышение октанового числа путем добавления различных примесей, содержащих растворенную влагу). Актуальным также является определение процентного содержания растворенной влаги жидких ГСМ, имеющих высокое значение процентного содержания растворенной влаги (например, этиленгликоль от 40 до 60 % влаги) как в процессе производства, так и перед непосредственным использованием.

Диэлькометрические и кондуктометрические методы ВЧ диапазона обладают или низкой чувствительностью, или высокой погрешностью, вызванной в частности, засоленностью влаги. СВЧ-методы на «прохождение» и «отражение» сложны в реализации и требуют дорогостоящей реализации. Известные СВЧ резонаторные методы являются только лабораторными.

Поэтому оперативное определение электрофизических параметров горюче-смазочных материалов с использованием первичного измерительного преобразователя (ПИП) на основе цилиндрического объемного резонатора (ЦОР).

Известно, что интегральные характеристики СВЧ-систем с распределенными параметрами (объемный резонатор (ОР)) – резонансная частота и добротность весьма чувствительны к изменению электрофизических характеристик сред, частично заполняющих объемный резонатор.

**Цель работы.** Разработать экспресс-метод определения объемного процентного содержания влагосодержащих присадок в топливах с использованием одномодового режима СВЧ-преобразователей, обладающий высокой чувствительностью и точностью. Разработать метод и реализующее его устройство определения высоких значений влагосодержания в ГСМ с использованием нового двухмодового режима СВЧ-преобразователей. Разработать простой в реализации многомодовый СВЧ-метод определения влагосодержания ГСМ, позволяющий определять не только растворенную, но и взвешенную влагу.

**Методы исследования** основаны на применении аппарата математической физики, теории электродинамики, математического моделирования, компьютерных технологий и метрологии.

**Научная новизна.** Разработан экспресс-метод определения объемного процентного содержания присадок имеющих собственную растворенную влагу в топливах, с использованием одномодового режима СВЧ-преобразователей обладающий высокой чувствительностью и точностью. Теоретической основой метода являются полученные модели для резонансной частоты и добротности колебания  $H_{011}$  ЦОР при горизонтальном расположении исследуемой среды для случая деформации электрического поля  $E_\phi$ , учитывающего концентрацию поля в исследуемой среде. Предложен новый двухмодовый метод определения высоких значений влагосодержания в ГСМ. С этой целью произведен расчет разности резонансных частот колебаний  $H_{011}$  и  $E_{111}$  ЦОР при аксиальном расположении трубопровода с исследуемой жидкостью. Разработан простой в реализации многомодовый СВЧ-метод определения влагосодержания ГСМ, позволяющий определять не только растворенную, но и взвешенную влагу.

**Практическая ценность** работы заключается в следующем. По экспериментальным данным предложена методика выбора поправочных коэффициентов  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  в моделях возмущенной частоты и нагруженной добротности соответственно. Разработано устройство для определения процентного содержания растворенной влаги в жидкостях с высоким значением влагосодержания, реализующее двухмодовый метод. Предложена конструкция генератора СВЧ на основе коаксиального объемного резонатора (КОР) с закороченной емкостью, обеспечивающего широкую и прецизионную перестройку частоты. Предложена методика выбора конструктивных параметров КОР и ЦОР из условия их частотного согласования. Разработано устройство, реализующее многомодовый термовлагодетрический СВЧ-метод определения влагосодержания ГСМ. Все устройства позволяют оперативно контролировать качество ГСМ.

**Реализация результатов.** Результаты теоретических и экспериментальных исследований прошли испытания в службе ГСМ в/ч 21350 и рекомендованы к внедрению. Они также используются в научно-исследовательской работе «Датчик», выполняемой по заданию главнокомандующего ВВС.

**Апробация работы.** Основные научные и практические результаты исследований по теме диссертации докладывались на: VII Всероссийской научно-технической конференции «Состояние и проблемы

измерений»

(г. Москва, 2000 г.), Международной научной конференции «Измерения, контроль, информатизация» (г. Барнаул, 2001 г.), IV Международной теплофизической школе «Теплофизические измерения в начале XXI

века»

(г. Тамбов, 2001 г.), на Всероссийской научно-технической конференции «Информационные системы и технологии» (г. Нижний Новгород, 2002 г.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 10 научных работ, на одно разработанное устройство получен патент РФ на изобретение.

**Структура и объем работы.** Диссертация содержит введение, четыре главы, заключение, изложенные на 124 страницах машинописного текста, рисунках и таблицах. Список литературы включает 51 наименований.

Особую благодарность за научные консультации автор выражает доктору технических наук, профессору Дмитриеву Дмитрию Александровичу и кандидату технических наук, доценту Суслину Михаилу Алексеевичу.

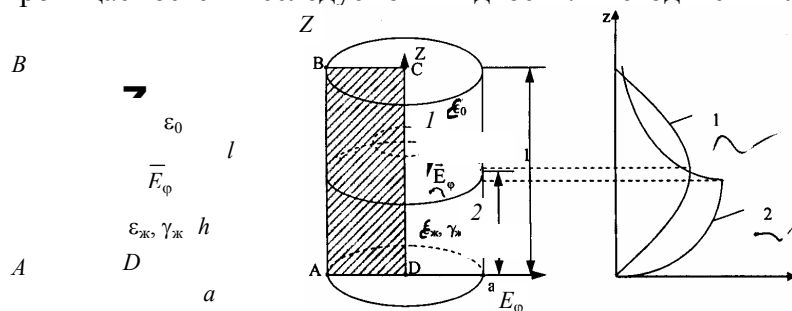
## СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** приведено обоснование актуальности темы диссертации. Раскрыта научная новизна и практическая ценность, приведены результаты апробации и реализации научно-технических результатов работы.

В первой главе «**Обзор и классификация методов измерения влажности**» приведен обзор и классификация существующих методов измерения влажности.

Обзор прямых методов измерения влажности жидких сред показал, что метод сушки неприемлем для измерения процентного содержания растворенной влаги, известный метод Фишера является лабораторным и требует сложной аппаратной реализации. Известные косвенные методы – механические, радиометрические, оптические, теплофизические обладают низкой чувствительностью, либо требуют сложной дорогостоящей реализации, или субъективны. Электрические методы диапазона ВЧ (кондуктометрические, диэлькометрические) обладают низкой чувствительностью при измерении малых значений влагосодержания (<0,1 %) или высокой относительной погрешностью (>5 %) при измерении больших значений влагосодержания (>1 %). СВЧ-методы измерения влажности с использованием методов на прохождение и отражение обладают высокой чувствительностью, но сложны в реализации, требуют дорогостоящей аппаратуры, узкодиапазонны. При измерении процентного содержания влаги в жидкостях с высокой влажностью основным недостатком является низкая точность измерения. Известные СВЧ-резонаторные методы являются лабораторными. Их недостаток – трудоемкость измерений, необходимость фильтрации паразитных колебаний, что уменьшает добротность основного, применение специальных мер, устраняющих влияние теплового изменения размеров цилиндрических объемных резонаторов ЦОР. Недостатком также является невозможность раздельного определения объемного процентного содержания растворенной и осажденной влаги. На основании вышеуказанного определены цели и задачи исследования.

Вторая глава «**Разработка метода определения малых концентраций влагосодержащих присадок в топливах с использованием одномодового режима СВЧ-преобразователей на основе ЦОР**» посвящена разработке теоретических основ определения влагосодержания с использованием СВЧ-преобразователей на основе ЦОР. Обзор методов резонансных частот ЦОР показал, что погрешность метода «малых возмущений» (ММВ) растет с увеличением возмущающего объема, диэлектрической и магнитной проницаемостей исследуемой жидкости. Метод «сшивания»



**Рис. 1** Расчетная схема «возмущенной» резонансной частоты колебания  $H_{011}$  ЦОР:

1 – недеформированная структура поля; 2 – деформация поля

адекватен, однако, применим только для расчета колебаний типа  $H_{01p}$  с горизонтальным и аксиальным расположением исследуемой среды, и для получения аналитического выражения для резонансной частоты необходимо решить сложное трансцендентное уравнение относительно коэффициента распространения. Метод «эквивалентных» параметров (МЭП) позволяет получить аналитическое выражение для резонансной частоты.

Методом «эквивалентной емкости» получены аналитические выражения для возмущенной резонансной частоты колебания  $H_{011}$  ЦОР при горизонтальном и аксиальном расположении исследуемой среды. Интерес к колебанию  $H_{011}$  вызван тем, что граничные условия силовых линий электрического поля имеют простой и наглядный вид. Они представляют собой замкнутые концентрические окружности. На рис. 1 показано направление электрических силовых линий этого колебания, которые будут касательны к объему пробы.

В качестве условной обкладки плоского конденсатора была выбрана выделенная плоскость  $ABCD$ , проходящая ось  $Z$  и по длине  $l$  резонатора (рис. 1). Замкнутые электрические силовые линии, имеющие только одну составляющую  $E_\varphi$ , начинаются на одном и заканчиваются на другом конце бесконечно тонкой и проводящей плоскости  $ABCD$ . Тогда резонансная частота системы на рис. 1 при условии сохранения структуры поля равна

$$\frac{\omega_{011}}{\omega_0} = \sqrt{\frac{C_{\text{эп}}}{C_{\text{эв}}}} = \sqrt{\frac{4 \left\{ \frac{\varepsilon_{\text{см}}}{\varepsilon_0} \left[ \frac{h}{l} - \frac{1}{2\pi} \sin\left(\frac{2\pi}{l} h\right) \right] + \left[ 1 - \frac{h}{l} + \frac{1}{2\pi} \sin\left(\frac{2\pi}{l} h\right) \right] \right\}}{\left\{ \frac{\varepsilon_{\text{см}}}{\varepsilon_0} \left[ 1 - \cos\left(\frac{\pi}{l} h\right) \right] + \left[ 1 + \cos\left(\frac{\pi}{l} h\right) \right] \right\}^2}}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_0, \mu_0$  – абсолютные диэлектрическая и магнитная проницаемости вакуума;  $\varepsilon_{\text{см}}$  – абсолютная диэлектрическая проницаемость исследуемой жидкости.

Эксперимент с использованием ЦОР ( $l = 10,37$  см,  $a = 3,75$  см добротность пустого измеренная на уровне половинной мощности составила 910) изготовленного из бронзы показал расхождимость модели (1) с экспериментальными значениями частот колебания  $H_{011}$ . В качестве исследуемой жидкости использовался авиационный керосин марки ТС-1 с известной влажностью и  $\varepsilon = 2,08$ . Расхождения объясняются концентрацией поля в исследуемом объеме (кривая 2 на рис. 1). Деформацию поля аппроксимируем следующим образом

$$\begin{cases} 0 \leq z \leq h: & E_\varphi = AE_{\varphi 0} \sin\left(\frac{\pi z}{2h}\right); \\ h \leq z \leq l: & E_\varphi = AE_{\varphi 0} e^{-\left\{ \frac{z\alpha_2}{l-h} \right\}}. \end{cases} \quad (2)$$

С учетом принятой аппроксимации поля резонансная частота и нагруженная добротность имеют следующий вид:

$$\frac{\omega_{\text{в}}}{\omega_{011}} = \sqrt{\frac{C_{\text{эп}}}{C_{\text{эв}}}} = \sqrt{\frac{4 \left[ \frac{h}{l} \frac{\varepsilon_{\text{см}}}{\varepsilon_0} + \left(1 - \frac{h}{l}\right) \frac{1}{\alpha_2} \right]}{\pi^2 \left[ \frac{2h}{\pi l} \frac{\varepsilon_{\text{см}}}{\varepsilon_0} + \left(1 - \frac{h}{l}\right) \frac{1}{\alpha_2} \right]^2}}; \quad (3)$$

$$Q(\gamma_{\text{ж}}) = \omega_{011} \varepsilon_0 \frac{\frac{h}{l} \frac{\varepsilon_{\text{см}}}{\varepsilon_0} + \left(1 - \frac{h}{l}\right) \frac{1}{\alpha_2}}{\left( V \gamma_{\text{ж}} \frac{h}{l} \right)} \alpha_1, \quad (4)$$

где  $\alpha_1$  – коэффициент, определяющий работу диода (линейный или квадратичный);  $\alpha_2$  – структуру деформированного поля  $H_{011}$ ;  $V$  – объемная концентрация растворенной влаги;  $\gamma_{\text{ж}}$  – удельная электропроводность воды, зависящая от температуры и частоты электромагнитного поля.

Подбором  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  осуществляем сходимость моделей нагруженной добротности и резонансной частоты с экспериментальными данными для фиксированных уровня,  $\varepsilon_{\text{см}}$  и объемной концентрации растворенной влаги. В частности, для  $\varepsilon_{\text{см}} = 2,08$ ,  $\rho_{\text{ТС1}} = 775$  кг/м<sup>3</sup>, процентного массового содержания растворенной влаги  $\%m = 0,007$  %, удельной электропроводности влаги на частоте 4600 МГц  $\gamma = 16$  См/м,

$\frac{h}{l} = 0,3f_{011}$ , рассчитанная по (1), равна 4432 МГц, а экспериментальное значение частоты – 4600 МГц. Поправочный коэффициент  $\alpha_2$  обеспечивающий сходимость модели (3) с экспериментальными данными равен 2,8. Экспериментальное значение добротности, измеренное на уровне половинной мощности, равно 720. Поправочный коэффициент  $\alpha_1$  обеспечивающий сходимость модели (4) с экспериментальными данными равен 1,19.

В качестве реализации одномодового СВЧ-резонаторного метода с использованием колебания  $H_{011}$  предложен метод определения малых концентраций влагосодержащих присадок в топливах. Способ рассмотрен на примере определения жидкости «И» в авиационном керосине.

Сущность метода состоит в следующем: измеряется  $Q_{\text{нагр}1}$  керосина с известной маркой без жидкости «И». Затем помещается в ЦОР керосин той же марки с неизвестным содержанием жидкости «И», измеряется  $Q_{\text{нагр}2}$ , далее добротность вызванную потерями в жидкости «И»  $Q_{\text{«И»}}$  находим следующим образом

$$\frac{1}{Q_{\text{«И»}}} = \frac{1}{Q_{\text{нагр}2}} - \frac{1}{Q_{\text{нагр}1}}, \quad (5)$$

используя (4) находим приращение объемного процентного содержания влаги за счет наличия жидкости «И» в керосине –  $V_2$ .

Далее, определяется объемное процентное содержание жидкости «И» в авиационном керосине

$$\%C = \frac{V_2}{K_t W_{\text{«И»}}} \cdot 10^4, \quad (6)$$

где  $W_{\text{«И»}}$  – объемное процентное содержание растворенной влаги в жидкости «И» (определяется сортом жидкости «И»);  $K_t$  – поправочный температурный коэффициент.

В диапазоне температур от 2 до 18 °С  $K_t$  аппроксимируется следующим образом

$$K_t = 2,45 - 0,11t, \quad 2 \leq t \leq 18. \quad (7)$$

Из (7) видно, что чувствительность к содержанию жидкости «И» растет при уменьшении температуры. Это объясняется уменьшением количества растворенной влаги в авиационном керосине и ростом потерь в растворенной влаге при охлаждении.

В табл. 1 приведены экспериментальные данные изменения полосы пропускания  $\Delta f$  на половинном уровне мощности, а с ней и абсолютное изменение величины нагруженной добротности  $\Delta Q$  от процентного содержания жидкости «И» (1 %, 0,5 %, 0,2 %) при трех различных температурах (18 °С, 10 °С, 2 °С).

Таблица 1

Параметр	Процентное содержание жидкости «И», %								
	1			0,5			0,2		
$t, ^\circ\text{C}$	18	10	2	18	10	2	18	10	2
$\Delta f, \text{МГц}$	0,5	1,5	2,8	0,3	0,8	1,3	<0,1	0,4	0,6
$\Delta Q$	18	50	85	11	28	44	4,3	14,5	21,5

Для следующих исходных данных:  $h/l = 0,3$ ; относительная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_{\text{см}} = 2,08$ ;  $Q_0 = 910$ ;  $Q(\gamma_{\text{ж}}) = 853$ ;  $Q_{\text{нагр}} = 440$  и температуре окружающей среды  $t = 18^\circ\text{C}$  порог чувствительности ПИП к содержанию жидкости «И» составляет  $\approx 0,1\%$  для первого сорта (0,2 % растворенной влаги).

Порог чувствительности уменьшается при снижении сортности. Для второго сорта (0,4 % растворенной влаги) – 0,065 %, для третьего сорта (0,6 % растворенной влаги) – 0,04 %.

При уменьшении температуры окружающей среды с 18 до 2 °С и увеличении добротности пустого ЦОР с 910 до 9000, переход с уровня  $h/l = 0,3$  на уровень  $h/l = 0,05$  чувствительность метода увеличивается примерно в 15 раз.

Третья глава «Разработка метода определения высоких значений влагосодержания с использованием СВЧ-преобразователей с двухмодовыми режимами» посвящена разработке метода опреде-

ления высоких значений влагосодержания с использованием СВЧ-преобразователей с двухмодовыми режимами.

Сущность метода заключается в следующем. Рассчитывается разность расщепленных частот  $\Delta f$  колебаний  $H_{011}$  и  $E_{111}$  для пустого ЦОР. Далее производится измерение разности частот ЦОР заполненного исследуемой жидкостью по ней определяется диэлектрическая проницаемость исследуемой жидкости. По диэлектрической проницаемости определяется значение объемного влагосодержания. В качестве информативного параметра влагосодержания предлагается использовать разность расщепленных частот  $\Delta f$  колебаний  $H_{011}$  и  $E_{111}$  ЦОР. Методика расчета  $\Delta f$  на основе МЭП и ММВ заключается в следующем. Рассчитывается возмущенная частота колебания  $H_{011}$  методом «эквивалентной емкости» например, при аксиальном расположении трубопровода с исследуемой жидкостью:

$$\omega_{011} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} \sqrt{\left(\frac{3,832}{a}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{l}\right)^2} \frac{A\{B + (\varepsilon_{ж} - 1)D\}^{1/2}}{\{A + (\varepsilon_{ж} - 1)C\}^{1/2}}; \quad (8)$$

$$A = \int_0^a J_1\left(\frac{3,832}{a}r\right) dr; \quad B = \int_0^a J_1^2\left(\frac{3,832}{a}r\right) r dr; \quad C = \int_0^b J_1\left(\frac{3,832}{a}r\right) dr; \quad D = \int_0^b J_1^2\left(\frac{3,832}{a}r\right) r dr.$$

Далее рассчитываются возмущенные частоты двух колебаний ММВ

$$\frac{\Delta\omega_{H_{011}}}{\omega_{H_{011}}} = \frac{\Delta W_{H_{011}}}{W_{0H_{011}}}; \quad \frac{\Delta\omega_{E_{111}}}{\omega_{E_{111}}} = \frac{\Delta W_{E_{111}}}{W_{0E_{111}}}, \quad (9)$$

где  $\Delta\omega_{H_{011}}$ ,  $\Delta\omega_{E_{111}}$  – приращение частот;  $\Delta W_{H_{011}}$ ,  $\Delta W_{E_{111}}$  – приращение энергий;  $W_{0H_{011}}$ ,  $W_{0E_{111}}$  – энергия поля пустого ЦОР с колебаниями  $H_{011}$  и  $E_{111}$  соответственно. В конечном виде разность частот:

$$\omega_{H_{011}} - \omega_{E_{111}} = \omega_{H_{011}} \left\{ \frac{\Delta W_{H_{011}}}{W_{H_{011}}} - \frac{\Delta W_{E_{111}}}{W_{E_{111}}} \right\}. \quad (10)$$

Выражение (10) для аксиального расположения среды имеет вид:

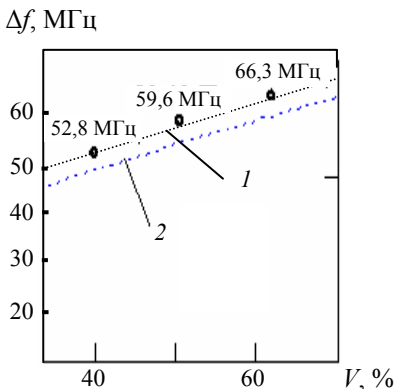
$$\omega_{H_{011}} - \omega_{E_{111}} = \omega_{H_{011}} \left\{ \frac{\frac{4}{3,832^2} \frac{a^2 \pi^2}{l^2} G + 4D + \frac{4}{3,832^4} \frac{a^2 \pi^2}{l^2} F}{\frac{4}{3,832^2} \frac{a^2 \pi^2}{l^2} K + 4D + \frac{4}{3,832^4} \frac{a^2 \pi^2}{l^2} E} - \frac{D}{B} \right\} \left( \frac{\varepsilon_{см}}{\varepsilon_0} - 1 \right), \quad (11)$$

где  $E = \int_0^b J_1^2\left(\frac{3,832}{a}r\right) \frac{1}{r} dr$ ;  $G = \int_0^b J_0^2\left(\frac{3,832}{a}r\right) r dr$ ;

$$F = \int_0^a J_1^2\left(\frac{3,832}{a}r\right) \frac{1}{r} dr; \quad K = \int_0^a J_0^2\left(\frac{3,832}{a}r\right) r dr,$$

где  $J_0(\dots)$ ,  $J_1(\dots)$  – функции Бесселя 1-го рода нулевого и первого порядков соответственно.

На рис. 2 приведены теоретическая и экспериментальная зависимости разности частот колебаний от объемного процентного содержания влаги. Расхождение теоретических и экспериментальных данных объясняется наличием растворенной влаги в концентрированном этиленгликоле.



На рис. 3 показана экспериментальная зависимость тока детектора, при изменении частоты питающего генератора СВЧ. Параметры измерительной ячейки: длина ЦОР  $l = 60$  мм, радиус ЦОР  $a = 35$  мм,  $b/a = 0,1$ , где  $b$  – радиус трубопровода; исследуемая жидкость – этиленгликоль с 40 – 60 % содержанием воды. Из графиков видно, что, устано-

**Рис. 2 Теоретическая и экспериментальная зависимости частот колебаний  $H_{011}$  и  $E_{111}$  от объемного процентного содержания растворенной влаги кривые 2 и 1 соответственно**

вив определенный порог можно отсеleccionировать колебания кроме основных  $H_{011}$  и  $E_{111}$ . Из двух колебаний  $H_{011}$  и  $E_{111}$  необязательно определять тип колебания, так как измеряется разность резонансных частот, что устраняет возможность перепутывания типов колебаний. В связи с этим нет необходимости применения специальных фильтров колебаний, снижающих также добротность и основного колебания.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**Актуальность темы.** Интенсивное развитие современной автомобильной и авиационной техники диктует особые требования к качеству используемых горючесмазочных материалов (ГСМ), от которых зависит безаварийная эксплуатация и долговечность работы. В частности, в настоящее время очень высокие требования предъявляются к авиационным горюче-смазочным материалам, таким как авиационный керосин, содержащий жидкость «И» (моноэтиловый эфир этиленгликоля). Так содержание растворенной влаги в авиационном керосине не превышает 0,01 % от общей массы керосина. Добавка жидкости «И» содержащей растворенную влагу (в зависимости от сортности 0,2 – 0,6 %), увеличивает процентное содержание влаги. В зависимости от температуры добавляется от 0,1 до 0,3 %. Жидкость «И» связывает растворенную влагу, не давая ей образовывать капли (эмульсию). Очень актуальна проблема определения качества бензина (повышение октанового числа путем добавления различных примесей, содержащих растворенную влагу). Актуальным также является определение процентного содержания растворенной влаги жидких ГСМ, имеющих высокое значение процентного содержания растворенной влаги (например, этиленгликоль от 40 до 60 % влаги) как в процессе производства, так и перед непосредственным использованием.

Диэлькометрические и кондуктометрические методы ВЧ диапазона обладают или низкой чувствительностью, или высокой погрешностью, вызванной в частности, засоленностью влаги. СВЧ-методы на «прохождение» и «отражение» сложны в реализации и требуют дорогостоящей реализации. Известные СВЧ резонаторные методы являются только лабораторными.

Поэтому оперативное определение электрофизических параметров горюче-смазочных материалов с использованием первичного измерительного преобразователя (ПИП) на основе цилиндрического объемного резонатора (ЦОР).

Известно, что интегральные характеристики СВЧ-систем с распределенными параметрами (объемный резонатор (ОР)) – резонансная частота и добротность весьма чувствительны к изменению электрофизических характеристик сред, частично заполняющих объемный резонатор.

**Цель работы.** Разработать экспресс-метод определения объемного процентного содержания влаго-содержащих присадок в топливах с использованием одномодового режима СВЧ-преобразователей, обладающий высокой чувствительностью и точностью. Разработать метод и реализующее его устройство определения высоких значений влагосодержания в ГСМ с использованием нового двухмодового режима СВЧ-преобразователей. Разработать простой в реализации многомодовый СВЧ-метод определения влагосодержания ГСМ, позволяющий определять не только растворенную, но и взвешенную влагу.

**Методы исследования** основаны на применении аппарата математической физики, теории электродинамики, математического моделирования, компьютерных технологий и метрологии.

**Научная новизна.** Разработан экспресс-метод определения объемного процентного содержания присадок имеющих собственную растворенную влагу в топливах, с использованием одномодового режима СВЧ-преобразователей обладающий высокой чувствительностью и точностью. Теоретической основой метода являются полученные модели для резонансной частоты и добротности колебания  $H_{011}$  ЦОР при горизонтальном расположении исследуемой среды для случая деформации электрического поля  $E_\phi$ , учитывающего концентрацию поля в исследуемой среде. Предложен новый двухмодовый метод определения высоких значений влагосодержания в ГСМ. С этой целью произведен расчет разности



резонансных частот колебаний  $H_{011}$  и  $E_{111}$  ЦОР при аксиальном расположении трубопровода с исследуемой жидкостью. Разработан простой в реализации многомодовый СВЧ-метод определения влагосодержания ГСМ, позволяющий определять не только растворенную, но и взвешенную влагу.

**Практическая ценность** работы заключается в следующем. По экспериментальным данным предложена методика выбора поправочных коэффициентов  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  в моделях возмущенной частоты и нагруженной добротности соответственно. Разработано устройство для определения процентного содержания растворенной влаги в жидкостях с высоким значением влагосодержания, реализующее двухмодовый метод. Предложена конструкция генератора СВЧ на основе коаксиального объемного резонатора (КОР) с закороченной емкостью, обеспечивающего широкую и прецизионную перестройку частоты. Предложена методика выбора конструктивных параметров КОР и ЦОР из условия их частотного согласования. Разработано устройство, реализующее многомодовый термовлагометрический СВЧ-метод определения влагосодержания ГСМ. Все устройства позволяют оперативно контролировать качество ГСМ.

**Реализация результатов.** Результаты теоретических и экспериментальных исследований прошли испытания в службе ГСМ в/ч 21350 и рекомендованы к внедрению. Они также используются в научно-исследовательской работе «Датчик», выполняемой по заданию главнокомандующего ВВС.

**Апробация работы.** Основные научные и практические результаты исследований по теме диссертации докладывались на: VII Всероссийской научно-технической конференции «Состояние и проблемы измерений»

(г. Москва, 2000 г.), Международной научной конференции «Измерения, контроль, информатизация» (г. Барнаул, 2001 г.), IV Международной теплофизической школе «Теплофизические измерения в начале XXI

века»

(г. Тамбов, 2001 г.), на Всероссийской научно-технической конференции «Информационные системы и технологии» (г. Нижний Новгород, 2002 г.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 10 научных работ, на одно разработанное устройство получен патент РФ на изобретение.

**Структура и объем работы.** Диссертация содержит введение, четыре главы, заключение, изложенные на 124 страницах машинописного текста, рисунках и таблицах. Список литературы включает 51 наименований.

Особую благодарность за научные консультации автор выражает доктору технических наук, профессору Дмитриеву Дмитрию Александровичу и кандидату технических наук, доценту Сулину Михаилу Алексеевичу.

## СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

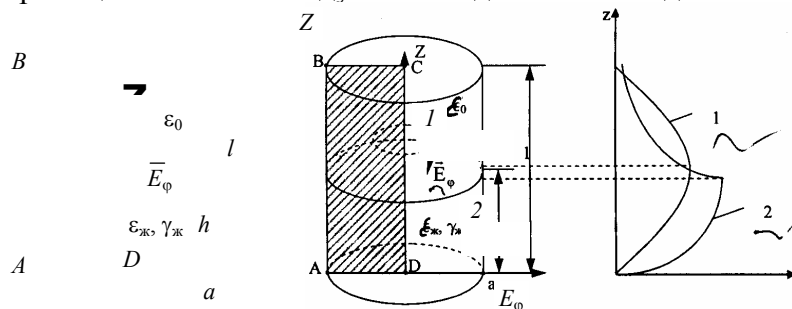
Во **введении** приведено обоснование актуальности темы диссертации. Раскрыта научная новизна и практическая ценность, приведены результаты апробации и реализации научно-технических результатов работы.

В первой главе «**Обзор и классификация методов измерения влажности**» приведен обзор и классификация существующих методов измерения влажности.

Обзор прямых методов измерения влажности жидких сред показал, что метод сушки неприемлем для измерения процентного содержания растворенной влаги, известный метод Фишера является лабораторным и требует сложной аппаратной реализации. Известные косвенные методы – механические, радиометрические, оптические, теплофизические обладают низкой чувствительностью, либо требуют сложной дорогостоящей реализации, или субъективны. Электрические методы диапазона ВЧ (кондуктометрические, диэлькометрические) обладают низкой чувствительностью при измерении малых значений влагосодержания (<0,1 %) или высокой относительной погрешностью (>5 %) при измерении больших значений влагосодержания (>1 %). СВЧ-методы измерения влажности с использованием методов на прохождение и отражение обладают высокой чувствительностью, но сложны в реализации, требуют дорогостоящей аппаратуры, узкодиапазонны. При измерении процентного содержания влаги в жидкостях с высокой влажностью основным недостатком является низкая точность измерения. Известные СВЧ-резонаторные методы являются лабораторными. Их недостаток – трудоемкость измерений, необходимость фильтрации паразитных колебаний, что уменьшает добротность основного, применение специальных мер, устраняющих влияние теплового изменения размеров цилиндрических объемных резонаторов ЦОР. Недостатком также является невозможность отдельного определения объемного процентного содержания растворенной и осажденной влаги. На основании вышеуказанного определены цели и задачи исследования.

Вторая глава «**Разработка метода определения малых концентраций влагосодержащих присадок в топливах с использованием одномодового режима СВЧ-преобразователей на основе ЦОР**» посвящена разработке теоретических основ определения влагосодержания с использованием СВЧ-

преобразователей на основе ЦОР. Обзор методов резонансных частот ЦОР показал, что погрешность метода «малых возмущений» (ММВ) растет с увеличением возмущающего объема, диэлектрической и магнитной проницаемостей исследуемой жидкости. Метод «сшивания»



**Рис. 1** Расчетная схема «возмущенной» резонансной частоты колебания  $H_{011}$  ЦОР:

1 – недеформированная структура поля; 2 – деформация поля

адекватен, однако, применим только для расчета колебаний типа  $H_{01p}$  с горизонтальным и аксиальным расположением исследуемой среды, и для получения аналитического выражения для резонансной частоты необходимо решить сложное трансцендентное уравнение относительно коэффициента распространения. Метод «эквивалентных» параметров (МЭП) позволяет получить аналитическое выражение для резонансной частоты.

Методом «эквивалентной емкости» получены аналитические выражения для возмущенной резонансной частоты колебания  $H_{011}$  ЦОР при горизонтальном и аксиальном расположении исследуемой среды. Интерес к колебанию  $H_{011}$  вызван тем, что граничные условия силовых линий электрического поля имеют простой и наглядный вид. Они представляют собой замкнутые концентрические окружности. На рис. 1 показано направление электрических силовых линий этого колебания, которые будут касательны к объему пробы.

В качестве условной обкладки плоского конденсатора была выбрана выделенная плоскость  $ABCD$ , проходящая ось  $Z$  и по длине  $l$  резонатора (рис. 1). Замкнутые электрические силовые линии, имеющие только одну составляющую  $E_\phi$ , начинаются на одном и заканчиваются на другом конце бесконечно тонкой и проводящей плоскости  $ABCD$ . Тогда резонансная частота системы на рис. 1 при условии сохранения структуры поля равна

$$\frac{\omega_{011}}{\omega_0} = \sqrt{\frac{C_{\text{эп}}}{C_{\text{эв}}}} = \sqrt{\frac{4 \left\{ \frac{\varepsilon_{\text{см}}}{\varepsilon_0} \left[ \frac{h}{l} - \frac{1}{2\pi} \sin\left(\frac{2\pi}{l} h\right) \right] + \left[ 1 - \frac{h}{l} + \frac{1}{2\pi} \sin\left(\frac{2\pi}{l} h\right) \right] \right\}}{\left\{ \frac{\varepsilon_{\text{см}}}{\varepsilon_0} \left[ 1 - \cos\left(\frac{\pi}{l} h\right) \right] + \left[ 1 + \cos\left(\frac{\pi}{l} h\right) \right] \right\}^2}}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_0$ ,  $\mu_0$  – абсолютные диэлектрическая и магнитная проницаемости вакуума;  $\varepsilon_{\text{см}}$  – абсолютная диэлектрическая проницаемость исследуемой жидкости.

Эксперимент с использованием ЦОР ( $l = 10,37$  см,  $a = 3,75$  см добротность пустого измеренная на уровне половинной мощности составила 910) изготовленного из бронзы показал расхождение модели (1) с экспериментальными значениями частот колебания  $H_{011}$ . В качестве исследуемой жидкости использовался авиационный керосин марки ТС-1 с известной влажностью и  $\varepsilon = 2,08$ . Расхождения объясняются концентрацией поля в исследуемом объеме (кривая 2 на рис. 1). Деформацию поля аппроксимируем следующим образом

$$\begin{cases} 0 \leq z \leq h: & E_\phi = AE_{\phi 0} \sin\left(\frac{\pi z}{2h}\right); \\ h \leq z \leq l: & E_\phi = AE_{\phi 0} e^{-\left\{ \frac{z\alpha_2}{l-h} \right\}}. \end{cases} \quad (2)$$

С учетом принятой аппроксимации поля резонансная частота и нагруженная добротность имеют следующий вид:

$$\frac{\omega_{\text{в}}}{\omega_{011}} = \sqrt{\frac{C_{\text{эп}}}{C_{\text{эв}}}} = \sqrt{\frac{4 \left[ \frac{h}{l} \frac{\varepsilon_{\text{см}}}{\varepsilon_0} + \left(1 - \frac{h}{l}\right) \frac{1}{\alpha_2} \right]}{\pi^2 \left[ \frac{2h}{\pi l} \frac{\varepsilon_{\text{см}}}{\varepsilon_0} + \left(1 - \frac{h}{l}\right) \frac{1}{\alpha_2} \right]^2}}; \quad (3)$$

$$Q(\gamma_{\text{ж}}) = \omega_{011} \varepsilon_0 \frac{\frac{h}{l} \frac{\varepsilon_{\text{см}}}{\varepsilon_0} + \left(1 - \frac{h}{l}\right) \frac{1}{\alpha_2}}{\left( V \gamma_{\text{ж}} \frac{h}{l} \right)} \alpha_1, \quad (4)$$

где  $\alpha_1$  – коэффициент, определяющий работу диода (линейный или квадратичный);  $\alpha_2$  – структуру деформированного поля  $H_{011}$ ;  $V$  – объемная концентрация растворенной влаги;  $\gamma_{\text{ж}}$  – удельная электропроводность воды, зависящая от температуры и частоты электромагнитного поля.

Подбором  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  осуществляем сходимость моделей нагруженной добротности и резонансной частоты с экспериментальными данными для фиксированных уровня,  $\varepsilon_{\text{см}}$  и объемной концентрации растворенной влаги. В частности, для  $\varepsilon_{\text{см}} = 2,08$ ,  $\rho_{\text{ТС1}} = 775 \text{ кг/м}^3$ , процентного массового содержания растворенной влаги  $\%m = 0,007 \%$ , удельной электропроводности влаги на частоте  $4600 \text{ МГц}$   $\gamma = 16 \text{ См/м}$ ,  $\frac{h}{l} = 0,3 f_{011}$ , рассчитанная по (1), равна  $4432 \text{ МГц}$ , а экспериментальное значение частоты –  $4600 \text{ МГц}$ . Поправочный коэффициент  $\alpha_2$  обеспечивающий сходимость модели (3) с экспериментальными данными равен  $2,8$ . Экспериментальное значение добротности, измеренное на уровне половинной мощности, равно  $720$ . Поправочный коэффициент  $\alpha_1$  обеспечивающий сходимость модели (4) с экспериментальными данными равен  $1,19$ .

В качестве реализации одномодового СВЧ-резонаторного метода с использованием колебания  $H_{011}$  предложен метод определения малых концентраций влагосодержащих присадок в топливах. Способ рассмотрен на примере определения жидкости «И» в авиационном керосине.

Сущность метода состоит в следующем: измеряется  $Q_{\text{нагр1}}$  керосина с известной маркой без жидкости «И». Затем помещается в ЦОР керосин той же марки с неизвестным содержанием жидкости «И», измеряется  $Q_{\text{нагр2}}$ , далее добротность вызванную потерями в жидкости «И»  $Q_{\text{«И»}}$  находим следующим образом

$$\frac{1}{Q_{\text{«И»}}} = \frac{1}{Q_{\text{негр2}}} - \frac{1}{Q_{\text{негр1}}}, \quad (5)$$

используя (4) находим приращение объемного процентного содержания влаги за счет наличия жидкости «И» в керосине –  $V_2$ .

Далее, определяется объемное процентное содержание жидкости «И» в авиационном керосине

$$\%C = \frac{V_2}{K_t W_{\text{«И»}}} 10^4, \quad (6)$$

где  $W_{\text{«И»}}$  – объемное процентное содержание растворенной влаги в жидкости «И» (определяется сортом жидкости «И»);  $K_t$  – поправочный температурный коэффициент.

В диапазоне температур от  $2$  до  $18 \text{ }^\circ\text{C}$   $K_t$  аппроксимируется следующим образом

$$K_t = 2,45 - 0,11t, \quad 2 \leq t \leq 18. \quad (7)$$

Из (7) видно, что чувствительность к содержанию жидкости «И» растет при уменьшении температуры. Это объясняется уменьшением количества растворенной влаги в авиационном керосине и ростом потерь в растворенной влаге при охлаждении.

В табл. 1 приведены экспериментальные данные изменения полосы пропускания  $\Delta f$  на половинном уровне мощности, а с ней и абсолютное изменение величины нагруженной добротности  $\Delta Q$  от процентного содержания жидкости «И» ( $1 \%$ ,  $0,5 \%$ ,  $0,2 \%$ ) при трех различных температурах ( $18 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $2 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

Параметр	Процентное содержание жидкости «И», %								
	1			0,5			0,2		
$t, ^\circ\text{C}$	18	10	2	18	10	2	18	10	2
$\Delta f, \text{МГц}$	0,5	1,5	2,8	0,3	0,8	1,3	<0,1	0,4	0,6
$\Delta Q$	18	50	85	11	28	44	4,3	14,5	21,5

Для следующих исходных данных:  $h/l = 0,3$ ; относительная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_{\text{см}} = 2,08$ ;  $Q_0 = 910$ ;  $Q(\gamma_{\text{ж}}) = 853$ ;  $Q_{\text{нагр}} = 440$  и температуре окружающей среды  $t = 18 ^\circ\text{C}$  порог чувствительности ПИП к содержанию жидкости «И» составляет  $\approx 0,1$  % для первого сорта (0,2 % растворенной влаги).

Порог чувствительности уменьшается при снижении сортности. Для второго сорта (0,4 % растворенной влаги) – 0,065 %, для третьего сорта (0,6 % растворенной влаги) – 0,04 %.

При уменьшении температуры окружающей среды с 18 до 2  $^\circ\text{C}$  и увеличении добротности пустого ЦОР с 910 до 9000, переход с уровня  $h/l = 0,3$  на уровень  $h/l = 0,05$  чувствительность метода увеличивается примерно в 15 раз.

Третья глава «Разработка метода определения высоких значений влагосодержания с использованием СВЧ-преобразователей с двухмодовыми режимами» посвящена разработке метода определения высоких значений влагосодержания с использованием СВЧ-преобразователей с двухмодовыми режимами.

Сущность метода заключается в следующем. Рассчитывается разность расщепленных частот  $\Delta f$  колебаний  $H_{011}$  и  $E_{111}$  для пустого ЦОР. Далее производится измерение разности частот ЦОР заполненного исследуемой жидкостью по ней определяется диэлектрическая проницаемость исследуемой жидкости. По диэлектрической проницаемости определяется значение объемного влагосодержания. В качестве информативного параметра влагосодержания предлагается использовать разность расщепленных частот  $\Delta f$  колебаний  $H_{011}$  и  $E_{111}$  ЦОР. Методика расчета  $\Delta f$  на основе МЭП и ММВ заключается в следующем. Рассчитывается возмущенная частота колебания  $H_{011}$  методом «эквивалентной емкости» например, при аксиальном расположении трубопровода с исследуемой жидкостью:

$$\omega_{011} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \sqrt{\left(\frac{3,832}{a}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{l}\right)^2} \frac{A\{B + (\epsilon_{\text{ж}} - 1)D\}^{1/2}}{\{A + (\epsilon_{\text{ж}} - 1)C\}^{1/2}}; \quad (8)$$

$$A = \int_0^a J_1\left(\frac{3,832}{a}r\right)dr; \quad B = \int_0^a J_1^2\left(\frac{3,832}{a}r\right)rdr; \quad C = \int_0^b J_1\left(\frac{3,832}{a}r\right)dr; \quad D = \int_0^b J_1^2\left(\frac{3,832}{a}r\right)rdr.$$

Далее рассчитываются возмущенные частоты двух колебаний ММВ

$$\frac{\Delta\omega_{H_{011}}}{\omega_{H_{011}}} = \frac{\Delta W_{H_{011}}}{W_{0H_{011}}}; \quad \frac{\Delta\omega_{E_{111}}}{\omega_{E_{111}}} = \frac{\Delta W_{E_{111}}}{W_{0E_{111}}}, \quad (9)$$

где  $\Delta\omega_{H_{011}}$ ,  $\Delta\omega_{E_{111}}$  – приращение частот;  $\Delta W_{H_{011}}$ ,  $\Delta W_{E_{111}}$  – приращение энергий;  $W_{0H_{011}}$ ,  $W_{0E_{111}}$  – энергия поля пустого ЦОР с колебаниями  $H_{011}$  и  $E_{111}$  соответственно. В конечном виде разность частот:

$$\omega_{H_{011}} - \omega_{E_{111}} = \omega_{H_{011}} \left\{ \frac{\Delta W_{H_{011}}}{W_{H_{011}}} - \frac{\Delta W_{E_{111}}}{W_{E_{111}}} \right\}. \quad (10)$$

Выражение (10) для аксиального расположения среды имеет вид:

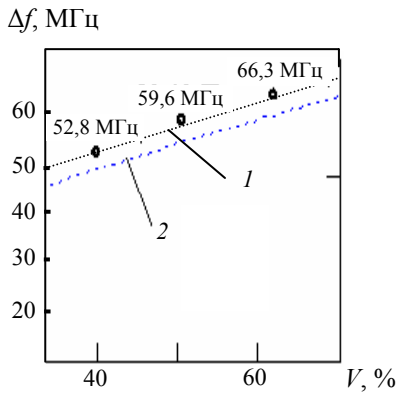
$$\omega_{H_{011}} - \omega_{E_{111}} = \omega_{H_{011}} \left\{ \frac{\frac{4}{3,832^2} \frac{a^2 \pi^2}{l^2} G + 4D + \frac{4}{3,832^4} \frac{a^2 \pi^2}{l^2} F}{\frac{4}{3,832^2} \frac{a^2 \pi^2}{l^2} K + 4D + \frac{4}{3,832^4} \frac{a^2 \pi^2}{l^2} E} - \frac{D}{B} \right\} \left( \frac{\epsilon_{\text{см}}}{\epsilon_0} - 1 \right), \quad (11)$$

где  $E = \int_0^b J_1^2\left(\frac{3,832}{a}r\right) \frac{1}{r} dr$ ;  $G = \int_0^b J_0^2\left(\frac{3,832}{a}r\right) r dr$ ;

$$F = \int_0^a J_1^2\left(\frac{3,832}{a}r\right) \frac{1}{r} dr; \quad K = \int_0^a J_0^2\left(\frac{3,832}{a}r\right) r dr,$$

где  $J_0(\dots)$ ,  $J_1(\dots)$  – функции Бесселя 1-го рода нулевого и первого порядков соответственно.

На рис. 2 приведены теоретическая и экспериментальная зависимости разности частот колебаний от объемного процентного содержания влаги. Расхождение теоретических и экспериментальных данных объясняется наличием растворенной влаги в концентрированном этиленгликоле.



**Рис. 2** Теоретическая и экспериментальная зависимости разности частот колебаний  $H_{011}$  и  $E_{111}$  от объемного процентного содержания растворенной влаги кривые 2 и 1 соответственно

На рис. 3 показана экспериментальная зависимость тока детектора, при изменении частоты питающего генератора СВЧ. Параметры измерительной ячейки: длина ЦОР  $l = 60$  мм, радиус ЦОР  $a = 35$  мм,  $b/a = 0,1$ , где  $b$  – радиус трубопровода; исследуемая жидкость – этиленгликоль с 40 – 60 % содержанием воды. Из графиков видно, что, установив определенный порог можно отсеleccionировать колебания кроме основных  $H_{011}$  и  $E_{111}$ . Из двух колебаний  $H_{011}$  и  $E_{111}$  необязательно определять тип колебания, так как измеряется разность резонансных частот, что устраняет возможность перепутывания типов колебаний. В связи с этим нет необходимости применения специальных фильтров колебаний, снижающих также добротность и основного колебания.