

## МИКРОВОЛНОВОЙ ТЕРМОВЛАГОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

М.А. Суслин<sup>1</sup>, В.А. Тетушкин<sup>2</sup>, В.Н. Чернышов<sup>2</sup>, Д.А. Дмитриев<sup>1</sup>

*Тамбовский военный авиационный инженерный институт (1);  
Кафедра “Криминалистика и информатизация  
правовой деятельности” (2), ТГТУ*

*Представлена членом редколлегии профессором В.И. Коноваловым*

**Ключевые слова и фразы:** измерение содержания воды; органические соединения; СВЧ нагрев; электромагнитная волна.

**Аннотация:** Предложен СВЧ метод определения влажности органических соединений, основанный на контрастном поглощении энергии электромагнитной волны водой и жидким диэлектриком. Дано описание конструкции и принципа действия устройства, реализующего разработанный метод. Приведены результаты экспериментальных исследований.

### Обозначения и аббревиатуры

$C$ – скорость света, м/с;	$W$ – влажность, %;
$E$ – напряженность, В/м;	$w_{\text{ср}}$ – средняя частота, Гц;
$f$ – резонансная частота, Гц;	$\lambda$ – длина волны, м;
$N$ – число мод;	АЦП – аналого-цифровой преобразователь;
$P$ – мощность, Вт;	МПУ – микропроцессорное устройство;
$T$ – температура, °С	ПИП – первичный измерительный преобразователь;
$t_{\text{вз}}$ – время взаимодействия, с;	СВЧ – сверхвысокие частоты;
$Q$ – добротность;	ЭМ – электромагнитная волна.
$V$ – объем камеры, м <sup>3</sup> ;	

Измерение содержания воды в различных веществах имеет большое прикладное значение. Органические соединения (к ним относятся бензин, керосин, в том числе и авиационный, машинное, трансформаторное масло и т.д.) в процессе эксплуатации в различных устройствах и механизмах имеют свойство накапливать воду, теряя при этом свои эксплуатационные характеристики.

При превышении содержания воды в трансформаторном масле выше 50 г/т может возникнуть пробой, что приведет к выходу трансформатора из строя [1]. Наличие влаги в авиационном керосине, в том числе и за счет наличия жидкости «И» (моноэтиловый эфир этиленгликоля), содержащей растворенную влагу, является одним из определяющих факторов, который влияет на безопасность полетов авиации. Освоение диапазона СВЧ открывает новые возможности для контроля влажности.

Реализация метода по фазовому набегу через исследуемый объем электромагнитной (ЭМ) волны в волноводе позволяет получить высокую точность в узком диапазоне (0,01 % в пределах 2 % – изменения влажности) или контролировать влажность  $W < 0,1$  % [2]. Определение ослабления (до 50 дБ) позволяет получить широкий диапазон измерения (от 0,1 до 100 %), либо обеспечить высокую

чувствительность (1 г/т) в диапазоне  $W = 0,001 \dots 0,01$  % содержания воды, например, трансформаторном масле [1]. В резонаторном методе [3] выходными величинами первичного измерительного преобразования (ПИП) служат вызванные введением исследуемого материала изменения параметров объемного резонатора (ОР): резонансной частоты  $\Delta f = f - f_0$  и добротности  $\Delta Q = Q - Q_0$  ( $f_0$  и  $Q_0$  – значения собственных (ненагруженных) параметров резонатора). За счет локализации поля в полости резонатора метод обладает высокой чувствительностью, а также создается возможность измерения влагосодержания образцов малой массы.

Недостатками приведенных методов являются:

- необходимость в наличии образца определенной формы и размера, так как образец помещается в строго определенное место ОР или волновода, структура одномодового поля строго определена и неравномерна в пространственной полости ОР (волновода);

- сложная аппаратная реализация (наличие вентилей, циркуляторов, амплитудного или фазового детектора, смесителя, измерителя добротности, частотомера, управляемого по частоте генератора СВЧ);

- необходимость в настройке при изменении геометрических размеров ОР или волновода, вызванных изменением температуры окружающей среды (что особенно важно в полевых условиях);

- возможность вырождения колебаний, вызывающая дополнительную погрешность, а применение поляризационных фильтров колебаний снижает добротность основного типа колебания и усложняет конструкцию ПИП.

Нами предлагается новый СВЧ метод определения влажности органических соединений, основанный на контрастном поглощении энергии ЭМ поля водой и жидким диэлектриком. Исследуемый образец подвергается СВЧ нагреву в специальном объеме (зоне взаимодействия) – мультимодовом объемном резонаторе. Характерные размеры этой полости выбираются много больше длины волны ( $\lambda_T$ ) питающего генератора СВЧ. Это обеспечивает возможность реализации в ненагруженном состоянии множества колебаний (вырожденных и невырожденных) разной пространственной структуры так, что распределение поля (напряженности  $E$ ) практически равномерно в замкнутой металлической полости.

Функциональная схема устройства представлена на рис. 1. Для улучшения равномерности поля дополнительно используется линейная частотная модуляция (ЛЧМ), а также возбуждение тремя синфазными щелями (позиции 1, 2, 3 на рис. 1). Размеры  $R$  и  $l$  выбираются из условия максимума числа мод в полосе девиации  $\Delta f_d(\Delta\omega_d)$ . Согласно формуле Релея число мод  $\Delta N$  в объеме резонансной цилиндрической камеры  $V = \pi R^2 l$

$$\Delta N = \frac{V \omega_{cp}^2 \Delta \omega_d}{2\pi^2 C^3}, \quad (1)$$

где  $\omega_{cp} = 2\pi f_{cp}$  – средняя частота ЛЧМ модулирующей несущей;  $C$  – скорость света.

Математическое моделирование спектра мод в полосе  $\frac{\Delta f_d}{f_{cp}} < 1$  % (при  $Q_{нагр}$

каждой моды  $\approx 100$ ), позволяет оценить число мод (для  $R = 0,05$  м и  $l = 0,15$  м) как 150...200 для  $\lambda_{cp} = 3$  см. Кроме того величина  $R$  должна быть равна

$$R = \frac{3n\lambda_{cp}}{2\pi} \quad (\text{обычно } n = 5 \dots 10).$$

Сущность метода заключается в следующем. Фиксируется выходная мощность питающего генератора СВЧ  $P_{вых} = \text{const}$ ; фиксируется время взаимодейст-

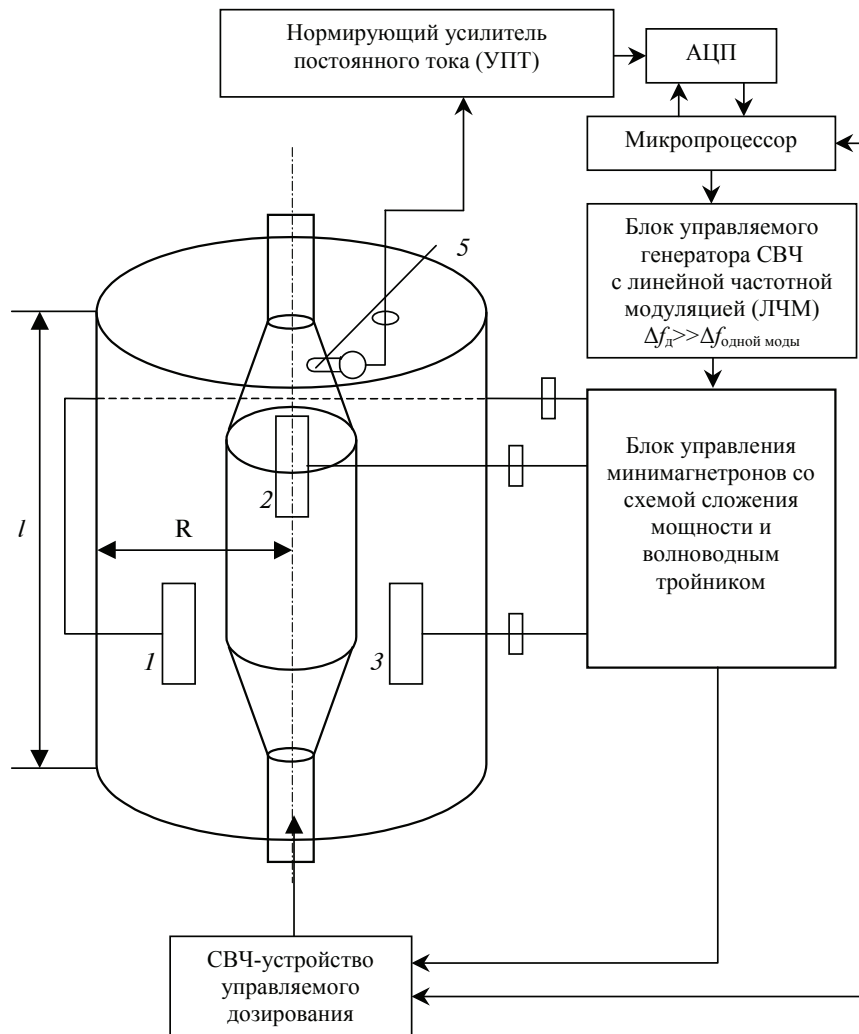


Рис. 1 СВЧ-влажномер стоячей волны

вия ( $t_{\text{взаимод}}$ ) влажного, жидкого или твердого образца с полем многих мод в замкнутом объеме  $t_{\text{взаимод}} = \text{const}$ ; измеряется температура образца перед помещением в замкнутый объем  $T_1$ , °С, а затем температура  $T_2$ , °С образца после  $t_{\text{взаимод}}$ . По величине  $\Delta T = T_2 - T_1$  определяют абсолютную влажность.

В качестве иллюстрации метода рассмотрим СВЧ-нагрев авиационного керосина марки РТ в СВЧ-объеме ( $\lambda_{\Gamma} \approx 12,7$  см). В данном СВЧ-объеме дополнительно используется вращающийся дефлектор для улучшения равномерности поля (дополнительные излучающие щели и сканирование частоты генератора СВЧ в конструкции не предусмотрено). На оси ординат графика (рис. 2) показан абсолютный прирост температуры  $\Delta T$  после СВЧ нагрева чистого керосина (линия 1) и того же керосина, но с 0,2 % добавкой жидкости «И» (линия 2); на оси абсцисс показана начальная температура нагрева керосина. Как известно, с ростом температуры количество растворенной влаги в керосине растет, но как видно из графика (линия 1) прирост абсолютной температуры остается практически постоянным. На наш взгляд, это объясняется тем, что с ростом температуры количество рас-

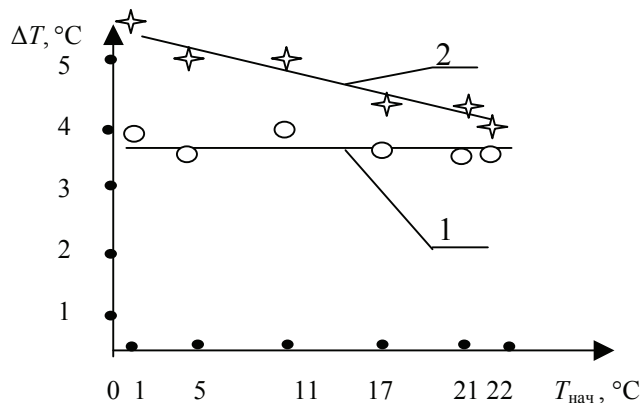


Рис. 2 Линии нагрева

творенной влаги увеличивается, но при этом уменьшаются резонансные потери в воде, которые примерно пропорциональны количеству растворенной влаги.

Из анализа хода линии № 2 можно сделать вывод: чувствительность к содержанию в керосине жидкости «И» увеличивается с уменьшением температуры примерно в 5 раз с уменьшением начальной температуры нагрева с 21 до 2 °С. На графике (рис. 3) представлены зависимости разности абсолютных температур нагрева авиационного керосина марки РТ с жидкостью «И».

В зависимости от температуры окружающей среды в авиационный керосин добавляется 0,1...0,3 % жидкости «И», которая связывает растворенную влагу, не давая ей образовывать мелкие капли (эмульсию). Линия 1 соответствует нагреву в течение  $t = 30$  с и непрерывной мощности магнетрона  $P_M = 600$  Вт; линия 2 – нагреву в течение 1 мин и  $P_M = 600$  Вт. Начальная температура нагрева в эксперименте в зависимости от опыта лежала в пределах  $T_{нач} = 17,4...17,8$  °С. На рис. 3 величина  $\Delta T = T_{\text{И}} - T_{\text{чистый керосин}}$ .

Абсолютную инструментальную погрешность (за счет погрешности двух электронных термометров и неравномерности поля) можно оценить как  $\pm 0,1$  °С. Оценка данной погрешности производилась по результатам СВЧ-нагрева множества идентичных проб, помещенных в одно и то же место замкнутой полости. В установке применялись специальные меры по устранению конвекционного тепла за счет нагрева магнетрона.

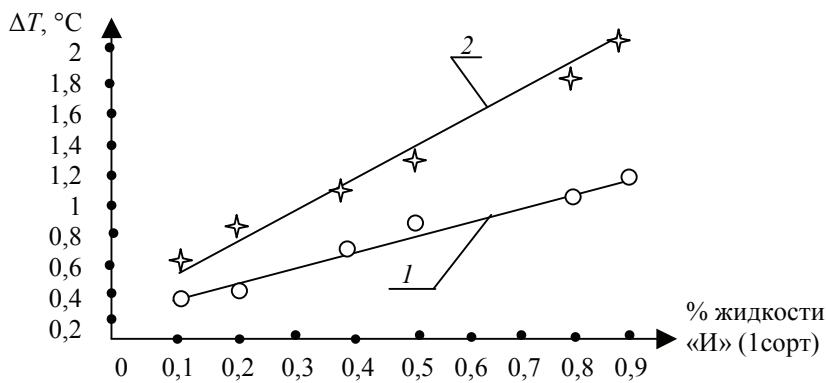


Рис. 3 Линии нагрева керосина с жидкостью «И»

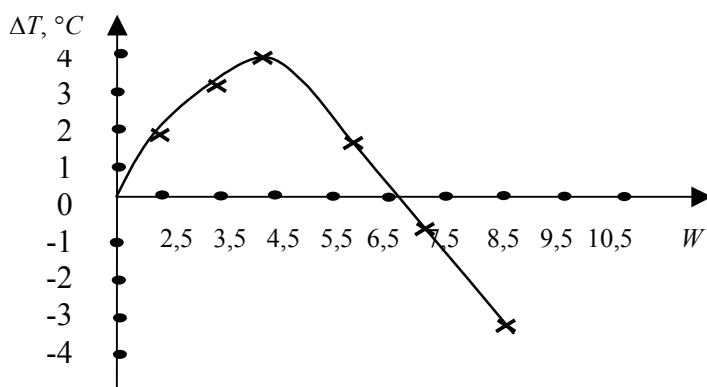


Рис. 4 Зависимость приращения температуры смеси от абсолютной влажности

Линейный рост  $\Delta T_2$  объясняется наличием в жидкости «И» в зависимости от сорта 0,2...0,6 % влаги. В эксперименте использовалась жидкость «И» 1 сорта (содержание воды меньше 0,2 %). Относительную погрешность определения жидкости «И» в авиационном керосине можно оценить как  $\approx 40\%$  для 0,1 % «И» и  $T_{\text{нач}} = 17,6\text{ }^\circ\text{C}$  и  $\approx 3\%$  для 0,3 % «И» и  $T_{\text{нач}} = 2\text{ }^\circ\text{C}$ . График на рис. 4 иллюстрирует пределы однозначного прироста температуры;  $\Delta T$  – разность абсолютных температур нагрева этиленгликоля с добавлением воды и его же концентрированного (содержание влаги по паспортным данным  $\approx 1,5\%$ ). Однозначный прирост температуры наблюдается до 3,5...4,5 %. Неоднозначность объясняется тем, что с ростом процента растворенной влаги потери растут, но увеличивается при этом и диэлектрическая проницаемость смеси  $\epsilon_{\text{см}}$ , что влечет за собой согласно граничным условиям уменьшение напряженности поля в исследуемой среде  $E_{\text{ср}} = E_0 / \epsilon_{\text{см}}$ , а как известно, мощность потерь  $P_{\text{пот}} \sim (E_{\text{ср}})^2$ , где  $E_0$  – напряженность электрического поля в объеме взаимодействия,  $E_{\text{ср}}$  – в исследуемой среде,  $W$  – абсолютная влажность в %.

Таким образом применение термовлагометрического метода измерения имеет следующие достоинства: простота и доступность реализации; не нужен образец строгой формы; однородность электромагнитных полей (в широком диапазоне измерения влажности может нарушиться условие одноимодовости в волноводе, что приводит к дополнительным погрешностям); устранение влияния вырожденных колебаний на результаты измерения.

#### Список литературы

1. Бабко В.Б. Влагометрия жидких углеводородов: Материалы 7-й Всероссийской НТК «Состояние и проблемы измерений» / В.Б. Бабко, В.Е. Константинов, А.Ф. Королев, Д.А. Крылов. – М.: МГТУ им Н.Э. Баумана., 2000. – 185 с.
2. Михеев К.Г. Прибор для измерения концентрации органических соединений на СВЧ: Сборник материалов «Средства контроля и регулирования» Государственного института прикладной химии / К.Г. Михеев, Л.А. Мусяков, Г.Б. Яцевич – М.: Химия., 1974 г. – С. 70 – 74.
3. Берлинер М.А. Измерение влажности в диапазоне СВЧ. / М.А. Берлинер. – М.: Энергия. 1973. – 215 с.

## Microwave Thermo-Moisture Method of Organic Matters Control

M.A. Suslin<sup>1</sup>, V.A. Tetushkin<sup>2</sup>, V.N. Chernyshov<sup>2</sup>, D.A. Dmitriev<sup>1</sup>

*Tambov Military Aviation Engineering Institute (1);*

*Department «Criminal Law and Informatization of Legal Activity» (2), TSTU*

**Key words and phrases:** electromagnetic wave; microwave heating; organic matters; water contents measurement.

**Abstract:** Microwave method of determining moisture of organic compounds based on the contrast absorption of electromagnetic wave energy by water and liquid dielectric is proposed. Construction description and working principle of the device to implement the developed method is given. The results of experimental research are given.

---

## Mikrowellene thermofeuchtigkeitsmetrische Methode der Kontrolle der organischen Verbindungen

**Zusammenfassung:** Es ist die Höchstfrequenz-Methode der Bestimmung von der Feuchtigkeit der organischen Verbindungen vorgeschlagen. Diese Methode gründet sich auf die kontraste Aufnahme der Energie der Elektromagnetwelle von dem Wasser und dem flüssigen Dielektrikum. Es ist die Beschreibung der Konstruktion und der Wirkungsweise der die erarbeitende Methode realisierenden Einrichtung angegeben. Es sind die Ergebnisse der Experimentaluntersuchungen angeführt.

---

## Méthode thermohumidométrique de micro-ondes pour le contrôle des composés organiques

**Résumé:** Est proposée la méthode d'hyperfréquence pour la définition de l'humidité des composés organiques fondée sur l'absorption vigoureuse de l'énergie de l'onde électromagnétique par l'eau et par le diélectrique liquide. Est donnée la description de la construction et du principe du fonctionnement du dispositif qui réalise la méthode élaborée. Sont cités les résultats des essais expérimentaux.

---