

## ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ КОМПЛЕКСНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВЕЩЕСТВ В ЗАКРЫТЫХ ОБЪЕМАХ

ПАНЧЕНКО А. Ю.

Рассматривается возможность использования измерений электромагнитных параметров веществ, в которых создается модулирующее поле акустических волн. Оценивается вероятность получения информационного сигнала, указываются пути аппаратурной реализации метода.

Создание приборов непрерывного контроля за технологическими процессами является одной из важнейших задач на пути модернизации производства. Традиционно системы непрерывного неразрушающего контроля основаны на взаимодействии акустических или электромагнитных волн с веществом. Значительно реже используется их комплексное воздействие. Практически его использование ограничивается отдельными случаями исследования таких веществ, как пьезокристаллы, оптически анизотропные вещества, полупроводники и проч. [1]. Исключением можно считать метод радиоакустического зондирования атмосферы, который основан на отражении электромагнитных волн от неоднородностей воздуха, вызванных прохождением звуковой волны [2]. Благодаря тому, что полученный при этом измерительный сигнал возникает вследствие разности давлений в звуковой волне и не требует абсолютной системы отсчета для определения своих параметров, этот метод позволил решить ряд задач, недоступных другим методам. В данной работе рассматривается принципиальная возможность получения информации при комплексном использовании акустических и электромагнитных волн для определения параметров веществ в закрытых объемах. Обычно такие оценки дают на основе анализа наиболее общих выражений. Чтобы непосредственно показать реальные возможности метода и сущность физических процессов, удобнее будет их рассмотреть на конкретном примере.

В качестве упомянутого возьмем прямоугольный резонатор, заполненный воздухом, и оценим влияние концентрации водяных паров на выходные параметры такого устройства. Считая акустическое возмущение малым, воспользуемся для него линейным приближением [3]. В этом случае волновое уравнение для скорости движения газа под воздействием звука имеет вид

$$\nabla^2 p_s - \frac{1}{c_s^2} \frac{\partial^2 p_s}{\partial t^2} = 0. \quad (1)$$

Граничным условием для  $p_s$  будет равенство нулю нормальной составляющей на стенках резонатора.

Рассмотрим возбуждение с вариацией только по одной координате, например  $x$ . Если отражающие стенки расположены в точках  $x_1$  и  $x_2$ , то из (1) получим

$$p_s = p_{s0} \sin[k_s(x - x_1)], \quad (2)$$

где  $k_s = \pi n / (x_2 - x_1)$ .

Изменение электрических свойств газа определяется приращением давления и температуры. В звуковой волне эти параметры линейно связаны между собой. С учетом взаимосвязи между давлением и скоростью в звуковой волне [3] и на основании (2) для распределения абсолютной диэлектрической проницаемости получим

$$\epsilon_a = \epsilon_{a0} + \Delta\epsilon_a \cos(k_s x + \varphi_s), \quad (3)$$

где  $\varphi_s = -k_s x_1$ .

Величину  $\Delta\epsilon_a$  можно определить из эмпирических формул, которые тщательно анализировались в [4]. Для малых звуковых давлений  $p_s$  ее можно представить как

$$\Delta\epsilon_a = 10^{-6} \frac{111}{T_0} \left( 1 + \frac{2886 e_0}{T_0 p_0} \right) p_s, \quad (4)$$

где  $T_0$  – температура °K;  $p_0$  и  $e_0$  – давление воздуха и парциальное давление водяного пара в гПа.

Электромагнитный резонатор в общем случае не обязательно должен совпадать с акустическим. Технологически несложно выполнить закорачивающие стенки в виде сеток, прозрачных для акустических волн. Такое решение даст дополнительную свободу в выборе взаимного расположения акустического и электромагнитного полей. Пусть стенки электромагнитного резонатора расположены в точках 0 и  $x_0$ . Рассмотрим возбуждение этого резонатора волнами  $H_{011}$ , у которых электрическое поле ориентировано по оси  $z$ . Тогда для  $E_z$  имеем

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_z}{\partial y^2} + \omega^2 \epsilon_a \mu_0 E_z = 0. \quad (5)$$

Диэлектрическая проницаемость изменяется только по оси  $x$  и эти изменения малы, поэтому переменные в этом уравнении можно разделить

$$E_z = X(x)Y(y).$$

При этом получаются уравнения Гельмгольца, в которых волновые коэффициенты связаны следующим образом:

$$k_x^2 + k_y^2 = \omega^2 \epsilon_a \mu_0. \quad (6)$$

Коэффициент распространения по оси  $y$  определяется шириной резонатора  $-y_0$ :  $k_y = \pi / y_0$ . Коэффициент распространения вдоль оси  $x$  зависит от изменения диэлектрической проницаемости. С учетом (6) имеем

$$k_x = \sqrt{\omega^2 \mu_0 [\epsilon_{a0} + \Delta\epsilon_a \cos(k_s x + \varphi_a)] - k_y^2}.$$

В этом выражении достаточно ограничиться первым приближением по  $\Delta\epsilon_a$ :

$$k_x = k_{x0} \left[ 1 + \frac{k_0^2}{2k_{x0}^2} \frac{\Delta\epsilon_a}{\epsilon_{a0}} \cos(k_s x + \varphi_a) \right],$$

где  $k_0$  и  $k_{x0}$  – коэффициенты распространения в неограниченном пространстве и в резонаторе при отсутствии акустических возмущений.

В общем случае нахождение решения для функции  $X(x)$  является достаточно сложной задачей, поэтому для предварительной оценки возможностей воспользуемся приближенным расчетом. Будем искать решение для  $X$  в виде экспоненциальной функции, в которой возмущение, вызванное непостоянством диэлектрической проницаемости, описывается дополнительным слагаемым в аргументе

$$X = X_0 \exp\pm(ik_{x0}x + \delta(x)).$$

Подставив эту функцию в уравнение Гельмгольца для  $\delta$ , получим

$$[k_{x0} + \delta']^2 \mu i \delta'' = k_{x0}^2 + k_0^2 \frac{\Delta \xi_a}{\xi_{a0}} \cos(k_s x + \varphi_s).$$

Так как изменение диэлектрической проницаемости является малой величиной, то второй производной и квадратом первой можно пренебречь. После интегрирования и подстановки граничных условий функция  $X(x)$  имеет приближение в виде

$$X = 2X_0 \sin \left[ k_{x0}x - \frac{1}{2k_s} \frac{k_0^2}{k_{x0}} \frac{\Delta \xi_a}{\xi_{a0}} \left( \frac{\sin(k_s x + \varphi_s) - \sin \varphi_s}{2} \right) \right]. \quad (7)$$

Возбуждение акустических волн приведет к изменению резонансной частоты электромагнитного резонатора. Это изменение также будет малой величиной, для которой на основании (7) и граничного условия при  $x=x_0$  в первом приближении можно записать

$$\Delta \omega = \omega_0 \frac{1}{k_s x_0} \frac{\Delta \xi_a}{\xi_{a0}} \sin \left( \frac{k_s x_0}{2} \right) \cos \left( \frac{k_s x_0}{2} + \varphi_s \right).$$

Осциллирующие множители в этом выражении определяют зависимость резонансной частоты от взаимного расположения акустического и электромагнитного полей. Физическую картину можно объяснить используя концепцию парциальных волн. Распределение поля для  $H_{011}$  формируется четырьмя волнами, распространяющимися под некоторым углом к оси  $x$  навстречу друг другу. Изменение диэлектрической проницаемости вызывает соответствующее изменение проекции волнового вектора на ось  $x$ , а значит и изменение резонансной частоты. При четном числе полуволн или при симметричном расположении узлов давления относительно центра резонатора эти изменения компенсируются. Таким образом, выполнение стенок электромагнитного резонатора в виде сеток позволит подстраивать измеритель для получения максимального отклика.

Существенное отличие между взаимодействием акустических и электромагнитных волн в закрытых резонаторах и в свободном пространстве состоит в том, что в свободном пространстве основную роль играет отражение. В резонаторах, где поле представлено в виде пространственного спектра, основным механизмом является преломление. Для иллюстрации рассмотрим отклик устройства в виде отношения:  $\frac{\Delta f}{f_{0ps}} 10^{-6}$  (в [1/гПа]) при  $k_s \rightarrow 0$ .

На рис. 1 представлены графики изменения отклика для трех значений  $p_0$  при насыщающем давлении водяных паров [5] в зависимости от температуры. Для сравнения показан отклик при сухом воздухе.

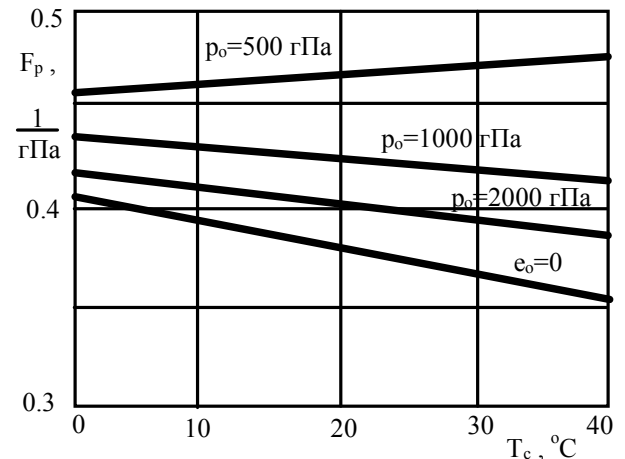


Рис. 1. Зависимость отклика устройства от  $t^{\circ}C$

Сравнительно небольшая величина изменения резонансной частоты ставит при проектировании реальных устройств две задачи. Первая – увеличение отклика устройства. Ее можно решить применением высокодобротных акустических резонаторов, эффективных возбуждителей акустических волн, оптимальным взаимным расположением акустических и электромагнитных полей, а также, как показывает более строгий анализ, выбором рабочих частот ЭМ-волн так, чтобы коэффициент распространения по оси, по которой создаются вариации давления, находился вблизи критического значения.

Вторая задача – выделение полезного сигнала из шумов. Ее решение потребует увеличения времени измерения. В реальных устройствах это допустимо, так как частота информационного сигнала лежит в звуковом диапазоне, поэтому даже многократное увеличение времени измерения не скажется на возможности использования таких приборов для контроля технологических процессов.

**Литература:** 1. Кардона М. Модуляционная спектроскопия. – М.: Мир. – 1972. – 416 с. 2. Каллистратова М.А., Кон А.И. Радиоакустическое зондирование атмосферы. – М.: Наука. – 1985. – 198 с. 3. Скучик Е. Основы акустики. Т.1. – М.: Мир. – 1976. – 520 с. 4. Андрианов В.А., Панченко А.Ю. Восстановление высотных профилей показателя преломления пограничного слоя атмосферы по акустическим и радиоакустическим дистанционным измерениям // Радиотехника и электроника. – 1990. – Т.35. – №12. – С. 2518–2526. 5. Спенсер–Грегори Г., Роухе Е. Гигрометрия. – М.: Гостехиздат. – 1963. – 204 с.

Поступила в редколлегию 09.12.97

**Панченко Александр Юрьевич**, канд. физ.-мат. наук, докторант кафедры МЭПУ ХТУРЭ. Научные интересы: электродинамика, акустика, электроника, гидродинамика для описания акустических волн в неоднородных, движущихся средах. Адрес: 310726, Украина, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. (0572) 409-362.