

УДК 544.45; 53.083.4; 536.46

А. С. Мамаев, А. Б. Кискин, В. Е. Зарко, В. В. Колодей, Э. Г. Михальцов

Институт химической кинетики и горения СО РАН
ул. Институтская, 3, Новосибирск, 630090, Россия

Конструкторско-технологический институт
вычислительной техники СО РАН
ул. Институтская, 6, Новосибирск, 630090, Россия

E-mail: Aleksej.Mamaev@gmail.com

РАЗРАБОТКА ДИНАМИЧЕСКОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ МАЛЫХ СИЛ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ГАЗИФИКАЦИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СИСТЕМ

Предложен новый инструментальный метод для регистрации реактивной силы продуктов газификации на основе мостовой схемы измерения, позволяющий повысить разрешение измерительной системы и исключить неконтролируемую зависимость регистрируемого сигнала от диэлектрических характеристик среды.

Ключевые слова: конденсированные системы, скорость горения, реактивная сила, мостовая схема.

Существуют различные методы регистрации линейной нестационарной скорости газификации при горении, абляции и пиролизе конденсированных систем: скоростная киносъемка, ультразвуковая, микроволновая, лазерная интерферометрия. Но все они не обеспечивают получения требуемой информации в полном объеме и с высокой точностью [1].

Решение этих проблем видится в применении интегральных методов исследований. Одним из таких методов является метод регистрации массовой скорости горения, посредством измерения реактивной силы продуктов горения, которая прямо пропорциональна квадрату величины массовой скорости горения и обратно пропорциональна плотности газовых продуктов горения. Данный метод обеспечивает повышенную чувствительность в случае малых изменений массовой скорости горения [1].

Для регистрации реактивной силы в ИХКГ СО РАН был разработан датчик малых сил (ДМС) [2–4], основанный на измерении емкости единичного конденсатора. Конструкция датчика представляет собой

конденсатор с подвижной пластиной, закрепленной на упругой подвеске и воспринимающей действие внешней силы F :

$$F = k(d_0 - d).$$

Здесь k – коэффициент упругости системы подвеса; d – расстояние между пластинами конденсатора; d_0 – это же расстояние в состоянии покоя системы, до начала воздействия. Вместе с электронным регистрирующим блоком измерительная система имела разрешающую способность $1,25 \cdot 10^{-4}$ Н. На момент создания системы это были предельные значения, главным образом обусловленные конструкцией ДМС и способом детектирования изменений емкости, электронным регистрирующим блоком.

Способ детектирования заключался в том, что конденсатор ДМС вместе с катушкой индуктивности образовывал контур LC-генератора, работающего на частоте 10 МГц. Малые изменения емкости конденсатора ДМС порождали девиацию частоты генератора, которая затем детектировалась. Однако стабильность LC-генератора не может превысить 0,01 %, или 10^{-4} , отсюда получа-

ем ограничение по разрешающей способности.

Кроме того, использование первоначальной конструкции ДМС в условиях повышенных давлений с изменяющимся уровнем давления среды встречает существенные трудности, поскольку возникает неконтролируемая зависимость регистрируемого сигнала от изменяющихся диэлектрических характеристик среды.

Предлагаемый метод измерения малых сил позволяет исключить влияние неконтролируемой зависимости регистрируемого сигнала от диэлектрических характеристик среды и повысить предельную разрешающую способность измерительной системы до уровня $6 \cdot 10^{-7}$ Н, или $4 \cdot 10^{-5}$ пФ (в абсолютных единицах).

В основе метода лежит мостовая схема измерения, изображенная на рисунке.

Напряжение на выходе моста равно

$$U_M = \left(\frac{Z_2}{Z_4 + Z_2} - \frac{Z_1}{Z_3 + Z_1} \right) U_\Gamma,$$

где Z_1 – Z_4 – реактивные сопротивления конденсаторов, которые могут быть пересчитаны в емкость по формуле: $C = 1 / 2\pi f Z$.

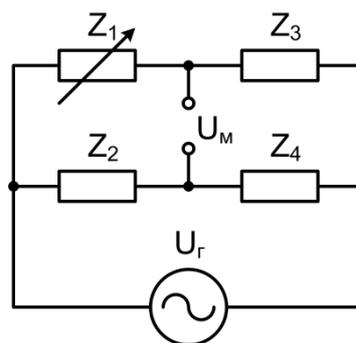
$$U_M = \left(\frac{C_4}{C_4 + C_2} - \frac{C_3}{C_3 + C_1} \right) U_\Gamma.$$

Максимальный динамический диапазон измерений (при симметричном сигнале) реализуется в случае сбалансированного моста, т. е. когда в состоянии равновесия напряжение $U_M = 0$. Это достигается при равенстве

$$\frac{Z_2}{Z_4} = \frac{Z_1}{Z_3} \quad \text{или} \quad \frac{C_2}{C_4} = \frac{C_1}{C_3}.$$

Пусть C_2 – основной конденсатор ДМС, C_4 – опорный конденсатор, который располагается внутри ДМС вблизи основного для компенсации дрейфа полезного сигнала, обусловленного изменением диэлектрических характеристик среды внутри экспериментального объема. В случае равенства емкостей этих двух конденсаторов мост будет сбалансирован, если выполняется условие $C_1 = C_3$. Для балансировки используется переменный конденсатор C_1 .

За время эксперимента емкости конденсаторов C_1 и C_3 , находящихся в постоянных лабораторных условиях, при действии температурной нестабильности, дрейфа и прочих причин изменяются незначительно и их изменением можно пренебречь. С учетом



Принципиальная схема моста Уитстона

этого уравнение чувствительности мостовой схемы запишется следующим образом:

$$\delta U_M = \frac{\partial U_M}{\partial \epsilon} \delta \epsilon + \frac{\partial U_M}{\partial d} \delta d,$$

где ϵ – диэлектрическая проницаемость окружающей ДМС газовой среды. Чувствительность к изменению параметров среды:

$$\frac{\partial U_M}{\partial \epsilon} = \left[\frac{C_2 \frac{\partial C_4}{\partial \epsilon} - C_4 \frac{\partial C_2}{\partial \epsilon}}{(C_2 + C_4)^2} \right] U_\Gamma. \quad (1)$$

Емкости основного и опорного конденсаторов ДМС прямо пропорциональны диэлектрической проницаемости среды ϵ :

$$C_2 = \epsilon \alpha_2, \quad C_4 = \epsilon \alpha_4,$$

где α_2, α_4 – коэффициенты пропорциональности. Тогда

$$\frac{\partial C_i}{\partial \epsilon} = \alpha_i = \frac{C_i}{\epsilon}, \quad i = 2, 4. \quad (2)$$

Подставляя уравнение (2) в (1), получим обращение в нуль числителя выражения (1). Следовательно, в такой измерительной схеме вариация диэлектрических характеристик среды не оказывает влияния на полезный сигнал.

Чувствительность измерительного моста к изменению емкости основного конденсатора ДМС под действием силы определяется по формуле:

$$\begin{aligned} \frac{\partial U_M}{\partial d} &= \frac{\partial U_M}{\partial C_2} \cdot \frac{\partial C_2}{\partial d} = -\frac{C_2}{d} \cdot \frac{\partial U_M}{\partial C_2} = \\ &= -\frac{1}{d} \cdot \frac{C_2/C_4}{(1 + C_2/C_4)^2} U_\Gamma. \end{aligned} \quad (3)$$

поскольку емкость конденсатора

$$C_2 = \epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{s}{d},$$

где S – площадь пластины конденсатора, а ϵ_0 – диэлектрическая постоянная в вакууме.

Из выражения (3) следует, что значение максимальной чувствительности схемы достигается при равенстве емкостей конденсаторов ДМС и опорного, при уменьшении расстояния между пластинами конденсатора ДМС и при увеличении уровня питающего напряжения. Однако стабильность частоты генератора не влияет на чувствительность в отличие от ранее использованного метода.

Сквозная чувствительность метода к уровню действующей силы определяется выражением

$$\frac{\partial U_M}{\partial F} = \frac{\partial U_M}{\partial d} \cdot \frac{\partial d}{\partial F} = \frac{1}{kd} \cdot \frac{C_2/C_4}{(1+C_2/C_4)^2} U_{\Gamma}.$$

Для датчика с резонансной частотой 400 Гц и массой подвижной системы вместе с исследуемым образцом ~ 4 г коэффициент упругости $k \approx 2,56 \cdot 10^4$ Н/м. Таким образом, при расстоянии между пластинами измерительного конденсатора 20 микрон и амплитуде напряжения генератора 20 В, получим оценку чувствительности метода в виде

$$\partial U_M \approx 10 [\text{В/Н}] \delta F.$$

Предельная разрешающая способность метода определяется уровнем шумов, приведенных к входу измерительной системы U_{noise} :

$$\delta F \approx 0,1 [\text{Н/В}] U_{\text{noise}}.$$

Она может достигать величины $6 \cdot 10^{-7}$ Н при современном уровне электронной техники [1]. Далее чувствительность можно увеличивать уменьшением расстояния между обкладками измерительного конденсатора ДМС и увеличением амплитуды напряжения генератора. Следует отметить, что существует еще один фактор, ограничи-

вающий разрешающую способность, – вибрационные шумы.

Модифицированный двухконденсаторный ДМС совместно с электронным регистрирующим блоком, использующим мостовой метод регистрации реактивной силы продуктов горения, позволяет существенно повысить точность и информативность экспериментов по измерению малых сил, в частности реактивной силы (а значит, и массовой скорости горения) оттекающих от поверхности горения продуктов газификации конденсированных систем. В связи с высокой чувствительностью к вибрации данный метод может найти применение при регистрации сейсмических явлений.

Список литературы

1. *Мамаев А. С.* Разработка емкостного измерителя для датчика малых сил // Сборник докладов VII Всерос. конф. «Горение твердого топлива», Новосибирск, 10–13 ноября 2009 г. Новосибирск: Изд-во Ин-та теплофизики СО РАН, 2009. Ч. 3. С. 143–148.
2. *Михеев В. Ф., Борин С. М.* Измерение массовой скорости твердых ВВ // Физика горения и взрыва. 1973. Т. 9, № 2. С. 327–329.
3. *Симоненко В. Н., Зарко В. Е.* Реактивная сила продуктов сгорания как мера нестационарной скорости горения пороха // Физика горения и взрыва. 1981. Т. 17, № 3. С. 129–132.
4. *Кискин А. Б., Симоненко В. Н.* Особенности применения метода регистрации реактивной силы для измерения нестационарной скорости горения // Физика горения и взрыва. 2000. Т. 36, № 1. С. 52–58.

Материал поступил в редколлегию 05.11.2010

A. S. Mamaev, A. B. Kiskin, V. E. Zarko, V. V. Kolodey, E. G. Mikhaltsov

DEVELOPMENT OF DYNAMIC METHOD FOR MEASURING SMALL FORCES TO STUDY GASIFICATION OF CONDENSED SYSTEMS

A new instrumental method has been elaborated to measure the recoil force of the condensed system gasification products based on a bridge circuit. The method allows increasing the resolution of the measuring system and eliminating non-controlled dependency of registered signal on dielectric properties of environmental medium.

Keywords: condensed systems, burning rate, recoil force, bridge circuit.