

СРОЧНЫЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 536.46;621.372.812

НОВЫЙ МИКРОВОЛНОВЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ
НЕСТАЦИОНАРНОЙ МАССОВОЙ СКОРОСТИ ГАЗИФИКАЦИИ
КОНДЕНСИРОВАННЫХ СИСТЕМВ. В. Перов¹, В. Е. Зарко^{1,2}, А. С. Жуков³¹Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН, 630090 Новосибирск
zarko@kinetics.nsc.ru²НИИ прикладной математики и механики Томского государственного университета, 634050 Томск³Томский государственный университет, 634050 Томск

Представлена информация о разработке нового бесконтактного метода измерения нестационарной массовой скорости газификации, основанного на динамической регистрации количества исследуемого вещества в микроволновом датчике резонаторного типа. Конструкция датчика обеспечивает измерение скорости газификации при интенсивном обдуве поверхности образца, имеющего канальное отверстие для прохода газового потока.

Ключевые слова: скорость газификации, полимерные материалы, СВЧ-излучение, микроволновый датчик.

Скорость горения энергетических материалов служит важнейшим баллистическим параметром, который широко используется при проектировании ракетных двигателей и газодинамических устройств. В случае стационарных процессов требуется знать величину этого параметра с погрешностью примерно 0.5 % и ниже. Следует, однако, заметить, что в связи с развитием новых приложений ракетной техники становятся остро востребованными результаты измерения нестационарной скорости горения, которые могут также эффективно использоваться в качестве источника новой информации о механизме горения и служить базисом для проверки имеющихся моделей горения. Предлагаемый микроволновый метод должен предоставить возможности для получения

такой информации.

Проблема получения данных по нестационарной скорости горения сопряжена с решением сложных технических задач. Согласно оценкам для измерения 10%-й вариации амплитуды скорости горения с типичным средним значением $5 \div 10$ мм/с при периодическом воздействии внешнего источника энергии с частотой $100 \div 200$ Гц необходимо обеспечить пространственное разрешение метода $1 \div 2$ мкм и временное разрешение не менее 1 мс. Известны многочисленные попытки построения динамических способов измерения линейной и массовой скорости горения с использованием оптических методов, а также рентгеновского и микроволнового излучения [1–4]. Тем не менее можно констатировать, что имеющиеся в настоящее время реализации этих способов не позволяют достичь требуемых параметров по погрешности и надежности регистрации параметров нестационарной скорости горения и необходимо продолжить работу по созданию новых методов измерения с повышенными характеристиками. Очевидно, что аналогичные проблемы возникают и при решении задач опреде-

Работа выполнена при поддержке федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы (проект 1.3 «Разработка новых высокоэнергетических материалов и технических решений для перспективных схем гибридных двигателей космического назначения»).

© Перов В. В., Зарко В. Е., Жуков А. С., 2014.

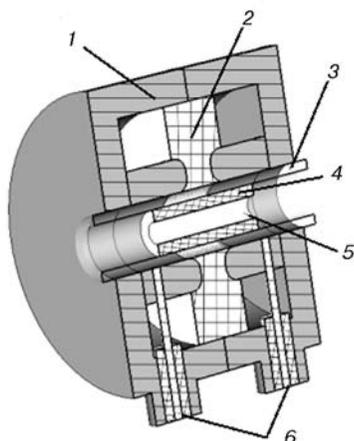


Рис. 1. Конструкция и общий вид коаксиального резонаторного СВЧ-датчика:

1 — корпус датчика, 2 — защитный экран, 3 — кварцевая трубка, 4 — образец ГВ, 5 — канал в образце ГВ, 6 — СВЧ-выводы

ления динамических параметров скорости пиролиза полимерных и энергетических материалов, используемых в гибридных и воздушно-реактивных двигателях. Поэтому в общем случае следует говорить о газифицирующихся веществах (ГВ) и о скоростях их газификации.

Настоящее сообщение содержит информацию о разработке нового бесконтактного метода измерения нестационарной массовой скорости газификации, основанного на динамической регистрации количества ГВ в микроволновом датчике резонаторного типа, сигнал которого с малой погрешностью и высоким временным разрешением измеряется с помощью анализатора цепей. Важно отметить, что конструкция датчика обеспечивает возможность времяразрешенного измерения скорости газификации при интенсивном обдуве поверхности образца, имеющего каналное отверстие для прохода газового потока. Такого рода информация будет особенно активно востребована разработчиками гибридных двигателей, которые в настоящее время располагают лишь грубо приближенными значениями эффективной средней скорости газификации блока горючего.

Коаксиальный резонаторный датчик (КРД) (рис. 1) имеет внутреннюю полость, в которой размещены защитный экран и кварцевая трубка. В центральную часть трубки плотно вставлен образец исследуемого вещества с каналным отверстием. Измерительная секция находится в средней части КРД. Длина

образца превышает длину измерительной зоны КРД, что позволяет исключить влияние неравномерности процесса газификации на входе и выходе из канала. После начала обдува образца газификация вещества в его канале приводит к изменению его массы. При этом изменяется затухание в запредельном волноводе связи, которое непрерывно регистрируется анализатором СВЧ-цепей. При этом изменение сигнала пропорционально изменению количества вещества в резонаторе.

В рассматриваемой конструкции два симметричных коаксиальных резонатора связаны друг с другом посредством емкостного зазора, который частично заполнен образцом ГВ. Концы образца размещаются вне зазора в областях, где электрическое поле практически отсутствует.

Отметим важную особенность работы СВЧ-датчика в виде системы двух четвертьволновых коаксиальных резонаторов с емкостным зазором между ними. Поскольку исследуемый каналный образец ГВ размещен в области сильного электрического СВЧ-поля, то при изменении диаметра канала в процессе деформации образца ГВ изменение связи между коаксиальными резонаторами приводит к значительному изменению резонансной частоты противофазного вида колебаний в процессе газификации образца ГВ.

Согласно электродинамическим расчетам и данным калибровки датчика, при максималь-

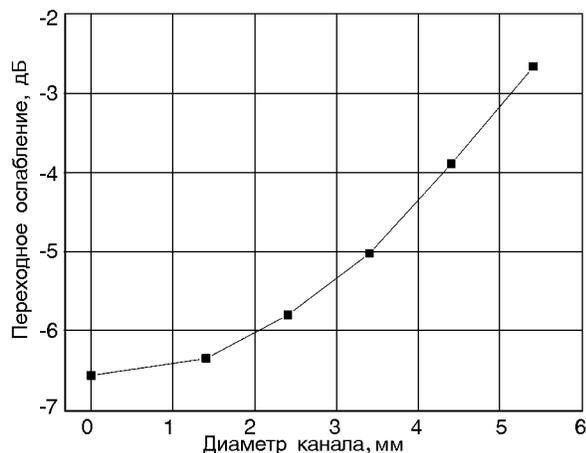


Рис. 2. Калибровка коаксиального резонаторного датчика. Зависимость ослабления СВЧ-сигнала от диаметра канала в модельном образце

ном увеличении диаметра канала в образце ГВ (полная газификация вещества) изменение резонансной частоты СВЧ-датчика сравнимо с шириной его резонансной характеристики. Оптимальным является расположение рабочей точки на склоне резонансной характеристики СВЧ-датчика, что соответствует максимальной крутизне передаточной характеристики. В качестве иллюстрации на рис. 2 показана типичная характеристика переходного ослабления СВЧ-сигнала в зависимости от диаметра канала.

Разрешающая способность резонансного СВЧ-датчика по определению убыли массы вещества оказывается высокой благодаря существенному изменению частоты противофазного вида колебаний, характерного для системы связанных коаксиальных резонаторов. При работе на склоне резонансной характеристики изменение переходного ослабления достигает 4 ÷ 10 дБ для различных конструкций СВЧ-датчика. В случае применения современных высокочувствительных анализаторов цепей фирмы «Advantest» или фирмы «Rohde&Schwarz» разрешающая способность по радиусу канала может достигать единиц микрометров. Факторами, влияющими на рабочие характеристики СВЧ-датчика, являются состав продуктов горения в центральной области канала и нагрев элементов конструкции датчика, что требует детального экспериментального исследования. В частности, планируется исследовать характеристики датчика при

помещении образцов ГВ в теплоизолирующие трубки из различных материалов.

Для расчета скорости газификации прием допущение, что при неизменной длине и сохранении формы измерительного участка ослабление сигнала СВЧ-излучения пропорционально площади занятого сечения образца, т. е. разности между общей площадью поперечного сечения образца (радиуса R , равного внутреннему радиусу кварцевой трубки) и площадью канального отверстия (радиуса r). При этом производная сигнала от занятого сечения образца ΔS пропорциональна произведению текущего радиуса канала и скорости газификации v :

$$\Delta S = S_0 - S(t) = \pi(R^2 - r^2), \quad (1)$$

$$\frac{d\Delta S}{dt} = -2\pi \frac{r dr}{dt}. \quad (2)$$

Из (1), (2) следует выражение для скорости газификации:

$$v = \frac{dr}{dt} = -\frac{d(\Delta S/dt)}{2\pi} \left(R^2 - \frac{\Delta S}{\pi} \right)^{0.5}. \quad (3)$$

Из (3) видно, что точность определения скорости газификации решающим образом зависит от погрешности регистрации сигнала СВЧ от занятого сечения датчика, которая при современных средствах измерения может достигать 0.5 %. Временное разрешение резонансного датчика составляет величину порядка 1 мкс и определяется временем установления собственных колебаний при нагруженной добротности 230 на частоте 2300 МГц. Временное разрешение системы регистрации может достигать 10 мкс и менее, что заведомо удовлетворяет сформулированным выше требованиям к методу регистрации нестационарной скорости газификации.

Таким образом, предложенная схема измерения нестационарной массовой скорости газификации может найти применение в различных приложениях для получения информации о характеристиках газификации полимерных и энергетических материалов в условиях обдува поверхности канальных образцов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Zarko V. E., Kuo K. K. Critical review of methods for regression rate measurements of condensed

- phase systems // Non-intrusive Combustion Diagnostics / K. K. Kuo and T. Parr (Eds). — New York: Begell House, 1994. — P. 600–623.
2. **Evans B., Favorito N. A., Kuo K.** Study of solid fuel burning-rate enhancement behavior in an X-ray translucent hybrid rocket motor // 41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference&Exhibit. — AIAA Paper 2005-3909. — (doi: 10.2514/6.2005-3909).
 3. **Zarko V. E., Perov V. V., Simonenko V. N.** Critical assessment of the microwave method for measuring steady-state and transient regression rates of solids // Combustion of Energetic Materials / K. K. Kuo and L. T. De Luca (Eds). — New York: Begell House, 2002. — P. 725–732.
 4. **Ягодников Д. А., Сергеев А. В., Козичев В. В.** Экспериментально-теоретическое обоснование повышения погрешности измерения скорости горения энергетических конденсированных систем СВЧ-методом // Физика горения и взрыва. — 2014. — Т. 50, № 2. — С. 51–61.

Поступила в редакцию 18/VIII 2014 г.
