

## ПРИМЕНЕНИЕ МИКРОВОЛНОВОГО МЕТОДА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ГОРЕНИЯ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

А. С. Жарков, М. Г. Потапов, В. П. Лушев, Ю. А. Галенко,  
А. А. Павленко, Ю. Б. Жаринов, Ю. Н. Дерябин, В. Г. Ефимов

Федеральный научно-производственный центр «Алтай», 659322 Бийск

Приведено описание установки, предназначенной для определения текущей скорости горения высокоэнергетических композиционных материалов. Рассмотрены методические вопросы обработки измерительной информации. Приведены результаты исследования влияния влажности образцов на скорость их горения.

**Метод измерения.** В разработанной установке для измерения скорости перемещения фронта горения используется эффект Доплера применительно к излучению СВЧ-диапазона. Микроволновое зондирование зоны горения проводится по известной схеме [1] через материал образца, вдоль его длины.

При движении фронта горения, вследствие непрерывного изменения фазы отраженной радиоволны, выходной сигнал датчика скорости изменяется по синусоидальному закону. По периоду этих колебаний определяется скорость горения.

**Экспериментальная установка.** Установка состоит из испытательной камеры объемом  $1,1 \cdot 10^3$  см<sup>3</sup>, соединенной газопроводом с прибором постоянного давления, и из измерительной системы. Испытательная камера выполнена из стали. Ее дно изготовлено из толстого оргстекла. Через него в камеру подается СВЧ-излучение. Для защиты от теплового воздействия на дно укладывается диск из оргстекла толщиной  $2 \div 3$  мм. Прибор постоянного давления поддерживает в камере при горении образца квазистационарное давление.

Измерительная система включает датчик давления, датчик скорости горения, светолучевой осциллограф Н-115, измерительный магнитофон SR-50, а также комплекс регистрации и обработки переходных процессов DL 1277, состоящий из аналого-цифрового преобразователя, специализированной ЭВМ и графопостроителя.

Датчик скорости горения выполнен по схеме импульсного доплеровского измерителя скорости с внутренней когерентностью. Кон-

структивно он представляет собой рупорную приемопередающую антенну прямоугольного сечения с детектором-смесителем и генераторным блоком на диоде Ганна. Для устранения влияния отраженного СВЧ-сигнала на генераторный диод передача зондирующего излучения в антенну осуществляется через ферритовый кольцевой циркулятор, обеспечивающий однонаправленное распространение излучения в СВЧ-тракте генераторного блока. Модуляция зондирующего излучения обеспечивается подачей на диод Ганна прямоугольных импульсов питания частотой 2 кГц и длительностью 250 мкс. Импульсы с детектора-смесителя усиливаются выходным синхронным детектором-усилителем, за счет чего достигается высокая помехозащищенность и чувствительность регистратора. Благодаря импульсному питанию диода Ганна обеспечивается требуемая стабильность теплового режима генератора и частоты его излучения.

**Проведение исследований.** Исследования проводились на образцах высокоэнергетических композиционных материалов (ВКМ) торцевого горения, защищенных от распространения пламени по боковой поверхности, длиной  $10 \div 50$  мм, с поверхностью горения  $40$  см<sup>2</sup>, при одинаковой начальной температуре 293 К. Образцы поджигаются сверху, зондирующее излучение подается снизу. Система работает на частоте 37,5 ГГц.

Излучение от приемопередающей антенны, прошедшее через образец, отражается от поверхности горения и поступает на приемный детектор-смеситель. Основной информационной характеристикой является изменение

во времени фазы низкочастотных колебаний (биений), возникающих в результате смещения на детекторе-смесителе двух СВЧ-колебаний: опорного, излучаемого генератором, и отраженного перемещающейся поверхностью горения образца. Выходной сигнал датчика скорости имеет вид

$$U = U_a \sin(\varphi_0 - \varphi_r) + U_c,$$

где  $U_a = K E_0 \exp[(2\pi f/c)\alpha 2x]$  — амплитуда колебаний уровня выходного сигнала;  $K$  — коэффициент преобразования СВЧ-колебаний в низкочастотное напряжение;  $E_0$  — амплитуда опорного радиосигнала с учетом потерь энергии на рассеяние в антенне;  $f$  — частота опорного радиосигнала;  $c$  — скорость распространения радиоволн в вакууме;  $\alpha$  — относительный коэффициент поглощения материала;  $x$  — расстояние от антенны до плазменного фронта;  $\varphi_0, \varphi_r$  — фазы опорной и отраженной радиоволн,  $\varphi_r = (2\pi f/c)\beta 2x$ ,  $\beta$  — показатель преломления материала образца;  $U_c$  — постоянный уровень смещения выходного сигнала относительно нуля регистратора.

**Расчет опытной скорости горения.** Разработанная установка позволяет реализовать три способа определения скорости горения.

1. Определение средней скорости горения по моментам образования плазменного фронта и окончания процесса горения. При этом средняя скорость фронта горения рассчитывается по формуле

$$\bar{v} = \frac{h}{t_k - t_n},$$

где  $h$  — длина образца,  $t_k$  — время окончания процесса горения,  $t_n$  — время образования плазменного фронта. Погрешность определения скорости в этом случае складывается из ошибок измерения временных интервалов и длины образца. Если погрешность измерения длины образца относительно невелика (0,1 %), то определение моментов времени по осциллограмме сигнала с детектора достигает 5 ÷ 10 %, поскольку процессы образования плазменного фронта на всей поверхности, попадающей в поле зрения антенны, и догорания остатков материала в конце горения растянуты по времени.

2. Вычисление текущей скорости горения методом обратного математического преобразования выходного сигнала датчика скорости. При этом рассчитываются изменения фазы сигнала и расстояния от антенны до поверхности горения для любого момента времени.

3. Нахождение скорости горения по экстремумам колебаний регистрируемого сигнала. Основой метода является расчет скорости на интервалах перемещения фронта на расстоянии, кратные четверти длины волны радиоизлучения в материале образца. Расчет основан на том, что экстремальные точки на осциллограмме сигнала приемника соответствуют моментам, когда фазы опорной и отраженной волн отличаются на величину, кратную числу  $\pi$ . В связи с этим фаза отраженной волны за время  $\Delta t_i$ , прошедшее от одного экстремума до другого, изменяет свою величину на  $\Delta\varphi = \pi$ . Отсюда

$$\beta \frac{2\pi f}{c} 2\Delta x = \pi,$$

где  $\Delta x$  — расстояние, пройденное фронтом горения за время  $\Delta t_i$ . Тогда

$$\Delta x = \frac{c}{4f\beta} = \frac{\lambda}{4\beta},$$

где  $\lambda$  — длина волны радиоизлучения опорного генератора. Скорость движения фронта горения на рассматриваемом интервале составляет

$$v_i = \frac{\Delta x}{\Delta t_i} = \frac{\lambda}{4\beta\Delta t_i}.$$

Первый способ определения скорости горения не позволяет контролировать изменение скорости горения по длине образца. Второй метод не удалось реализовать из-за отсутствия необходимого программного и аппаратного обеспечения. Поэтому результаты испытаний обрабатывались третьим способом.

**Методические особенности обработки результатов измерений скорости горения.** Точность определения скорости горения ограничивается не только погрешностью регистратора [2]. Экспериментально установлено, что выходной сигнал датчика скорости горения отличается от синусоиды: в процессе горения образца изменяется амплитуда колебаний выходного сигнала и его среднее значение. В результате возникает методическая погрешность, которая проявляется как погрешность определения  $\Delta t_i$  и, по нашим оценкам, равна  $\approx 2$  %.

Причины искажения формы выходного сигнала недостаточно изучены. Такими причинами могут быть:

- изменение условий распространения СВЧ-излучения;

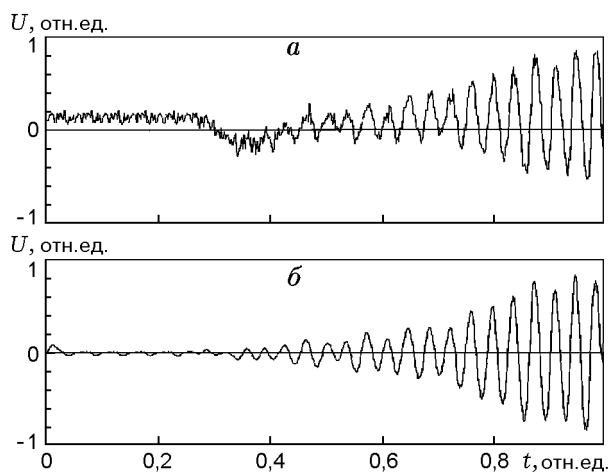


Рис. 1. Результаты фильтрации сигнала:  
*a* — сигнал датчика, *б* — сигнал после обработки МНАТ-вейвлетом [3]

- деформация образца;
- непараллельное перемещение поверхности горения.

Более точные значения скорости горения получены при определении длительности периода регистрируемых колебаний по линии условного нуля, проведенной через средние значения каждого колебания. Таким образом учитывается изменение со временем среднего уровня сигнала, и тем самым снимается вопрос о влиянии погрешности определения  $\Delta t_i$ .

Погрешность измерения скорости горения при этом не превышает 4 % и определяется двумя случайными составляющими. Помехи, возникающие при испытаниях, вносят ошибку до 2,5 %. Погрешность дискретизации сигнала

при обработке не более 3 %. Реально снижение погрешности измерения до 2 % путем фильтрации помех и повышения дискретности обработки.

Рис. 1 иллюстрирует возможности фильтрации сигнала программными средствами.

**Об определении показателя преломления материала образца.** При определении скорости горения образца используется показатель преломления материала. При отсутствии этих данных можно определить длину волны радиоизлучения в материале ВКМ по осциллограмме. Для расчета длины волны необходимо, чтобы на осциллограмме процесса были хорошо различимы моменты начала горения и его окончания. В этом случае подсчитывается число полных колебаний сигнала приемника за время горения образца. Длина волны радиоизлучения в материале при условии постоянства показателя преломления рассчитывается по формуле

$$\lambda = \frac{4L}{N},$$

где  $L$  — длина образца,  $N$  — количество колебаний сигнала приемника. Показатель преломления рассчитывается из соотношения

$$\beta = \frac{\lambda}{\lambda_0},$$

где  $\lambda_0$  — длина волны радиоизлучения в воздухе.

В качестве примера применения микроволнового метода на рис. 2 и 3 приведены результаты измерения скорости горения по длине образца в зависимости от его влагосодержания. Испытывались образцы ВКМ длиной 15 мм, предварительно наклеенные на диски из орг-

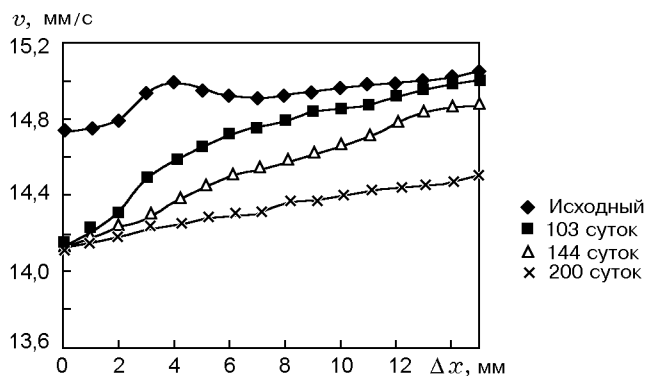


Рис. 2. Изменение скорости горения по длине образца при различном времени выдержки во влажной атмосфере

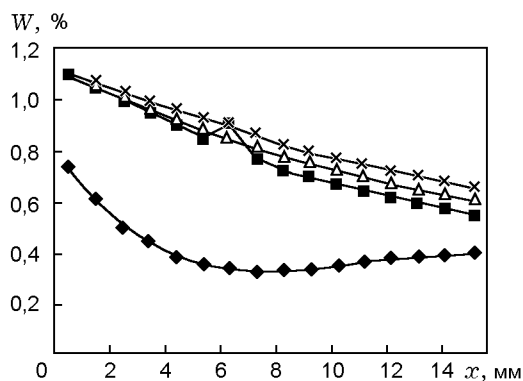


Рис. 3. Изменение влажности материала ( $W$ ) по длине образца при различном времени выдержки во влажной атмосфере

стекла и защищенные по боковой поверхности влагонепроницаемым покрытием. Подготовленные образцы хранились в атмосфере с относительной влажностью 80 % до 200 суток. В течение этого срока их периодически снимали с хранения и сжигали по три образца в испытательной камере при одинаковых условиях: номинальном давлении 7,0 МПа и начальной температуре 293 К. В процессе исследования определялись изменение влагосодержания в образцах и скорость горения по длине образца. Влияние изменения влажности в пределах  $0,4 \div 0,5$  % на изменение средней длины волны в образце считалось незначительным и на данном этапе исследований не учитывалось.

**Заключение.** Микроволновый метод измерения скорости горения, реализованный в описанной установке, позволяет зафиксировать характер изменения скорости горения и с погрешностью до 2 % определить ее значение при воздействии дестабилизирующих факторов, что открывает возможность прогнозирования закономерностей горения ВКМ в различных устройствах.

Авторы выражают глубокую признательность А. Б. Ворожцову и В. Е. Зарко за полезные обсуждения работы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Foss D. T., Roby R. J., and O'Brien W. F.** Development of a dual-frequency microwave burn-rate measurement system for solid rocket propellant // J. Propulsion and Power. 1993. V. 9, N 4. P. 497.
2. **Лебедев А. В., Лобойко Б. Г., Филин Б. П., Шапошников В. В.** Радиоволновый метод измерения скорости горения взрывчатых материалов в герметичном объеме // Хим. физика. 1998. Т. 17, № 9. С. 129–131.
3. **Астафьева Н. М.** Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // Успехи физ. наук. 1996. Т. 166, № 11. С. 1145–1170.

*Поступила в редакцию 19/IV 1999 г.,  
в окончательном варианте — 29 IX 1999 г.*