

Анатолий Иванович Пастухов родился в 1918 г., окончил в 1941 г. Высшее военное инженерное училище им. Ф.Э. Дзержинского. Д-р техн. наук, профессор кафедры “Теоретическая механика” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 100 научных работ в области аэродинамики (теории крыла и тел вращения).

A.I. Pastukhov (b. 1918) graduated from the Naval Higher Engineering School n.a. F.E. Dzerzhinsky in 1941. D. Sc. (Eng.), professor of “Theoretical Mechanics” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of over 100 publications in the field of aerodynamics (theory of wing and body of rotation).

Евгений Константинович Галемин — канд. техн. наук, доцент кафедры “Теоретическая механика и ТММ” Калужского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор ряда научных работ в области аэродинамики.

Ye.K. Galemin — Ph. D. (Eng.), assoc. professor of “Theoretical Mechanics and Theory of Mechanisms and Machines” department of Kaluga branch of the Bauman Moscow State Technical University. Author of a number of publications in the field of aerodynamics.

УДК 536.46:662.612

А. В. С у х о в, М. В. Т ю г а е в,
Ю. М. Ш а р а й

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ МИКРОВОЛНОВОЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ГОРЕНИЯ ТВЕРДЫХ РАКЕТНЫХ ТОПЛИВ

Разработан универсальный дифференциальный микроволновой метод измерения скорости горения твердых ракетных топлив на переходных режимах работы двигателя. Основанный на использовании четырех зондов метод позволяет определять как стационарную, так и нестационарную скорости горения топлив широкого класса, в том числе имеющих высокие диэлектрические потери.

При создании многорежимных энергетических систем с регулированием давления (расхода топлива) необходимо знать, как протекают процессы нестационарного горения твердых ракетных топлив (ТРТ). С точки зрения устойчивости системы наиболее опасны переходы с высокого давления на низкое, в течение которых характер поведения ряда параметров может отличаться от стационарного. К числу таких параметров относится, прежде всего, скорость горения ТРТ. Характеристики нестационарного горения топлива в значительной мере определяют область устойчивой работы и выходные параметры регулируемых установок. Поэтому актуальным является получение достоверной информации о процессе нестационарного горения ТРТ в условиях переходных режимов. В настоящее время не существует универсальной математической модели, позволяющей достаточно точно описывать процесс горения топлив широкого класса при различных условиях нестационарного процесса. Один из путей решения этой проблемы

заключается в разработке экспериментальных методов исследования процесса горения ТРТ. Полученная таким образом опытная информация позволяет существенно сократить время на отработку подобных изделий и значительно снизить материальные расходы на проведение натурных испытаний.

Как показано в ряде работ [1–3], исходящая от генератора СВЧ-волна, проходя через свод твердого ракетного топлива и частично отражаясь от поверхности раздела твердой и газообразной фаз, возвращается в обратном направлении. В результате суперпозиции падающей и отраженной волн образуется интерференционная картина напряженности электромагнитного поля в волноводе, зависящая от положения горячей поверхности исследуемого образца. Регистрируя изменение интерференционной картины, можно определять скорость горения ТРТ. Разработанные ранее методы [1, 2] основаны на применении одного зонда и не позволяют проводить измерения на нестационарных режимах, когда давление p_k , а следовательно, и скорость горения u изменяются в короткие промежутки времени. Кроме того, наличие существенных диэлектрических потерь исследуемого образца исключает использование таких методов, так как при этом происходит значительное изменение огибающей напряженности поля стоячей волны.

Разработанный авторами новый универсальный дифференциальный микроволновый метод измерения, основанный на общих понятиях теории цепей СВЧ с использованием четырехдетекторного измерителя полных сопротивлений (ИПС) [4], позволяет определять как стационарную, так и нестационарную скорости горения ТРТ. При разработке метода приняты следующие допущения.

1. Образец горит плоскопараллельными слоями по направлению вдоль оси волновода; падающая электромагнитная волна отражается от поверхности горения образца ТРТ, которая в общем случае характеризуется наличием микронеровностей, размер которых может достигать величины ~ 1 мм. Ввиду существенного различия диэлектрических характеристик ТРТ и продуктов сгорания (ПС), можно допустить, что основное отражение волны происходит от сечения, соответствующего среднеинтегральной поверхности раздела фаз ТРТ–ПС или поверхности горения.

2. Чувствительные элементы (детекторы) имеют квадратичную характеристику, т.е. напряжение на выходе детектора пропорционально квадрату напряженности электромагнитного поля.

3. Диэлектрические свойства образцов ТРТ и ПС принимаются постоянными в пространстве и не зависящими от времени или давления.

4. Все секции измерительного волноводного тракта, а также другие СВЧ-элементы, входящие в микроволновую систему измерения, идеальные и имеют абсолютное волновое согласование.

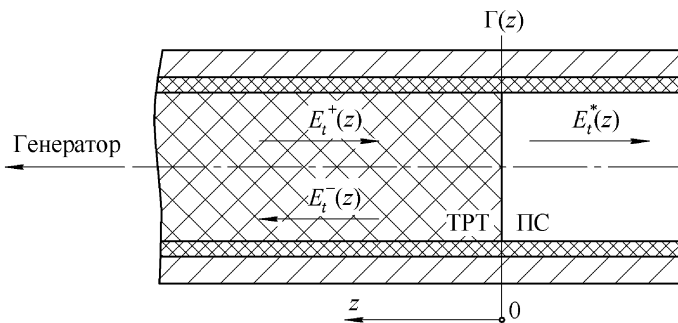


Рис. 1. Схема распространения СВЧ-волн в волноводе, заполненном топливом

Суть метода состоит в регистрации напряженности электромагнитного поля стоячей волны $E(z)$, образованного в результате суперпозиции падающей $E_t^+(z)$ от СВЧ-источника и отраженной $E_t^-(z)$ от горячей поверхности волны (рис. 1). Образец твердого топлива, бронированный по боковой поверхности и одному торцу, располагается в круглом запердельном металлическом волноводе. При этом его поперечные размеры таковы, что за границей раздела фаз ТРТ–ПС в волноводе, заполненном продуктами сгорания, происходит резкое затухание электромагнитного поля, тем самым прекращается распространение прошедшей через поверхность горения волны E_t^* .

Процесс отражения электромагнитной волны характеризуется комплексным коэффициентом отражения, определяемым отношением напряженности отраженной поперечной электрической волны к падающей в месте границы раздела фаз ТРТ–ПС:

$$\Gamma(z) = \frac{E_t^-(z)}{E_t^+},$$

где z — координата этой границы. В общем случае $z = f(t)$.

При перемещении поверхности отражения (горении свода топлива) происходит пропорциональное изменение как модуля, так и фазы коэффициента отражения $\Gamma(t)$. При этом напряженность поля стоячей волны определяется как

$$E(t) = E_t^+(t) [1 + \Gamma(t)].$$

Полную информацию об изменении комплексного коэффициента отражения в процессе интерференции падающей от СВЧ-источника 1 и отраженной от поверхности 2 волн можно получить при помощи метода четырех детекторов — (Д), основанного на измерении полных сопротивлений (рис. 2).

При этом напряженность стоячей волны $E(t)$ регистрируют в четырех точках, расположенных вдоль оси волновода на расстоянии $\lambda_B/8$ друг от друга, где λ_B — длина электромагнитной волны в измерительном волноводе. Таким образом, электрические фазовые сдвиги между

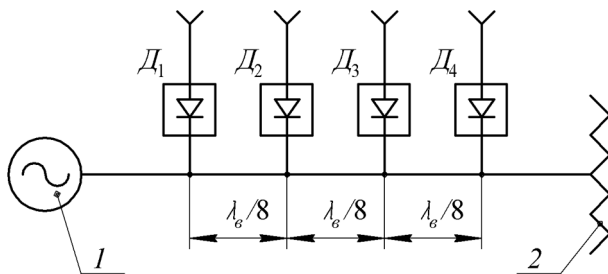


Рис. 2. Схема измерителя полных сопротивлений:

1 – СВЧ-источник, 2 – поверхность отражения

диодами равны $\pi/4$. По данным такой регистрации определяются необходимые параметры, в частности коэффициент отражения $\Gamma(t)$. Для этого определяется пара квадратурных сигналов:

$$X(t) = D_1(t) - D_3(t); \quad (1)$$

$$Y(t) = D_2(t) - D_4(t).$$

Данные величины имеют фазовый сдвиг $\pi/2$ и являются составляющими комплексного коэффициента отражения, позволяющими определить его фазу $\varphi(t)$ в соответствии с формулами:

$$\varphi(t) = \begin{cases} \arctg [Y(t)/X(t)], & X(t) \geq Y(t) \\ \frac{\pi}{2} - \arctg [X(t)/Y(t)], & X(t) < Y(t) \end{cases} \quad \text{при } X(t) > 0;$$

$$\varphi(t) = \begin{cases} \pi - \arctg [Y(t)/X(t)], & |X(t)| \geq Y(t) \\ \frac{\pi}{2} + \arctg [X(t)/Y(t)], & |X(t)| < Y(t) \end{cases} \quad \text{при } X(t) < 0.$$

Отсюда скорость перемещения границы раздела фаз ТРТ–ПС (скорость горения образца) может быть определена по формуле

$$u(t) = \frac{\lambda_r}{4\pi} \frac{d\varphi(t)}{dt}, \quad (2)$$

где λ_r – длина электромагнитной волны в исследуемом топливе. На практике удобно использовать коэффициент фазы

$$K_\varphi = \frac{L_\Phi}{L_\phi},$$

где L_Φ – физическая длина исследуемого образца ТРТ, мм (измеряется непосредственно перед исследованием процесса горения топлива); L_ϕ – его электрическая (фазовая) длина, рад (автоматически определяется по результатам эксперимента). В таком случае выражение (2) приобретает следующий вид:

$$u(t) = K_\varphi \frac{d\varphi(t)}{dt}. \quad (3)$$

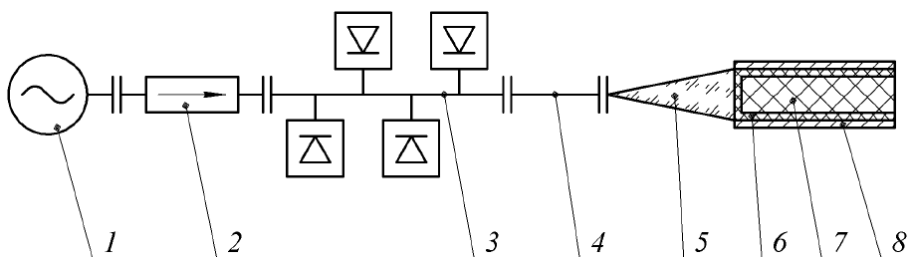


Рис. 3. Схема измерения скорости горения ТРТ

На основе использования метода четырех зондов построена схема измерения скорости горения ТРТ, изображенная на рис. 3. Излучение от СВЧ-источника 1 проходит через вентиль 2, четырехзондовый измеритель полных сопротивлений 3, волноводный тракт 4, согласующее устройство 5 и образец исследуемого топлива 7. Отраженная от фронта горения волна возвращается в обратном направлении и поглощается в вентиле 2. По значению напряжений на детекторах ИПС определяются квадратурные сигналы (1), и далее, в соответствии с представленным методом, находится скорость горения ТРТ по формуле (3). Измерение на ряду с этим давления, при котором происходит горение образца, позволяет в дальнейшем определить закон горения топлива в зависимости от p_k в случае стационарного горения или в зависимости от p_k и dp_k/dt в случае нестационарного процесса.

Вентиль 2 обеспечивает одностороннее распространение излучения от СВЧ-источника, поглощая отраженную волну. Согласующее устройство 5 используется для волнового согласования объема тракта 4 и холодного торца образца 7 в бронеформе 6, имеющих существенные отличия в диэлектрических характеристиках (в частности, диэлектрической проницаемости). Использование запредельного металлического волновода 8 позволяет повысить модуль коэффициента отражения, поскольку при этом исключается прохождение излучения за поверхность горения. Кроме того, при круглой форме его поперечного сечения организуется одномодовый режим распространения волн, что существенно повышает точность измерения скорости горения ТРТ.

На основе разработанного метода созданы две экспериментальные установки для диагностики процесса горения ТРТ, при помощи которых проведены исследования характеристик горения различных видов топлив как в условиях постоянного давления, так и при быстром его спаде. В условиях стационарного горения установлено удовлетворительное согласование результатов измерения с паспортным законом горения исследуемого баллиститного топлива стандартного состава (рис. 4). В условиях быстрого спада давления зафиксированы случаи отклонения скорости горения ТРТ от паспортного значения, соответствующего текущей величине внутрикамерного давления. Отмечены

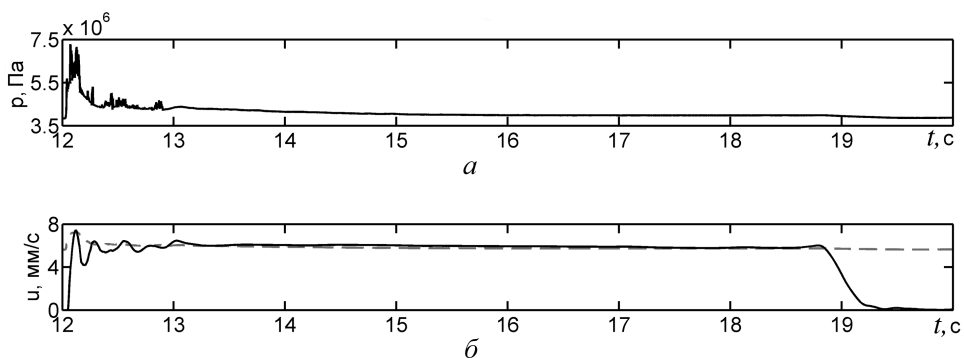


Рис. 4. Результат экспериментального определения скорости горения ТРТ:
а — давление в камере сгорания, *б* — скорость горения ТРТ (— — измеренная разработанным методом, - - - — паспортная)

случаи прекращения горения, в том числе и с последующим воспламенением образца ТРТ, а также колебания текущего значения скорости горения относительно среднего значения. Полученные результаты подтверждают некоторые положения теории Б.В. Новожилова [5], по мнению которого такие нестационарные эффекты горения проявляются из-за инерционности прогретого слоя конденсированной фазы твердого топлива.

Таким образом, разработанный универсальный микроволновой метод, основанный на использовании четырех детекторов, позволяет измерять стационарную и нестационарную скорости горения ТРТ как с малыми, так и с большими диэлектрическими потерями, в том числе металлизированных топлив. Использование данного метода измерения в системах диагностики процесса нестационарного горения ТРТ позволяет в лабораторных условиях исследовать особенности и характеристики нестационарного горения ТРТ широкого класса, снижает временные и материальные затраты на натурную отработку систем с глубоким регулированием расхода (тяги) двигателя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зарко В. Е., Вдовин Д. В., Перов В. В. Методические проблемы измерения скорости горения твердых топлив с использованием СВЧ-излучения // Физика горения и взрыва. – 2000. – № 1. – Т. 36. – С. 68–78.
2. Мошкин М. П. Микроволновой метод измерения скорости горения твердых топлив // Труды МВТУ им. Н.Э. Баумана. – 1979. – № 313. – С. 93–97.
3. Кудрявцев В. М., Сухов А. В., Пак З. П., Мошкин М. П., Тюгаев М. В. Исследование процесса горения гетерогенных конденсированных систем дифференциальным микроволновым методом // Тез. докл. Первого Всесоюз. симпозиума по макроскопической кинетике и химической газодинамике. – М.: Черноголовка, 1984.
4. Бондаренко И. К., Дейнега Г. А., Маграчев З. В. Автоматизация измерений параметров СВЧ трактов. – М.: Сов. радио, 1969. – 304 с.

Алексей Васильевич Сухов родился в 1937 г., окончил в 1961 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Д-р техн. наук, профессор кафедры “Ракетные двигатели” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 150 научных учебно-методических работ и изобретений в области ракетных двигателей.

A. V. Sukhov (b. 1937) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1961. D. Sc. (Eng.), professor of “Rocket Engines” Department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 150 scientific publications and inventions in the field of rocket engines.

Михаил Васильевич Тюгаев родился в 1954 г., окончил в 1978 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Канд. техн. наук, научный сотрудник НИИЭМ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 50 научных работ в области ракетных двигателей.

M. V. Tugaev (b. 1954) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1978. Ph. D. (Eng.), researcher of power machinery research institute of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 50 scientific publications in the field of rocket engines.

Юрий Михайлович Шарай родился в 1980 г., окончил в 2004 г. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Аспирант кафедры “Ракетные двигатели” МГТУ им. Н.Э.Баумана. Специализируется в области твердых ракетных топлив.

Yu. M. Sharay (b. 1980) graduated from Bauman Moscow State Technical University in 2004. Post-graduate of “Rocket Engines” Department of the Bauman Moscow State Technical University. Specializes in the field of solid-fuel rocket engines.

“ВЕСТНИК МОСКОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА имени Н.Э. БАУМАНА”

Журнал “Вестник МГТУ имени Н.Э. Баумана” в соответствии с постановлением Высшей аттестационной комиссии Федерального агентства по образованию Российской Федерации включен в перечень периодических и научно-технических изданий, в которых рекомендуется публикация основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора наук.

Главный редактор журнала “Вестник МГТУ имени Н.Э. Баумана” — ректор МГТУ имени Н.Э. Баумана, чл.-кор. РАН, д-р техн. наук, профессор И.Б. Федоров.

Журнал издается в трех сериях: “Приборостроение”, “Машиностроение”, “Естественные науки” с периодичностью 12 номеров в год. Подписку на журнал “Вестник МГТУ имени Н.Э. Баумана” можно оформить через ОАО “Агентство “Роспечать”.

Подписывайтесь и публикуйтесь!

Подписка по каталогу “Газеты, журналы” ОАО “Агентство “Роспечать”

Индекс	Наименование серии	Объем выпуска	Подписная цена (руб.)	
		Полугодие	3 мес.	6 мес.
72781	“Машиностроение”	2	250	500
72783	“Приборостроение”	2	250	500
79982	“Естественные науки”	2	250	500

Адрес редакции журнала: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5.

Тел.: (495) 263-62-60; 263-60-45. Факс: (495) 261-45-97.

E-mail: press@bmstu.ru