

УДК 536.46; 621.372.812

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ГОРЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СИСТЕМ СВЧ-МЕТОДОМ

Д. А. Ягодников, А. В. Сергеев, В. В. Козичев

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, 105005 Москва, [daj@bmstu.ru](mailto:daj@bmstu.ru)

Рассмотрены теоретическое обоснование и практические способы повышения точности измерения скорости горения энергетических конденсированных систем СВЧ-методом. Проанализированы факторы, снижающие точность измерения, в частности краевые эффекты, незапретельность волновода, изменение эффективного диаметра волновода вследствие неполного выгорания бронирующего состава, уровень внутрикамерного давления, искривление поверхности горения (шероховатость). Определены составляющие, рассчитана систематическая погрешность измерения и предложен метод численной коррекции с целью ее уменьшения до 4.5 %.

Ключевые слова: энергетические конденсированные системы, СВЧ-измерения, скорость горения, погрешность.

## ВВЕДЕНИЕ

При разработке современных ракетных двигательных установок на основе энергетических конденсированных систем (ЭКС) большое значение имеет создание диагностических комплексов для исследования процессов горения ЭКС в стационарных и нестационарных режимах в широком диапазоне параметров. Например, при разработке многорегимных двигательных установок актуально изучение горения ЭКС в нестационарных режимах (в условиях спада, подъема и колебаний внутрикамерного давления), а при разработке импульсных двигательных установок актуальны исследования в условиях высокого и сверхвысокого давления — вплоть до 200 МПа и выше [1, 2].

Из всего разнообразия методов исследования процессов горения ЭКС наиболее перспективными являются СВЧ [3, 4] ввиду возможности диагностики нестационарных процессов, высокой разрешающей геометрической и временной способности, а также потенциально высокой точности.

СВЧ-метод измерения скорости горения [3–5] заключается в определении зависимости комплексного коэффициента отражения  $\Gamma(z)$  в плоскости холодного торца образца от времени. Эта зависимость характеризует процесс от-

ражения электромагнитной волны от границы раздела фаз ЭКС — ПС (продукты сгорания) (рис. 1):

$$\Gamma(z) = \Gamma_{\Phi} \exp(j2\gamma_T z),$$

где  $\Gamma_{\Phi} = b_{\Phi}/a_{\Phi}$  — коэффициент отражения от границы раздела фаз ЭКС — ПС,  $a_{\Phi}$ ,  $b_{\Phi}$  — элементы  $S$ -матрицы, характеризующие плоскость раздела фаз ЭКС — ПС с точки зрения теории СВЧ-цепей (см. рис. 1);  $z$  — координата границы раздела;  $\gamma_T = 2\pi/\lambda$  — постоянная распространения электромагнитной волны длиной  $\lambda$  в топливе. Можно считать, что  $\Gamma_{\Phi}$  для конкретного ЭКС является константой

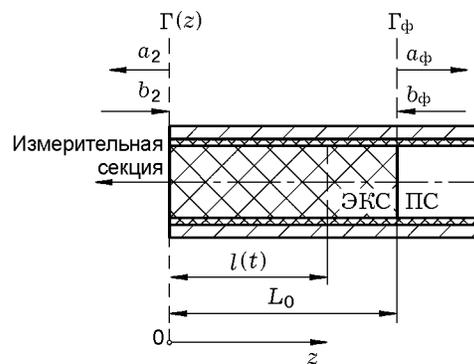


Рис. 1. Схема образца ЭКС, помещенного в волновод СВЧ измерительной секции:

$b_2, b_{\Phi}$  — векторы падающей волны на входах многополюсника (образца ЭКС),  $a_2, a_{\Phi}$  — векторы отраженной волны на входах многополюсника

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 11-08-01186, № 12-08-31135).

и не изменяется во времени ни по амплитуде, ни по фазе. В случае горения образца текущая координата раздела фаз зависит от времени:  $z = l(t)$ . В начальный момент времени ( $t = 0$ )  $z = l = L_0$ . Эксперименты, как правило, проводятся с цилиндрическими образцами торцевого горения с забронированными боковой поверхностью и передним (холодным) торцом. Комплексный коэффициент отражения есть величина векторная, его модуль равен  $|\Gamma|$ , а фаза является непрерывной функцией координаты  $z$ . Таким образом, комплексный коэффициент отражения полностью характеризует положение границы раздела фаз ЭКС — ПС в пространстве и времени, причем полезную информацию несут в себе обе его составляющие. Фаза коэффициента отражения однозначно соответствует текущему положению фронта горения в каждый момент времени. В свою очередь, амплитуда комплексного коэффициента отражения также несет полную информацию о положении поверхности раздела фаз ЭКС — ПС, однако довольно сложно оценить влияние различных неоднородностей состава топлива и равномерности их распределения по своду образца на изменение амплитуды. Также затруднительно оценить зависимость ослабления электромагнитного поля в сложной структуре бронирования — бронировка — ЭКС от текущей длины заряда. Для решения этой проблемы необходимо предварительно провести градуировку системы измерения, однако точность таких измерений будет невысока, поскольку характеристики каждого используемого для испытаний образца изменяются от эксперимента к эксперименту.

Скорость перемещения границы раздела фаз ЭКС — ПС, отождествляемая со скоростью горения образца, определяется по формуле

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

где  $\lambda_T$  — длина электромагнитной волны в исследуемом образце, помещенном в волновод,  $\varphi$  — фаза комплексного коэффициента отражения.

На практике удобно использовать коэффициент фазы  $K_\varphi = L_T/L_\varphi = \lambda_T/4\pi$ , где  $L_T$  — геометрическая длина исследуемого образца топлива,  $L_\varphi$  — его электрическая (фазовая) длина. В таком случае вышеприведенное выражение приобретает следующий вид:

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

В работе [4] проанализирован ряд факторов, обусловленных свойствами образца и экспериментальной установки, влияние которых может снизить точность измерения. В частности, это вибрации экспериментального оборудования; сжимаемость образца; отражения от низкотемпературной плазмы пламени; изменение диэлектрических свойств ЭКС; шероховатость поверхности горения; затухание и рассеяние СВЧ-излучения; кривизна поверхности горения; погрешность, вызванная нестабильностью параметров измерительной системы.

В работе [5] рассмотрен СВЧ-метод измерения скорости горения и определены механизмы возникновения основной составляющей методической погрешности, обусловленной отражением СВЧ-волны от элементов конструкции или стенок волноводов, что приводит к наложению на поле стоячей волны паразитных отражений пропорционально их рассогласованию, а также представлена методика компенсации этой погрешности.

В работах [6, 7] исследовалось взаимодействие СВЧ-волны с элементами конструкции и процессом работы воспламенительного устройства, являющегося источником значительных помех, которые вызваны перегоранием проволоки и генерацией высокочастотных колебаний в разрядном промежутке между концами токопроводов. Установлено, что точность измерения снижается из-за наличия движущихся фрагментов оболочки корпуса воспламенителя, которые вносят возмущения в СВЧ-поле.

Учет факторов и использование методов компенсации их влияния, о которых шла речь в указанных выше работах, дает возможность ожидать снижения погрешности измерения нестационарной скорости горения до  $5 \div 6$  %. Дальнейшее уменьшение погрешности связано с анализом взаимодействия СВЧ-излучения с образцом ЭКС и конструкцией экспериментальной установки. Целью данной работы является экспериментально-теоретическое обоснование уменьшения погрешности измерения скорости горения ЭКС СВЧ-методом. Рассматривается влияние на точность измерения следующих факторов:

- 1) краевые эффекты, возникающие в случае, когда СВЧ-волна не полностью отражается от плоскости раздела фаз ЭКС — ПС и частично проникает в волновод;
- 2) незапределенность волновода, обусловленная тем, что СВЧ-волна не полностью отра-

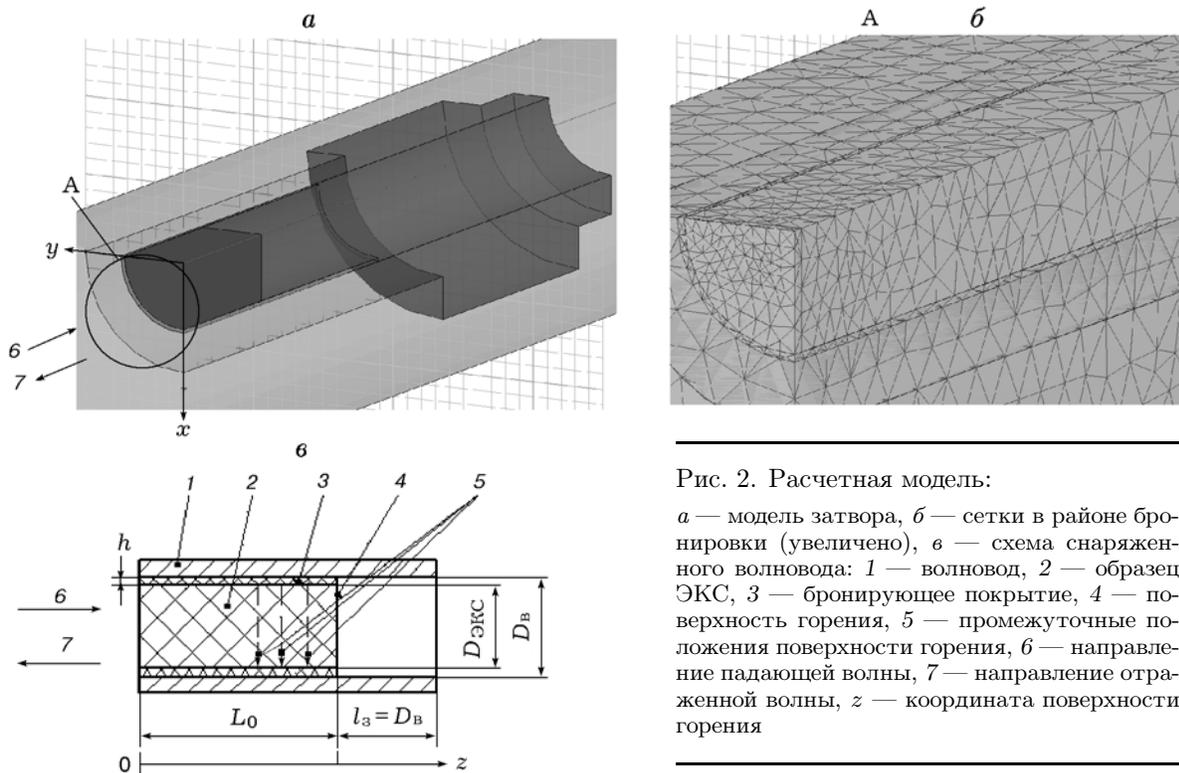


Рис. 2. Расчетная модель:

*a* — модель затвора, *б* — сетки в районе бронирования (увеличено), *в* — схема снаряженного волновода: 1 — волновод, 2 — образец ЭКС, 3 — бронирующее покрытие, 4 — поверхность горения, 5 — промежуточные положения поверхности горения, 6 — направление падающей волны, 7 — направление отраженной волны, *z* — координата поверхности горения

жается от плоскости раздела фаз ЭКС — ПС и возникает наложение волн, отраженных от плоскости раздела фаз и от элементов затворного узла;

3) изменение эффективного диаметра волновода вследствие неполного выгорания бронирующего состава;

4) распределение погрешности СВЧ-метода измерения по длине образца;

5) уровень внутрикамерного давления;

6) кривизна (шероховатость) поверхности горения.

Влияние качества согласования линии передачи от СВЧ-генератора с круглым волноводом, заполненным веществом образца ЭКС, на точность измерения детально обсуждалось в работе [6].

### ВЛИЯНИЕ КРАЕВЫХ ЭФФЕКТОВ

Для оценки влияния краевых эффектов в программном комплексе расчета электрофизических параметров Ansoft HFSS 10 [8] разработана модель распространения фронта горения торцевого заряда в волноводе (рис. 2).

Приняты следующие исходные данные и

параметры расчета:

— окружающее пространство заполнено воздухом;

— материал стенок волновода — нержавеющей сталь;

— рабочая частота излучения 9 027 МГц;

— две плоскости симметрии, расположенные под углом 90°;

— критерий сходимости (maxDeltaS) 0.01;

— максимальный размер ячейки сетки 5 мм (общее количество ячеек 100 000);

— при аппроксимации геометрии заряда максимальное отклонение поверхности 0.1 мм, угла — 15°;

— диаметр волновода  $D_В = 20$  мм, образца —  $D_{ЭКС} = 18$  мм, начальная длина образца  $L_0 = 50$  мм;

— координата поверхности горения  $z: z = L_0, z = 0$  — полное выгорание образца.

Результаты моделирования, в частности годограф комплексного коэффициента отражения, а также соответствующие ему фазовое положение фронта горения и скорость горения, полученная дифференцированием фазового положения фронта горения, представлены на рис. 3.

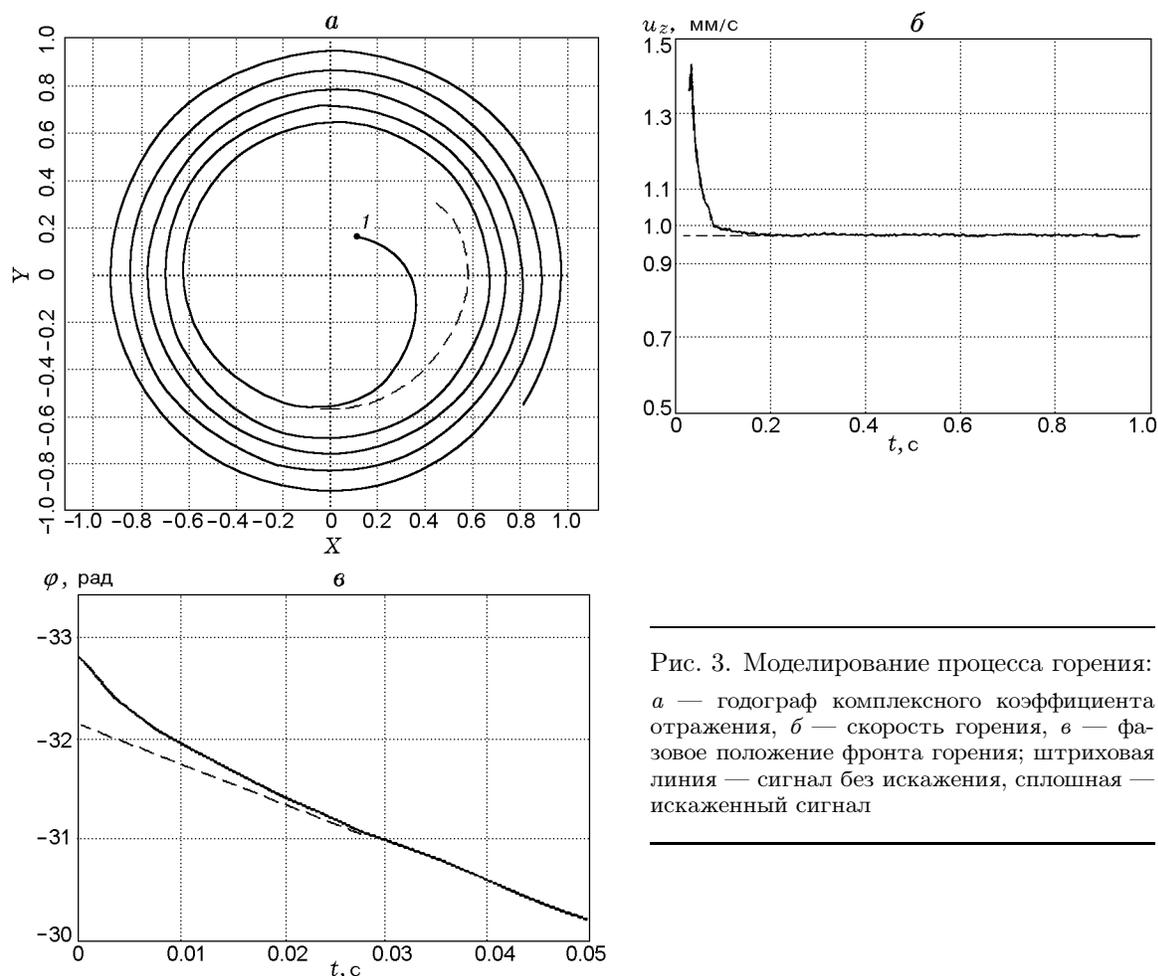


Рис. 3. Моделирование процесса горения:

*a* — годограф комплексного коэффициента отражения, *б* — скорость горения, *в* — фазовое положение фронта горения; штриховая линия — сигнал без искажения, сплошная — искаженный сигнал

На рис. 3 наблюдаются области со значительным искажением параметров (соответствующий сигнал без искажения показан штриховой линией), что можно объяснить тем, что электромагнитное поле имеет регулярную структуру только в случае бесконечного волновода. В случае же конечного волновода в области его торцов возникают краевые эффекты, связанные с «провисанием» электромагнитного поля в волновод. Особенно сильно краевые эффекты проявляются на длине меньше диаметра волновода. На годографе комплексного коэффициента отражения это выражается в деформации спирали (рис. 3, *a*), на скорости горения — в появлении пика (рис. 3, *б*), на фазовом положении фронта горения — в отклонении графика положения от прямой линии (рис. 3, *в*).

Из анализа полученных данных (в частности, показанных на рис. 3, *б*) следует, что в случае использования волновода длиной, рав-

ной длине образца, информация, полученная в период с момента воспламенения до выгорания образца на длину, равную диаметру, может оказаться сильно искаженной, поэтому необходимо обеспечивать заглубление  $l_3$  образца в волновод не менее чем на величину диаметра волновода, как изображено на рис. 2, *в*.

### ВЛИЯНИЕ НЕЗАПРЕДЕЛЬНОСТИ ВОЛНОВОДА

При размещении образца ЭКС в запердежном волноводе (диаметр которого меньше критического и, следовательно, распространение электромагнитной волны в нем невозможно) СВЧ-волна отражается от границы раздела фаз ЭКС — ПС. Критический диаметр круглого волновода определяется по формуле  $D = 2\lambda_{кр}/(3.41\varepsilon^{1/2})$ , где  $\varepsilon$  — диэлектрическая проницаемость материала образца. В случае, когда волновод незапердежный, при исполь-

зуемой длине волны часть электромагнитного излучения проникает за границу раздела фаз ЭКС — ПС. Вышедшая из образца электромагнитная волна распространяется по не заполненному веществом ЭКС волноводу и также частично отражается от свободного торца волновода. В волноводу возникает резонанс электромагнитных волн, отраженных от поверхности горения образца и свободного торца волновода, что вносит соответствующие искажения.

Для анализа этого фактора, снижающего точность измерения СВЧ-методом, использовалась модель, применявшаяся при анализе влияния краевых эффектов (см. рис. 2, а, б). Толщина бронирующего состава составляла 0.1 мм, диаметр волновода 18 и 20 мм, диэлектрическая проницаемость образца принималась равной  $\epsilon = 1.5, 2, 3$  и 4.

Резонанс можно наблюдать на огибающей квадратурных сигналов действительной  $Re(\Gamma)$  и мнимой  $Im(\Gamma)$  частей комплексного коэффициента отражения  $\Gamma$  (рис. 4, 5). Волновод диаметром 20 мм (см. рис. 4) является незапредельным, а диаметром 18 мм (см. рис. 5) — запредельным. На длине образца до 25 мм снижение значения  $|\Gamma|$  в результате влияния резонанса достигает  $\approx 10\%$ , а на длине образца 25 ÷ 45 мм — до  $\approx 50\%$ . Модуль  $|\Gamma|$  является радиусом годографа комплексного коэффициента отражения. Соответственно при постоянном числе оборотов годографа комплексного коэффициента отражения скорость изменения фазы

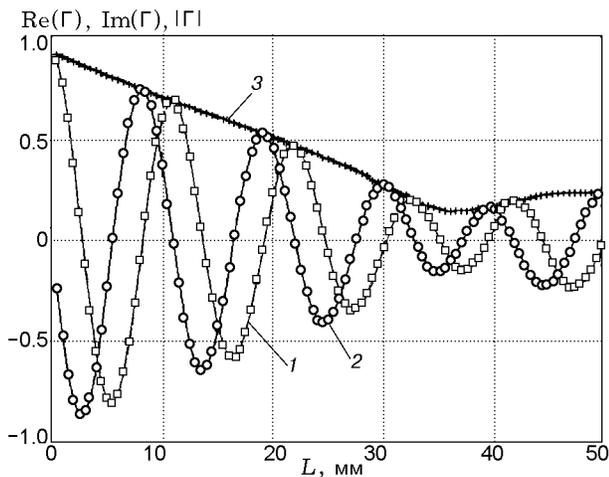


Рис. 4. Результаты моделирования для незапредельного волновода диаметром 20 мм:  
1, 2 — квадратурные сигналы ( $Re(\Gamma)$ ,  $Im(\Gamma)$ ),  
3 — огибающая квадратурных сигналов ( $|\Gamma|$ )

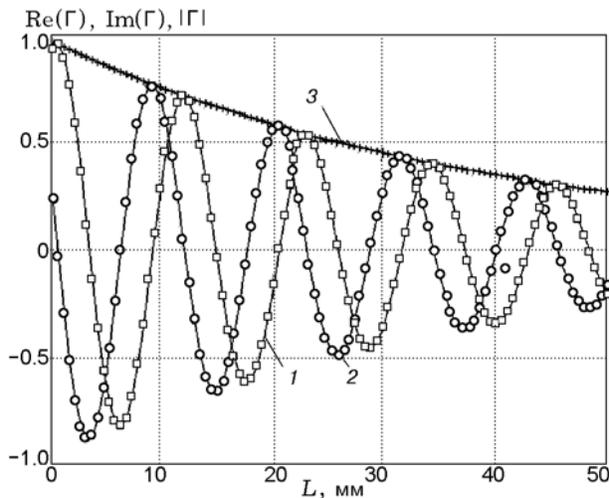


Рис. 5. Результаты моделирования для запредельного волновода диаметром 18 мм:  
1, 2 — квадратурные сигналы ( $Re(\Gamma)$ ,  $Im(\Gamma)$ ),  
3 — огибающая квадратурных сигналов ( $|\Gamma|$ )

(что эквивалентно скорости горения ЭКС) снижается при уменьшении  $|\Gamma|$ , что и приводит к возникновению погрешности измерения скорости горения.

Проведено исследование влияния диэлектрической проницаемости на местоположение и амплитуду резонанса СВЧ-волн. Установлено, что диэлектрическая проницаемость исследуемого образца не влияет на местоположение резонанса СВЧ-волн, а изменяет только амплитуду резонанса (рис. 6).

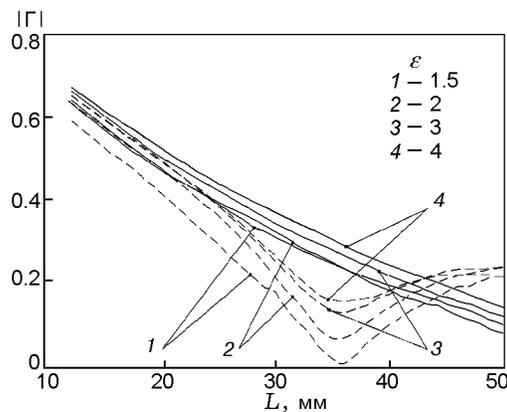


Рис. 6. Влияние диэлектрической проницаемости на резонанс СВЧ-волн:  
сплошные линии — для запредельного волновода диаметром 18 мм, штриховые — для незапредельного волновода диаметром 20 мм

Так как амплитуда возникающего резонанса зависит от диэлектрической проницаемости образца ЭКС и бронирующего покрытия, которые могут изменяться в широких пределах (диэлектрическая проницаемость ЭКС меняется от 2 до 81), то определение точного значения погрешности измерения скорости, вносимой незапредельностью волновода, является чрезвычайно сложной задачей. Таким образом, необходимо контролировать и обеспечивать соблюдение запредельности волновода для устранения данного вида погрешности.

### ВЛИЯНИЕ НЕПОЛНОГО ВЫГОРАНИЯ БРОНИРУЮЩЕГО ПОКРЫТИЯ

Образец ЭКС, подготовленный для снаряжения в установке (рис. 7), представляет собой заряд 1 цилиндрической формы, помещенный в бронеформу 2, выполненную в виде плексигласового стаканчика. В радиальный зазор и зазор между дном и задним торцом заливается бронирующий состав 3. Таким образом, бронирующее покрытие в совокупности представляет собой позиции 2 и 3.

В процессе сгорания ЭКС бронирующее покрытие выгорает не полностью, что уменьшает критическую длину волны (и, соответственно, увеличивает критический диаметр) в данном волноводе, так как диэлектрическая проницаемость невыгоревшего слоя больше диэлектрической проницаемости ПС. Увеличившийся критический диаметр позволяет части электромагнитного излучения проникать за границу раздела фаз ЭКС — ПС. Это приводит соответственно к интерференции волн, отраженных от плоскости горения и плоскости

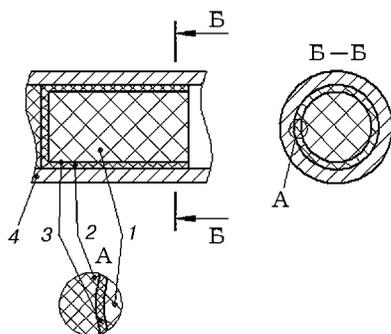


Рис. 7. Схема бронированного образца ЭКС:  
1 — образец ЭКС, 2 — плексигласовый стаканчик,  
3 — слой бронирующего связующего, 4 — волноводная втулка

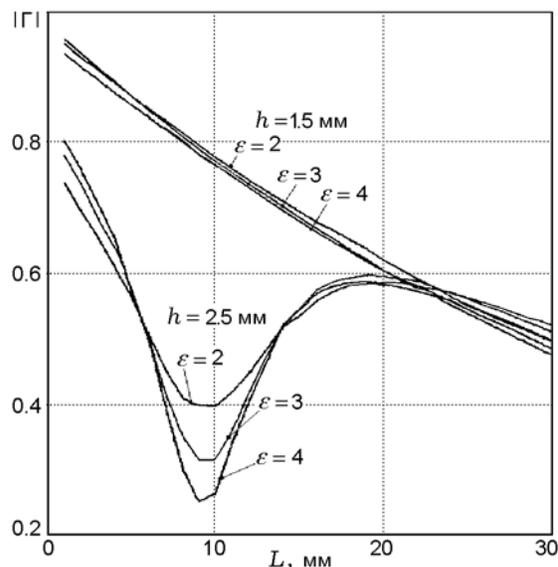


Рис. 8. Влияние толщины бронирующего покрытия на возникновение резонанса СВЧ-волн

среза бронирующего покрытия, и к возникновению резонанса. При увеличении критического диаметра до значения, при котором волновод становится незапредельным, погрешность в измерениях начинают вносить резонансные явления (рис. 8). Кроме того, рост диэлектрической проницаемости исследуемого образца усиливает резонанс и влияет на степень отклонения измеренных характеристик горения ЭКС от реальных.

Устранить данный недостаток можно, снижая толщину бронировки образца ЭКС заведомо ниже толщины, при которой увеличение критического диаметра волновода из-за не полностью сгоревшей бронировки приводит к резонансным явлениям (из рис. 8 следует, что  $h_{кр} = 1.5$  мм). Этого можно добиться, например, изменением схемы бронирования: вместо плексигласового стаканчика помещать образец в металлическую втулку, что несколько усложняет технологию и контроль качества бронирования, но исключает дополнительное искажение сигнала.

### АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТИ СВЧ-МЕТОДА ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ДЛИНЫ ОБРАЗЦА

Для анализа структуры погрешности единичного пуска проведен комплекс экспериментально-теоретических работ, по результатам которых выявлено наличие как случайной, так и систематической составляющей погрешности

определяемой величины положения поверхности горения (и, соответственно, погрешности определяемой скорости горения ЭКС). Использовались модельная гидроустановка (рис. 9) и штатная СВЧ-система измерения с затворным узлом 3 и цилиндрическим волноводом 1, геометрические характеристики которого идентичны используемому при огневых пусках.

Экспериментальные исследования выполнялись для нескольких материалов-имитаторов (касторовое масло,  $\varepsilon = 2.5 \div 3.0$ ; масло машинное,  $\varepsilon = 2.2 \div 2.5$ ; керосин,  $\varepsilon = 2.0 \div 4.0$ ) с достоверно известными механическими и электрофизическими свойствами. Высота уровня имитаторов модели с высокой точностью регулируется с помощью гидроцилиндра 4, соединенного с имитатором гидравлической магистралью 2. Перемещение поршня ( $\Delta x$ ) контролируется микрометрическим винтом 5 с шагом перемещения 0.5 мм. Таким образом, уровень имитатора в волноводе ( $l$ ) может быть определен в любой момент времени через известное перемещение поршня и соотношение диаметров гидроцилиндра ( $D_{ц}$ ) и волновода ( $D_{в}$ ) с точностью 0.78 %. В ходе эксперимента высота уровня имитатора увеличивалась, для того чтобы оставшийся на стенках волновода слой масла не изменял критическую длину волны в волноводе.

Характерный вид погрешности  $\delta$  определения положения имитатора представлен на рис. 10. В результате анализа экспериментальных данных установлено, что систематическая погрешность детерминирована по физической длине исследуемого образца и имеет характер гармонической функции, параметры которой

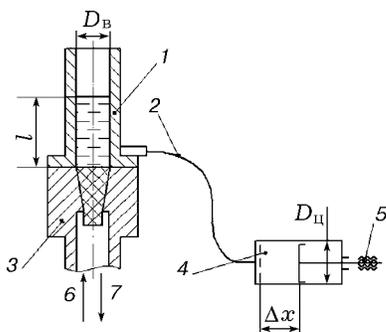


Рис. 9. Модельная гидроустановка:

1 — волновод, 2 — гидравлическая магистраль, 3 — затворный узел, 4 — гидроцилиндр, 5 — микрометрический винт, 6 — направление падающей волны, 7 — направление отраженной волны

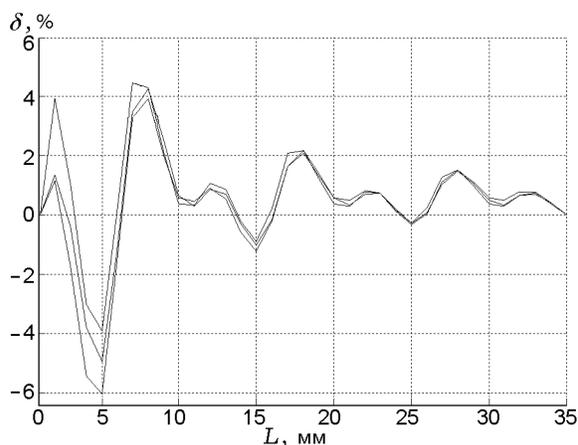


Рис. 10. Характерный вид погрешности измерения уровня имитатора

зависят от физических свойств исследуемого материала.

Можно заключить, что максимальная погрешность реализуется при определенной высоте уровня имитатора, меньшей радиуса волновода ( $\approx 9$  мм). Это можно объяснить взаимодействием отражений электромагнитной волны от горячего (граница раздела фаз ЭКС — ПС) и холодного торцов образца, поскольку на границах раздела диэлектриков разные значения  $\varepsilon$ . Так, для стеклотекстолита  $\varepsilon = 4.6$ , для ЭКС  $\varepsilon = 2.0 \div 4.2$  и более (в зависимости от исследуемого ЭКС). Длина, на которой происходит это явление, объясняется использованием запредельного волновода, обеспечивающего затухание волны, возникающей в плоскости стыка согласующего конуса и ЭКС, на длине более радиуса волновода. Таким образом, заявленная в работе [7] систематическая погрешность  $\delta \approx 6$  % соответствует только конечному участку горения, а при протяженности объекта измерения более радиуса волновода, как видно из характера распределения погрешности (см. рис. 10), величина  $\delta$  составляет  $\pm 2$  %. В связи с этим использование более длинных образцов ЭКС (150 мм и более) позволяет без потери полезной информации не учитывать конечный участок образца при исследовании горения ЭКС с систематической погрешностью определения положения фронта горения  $\pm 2$  %.

## ВЛИЯНИЕ УРОВНЯ ВНУТРИКАМЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ

Проведено экспериментальное исследование влияния внутрикамерного давления на по-

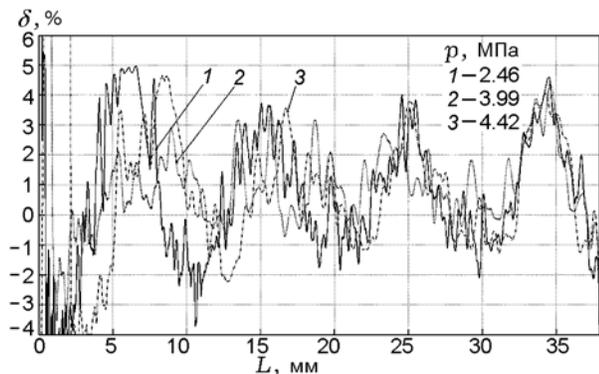


Рис. 11. Распределение погрешности измерения скорости горения по длине выгорания образца при различном давлении в камере сгорания

грешность определения скорости горения в зависимости от длины выгоревшего ЭКС. Образцы одинаковой длины сжигались при различном уровне внутрикамерного давления. Подбор диаметра критического сечения и давления наддува камеры обеспечивает постоянство давления в камере сгорания и стационарный режим горения образца. Скорость горения в условиях стационарного давления вычисляется двумя способами. Первый заключается в определении скорости горения исходя из полной длины образца и суммарного времени горения (метод локальных контрольных точек). Второй способ — непосредственно измерение СВЧ-методом. Эталоном служат результаты измерения методом локальных контрольных точек, с которыми сравниваются результаты, полученные СВЧ-методом. Распределение погрешности измерения скорости горения по длине образца при различных уровнях среднего внутрикамерного давления приведено на рис. 11.

Характер распределения погрешности при сжигании реальных образцов ЭКС (см. рис. 11) совпадает с распределением, полученным на имитаторе горения (см. рис. 10). Также наблюдается максимальная амплитуда погрешности ( $\approx 5\%$ ) определения скорости горения на длине образца менее 9 мм, которая затем снижается до  $\approx 3 \div 4\%$ , но при этом результаты реальных экспериментов качественно согласуются друг с другом с некоторым смещением, что обусловлено наличием случайной погрешности. Из графиков видно, что незначительное смещение погрешности от эксперимента к эксперименту происходит вдоль длины образца, но не по амплитуде, что указывает на слабое

влияние внутрикамерного давления на погрешность определения скорости горения ЭКС.

### ВЛИЯНИЕ НЕРОВНОСТИ (ШЕРОХОВАТОСТИ) ПОВЕРХНОСТИ ГОРЕНИЯ

Одно из условий применения СВЧ-метода измерения заключается в том, что горение образца ЭКС идет плоскопараллельными слоями в направлении, перпендикулярном оси волновода. Отражение электромагнитной волны происходит в плоскости, соответствующей положению среднеинтегральной поверхности фронта горения, а небольшая шероховатость поверхности горения существенно не влияет на точность определения коэффициента отражения и, как следствие, на точность измерения скорости горения. Допущение о горении ЭКС параллельными слоями оправданно при качественной бронировке топлива.

Шероховатость поверхности горения заряда ЭКС (в смесевых системах размер частиц окислителя может достигать 1 000 мкм) не оказывает существенного влияния на точность измерения в трехсантиметровом диапазоне длин СВЧ-волн ( $\approx 9$  ГГц), поскольку они значительно превышают величину микронеровностей, а также ввиду существенного различия диэлектрических характеристик ЭКС и их продуктов сгорания. При малой шероховатости и незначительных углах отклонения средней поверхности от ортогонального положения данное допущение полностью обосновано с позиций теории СВЧ-систем. Однако оценка того, как влияют на точность измерения скорости горения факторы увеличения степени шероховатости, прогар бронирующего покрытия вдоль стенки волновода, сложная поверхность горения, возникающая в результате неоднородного состава ЭКС или по другим причинам, приводящим к существенному отклонению средней поверхности горения от номинального положения, не отражена в опубликованных работах.

Эксперименты проводили на установке и по методике, которые аналогичны использованным при исследовании распределения погрешности СВЧ-метода по длине образца. Ориентация границы раздела фаз (масло — воздух) осуществлялась контролируемым наклоном экспериментальной установки на заданный угол  $\alpha$  относительно местной гравитационной вертикали.

Измерения (32 значения высоты столба жидкости с шагом 1.5 мм) выполнялись для уг-

лов  $0 \div 20^\circ$  с шагом  $5^\circ$ . В результате обработки полученных данных определялось положение поверхности отражения для каждого значения высоты столба жидкости. Приняв шаг между положениями жидкости за единицу времени  $\Delta t$ , вычисляли распределение значений скорости изменения уровня жидкости (раздела фаз) и ее погрешности по физической длине образца.

По результатам эксперимента для каждого угла ориентации границы раздела фаз получена относительная погрешность определения скорости изменения высоты столба жидкости  $l$  (рис. 12). Данная зависимость отражает распределение погрешности определения скорости горения ЭКС в реальном пуске при возможном изменении геометрии поверхности горения.

При отклонении отражающей поверхности менее чем  $10^\circ$  (распределение погрешности по длине зависит от свойств имитатора, на рис. 10 и 12 использовалось разное масло, что привело к осевому смещению распределения, без увеличения амплитуды) угол ориентации слабо влиял на погрешность измерения во всем диапазоне длин образца и не превышал  $\approx 5.0\%$ .

При угле наклона более  $15^\circ$  выделяются две зоны. В первой зоне (на расстоянии более радиуса волновода от нижнего («холодного») торца образца) увеличение угла ориентации приводит к незначительному увеличению погрешности измерения СВЧ-метода, ко-

торая достигает  $\approx 6.5\%$  при угле наклона  $20^\circ$ . Это характеризует линейный закон изменения погрешности измерения в зависимости от угла наклона. Во второй зоне (расстояние менее радиуса волновода от нижнего торца имитатора) влияние краевых эффектов усиливается, это приводит к существенному увеличению погрешности при возрастании угла наклона ( $\delta = 15$  и  $21\%$  для углов  $15$  и  $20^\circ$  соответственно). В результате усиления краевых эффектов характер зависимости погрешности измерения от угла наклона изменяется, она становится степенной с показателем больше единицы.

Отклонение поверхности от горизонтальной можно интерпретировать (с точки зрения отражения электромагнитного излучения) как шероховатость поверхности, средняя плоскость которой совпадает со среднеинтегральной поверхностью отклоненной жидкости. При этом допускаем, что шероховатость не приводит к рассеиванию СВЧ-излучения. В реальных условиях она не только искажает поверхность горения, но и увеличивает потери электромагнитного излучения (рассеивание). Уровень шероховатости представляет собой разницу между максимальным и минимальным уровнями жидкости в волноводе при фиксированном угле наклона. Длина электромагнитной волны частотой  $9027$  МГц в круглом волноводе, заполненном маслом, составляет  $25.3$  мм. Разность уровней жидкости  $l_{\max} - l_{\min}$  при угле  $10^\circ$  равна  $3.2$  мм, что соответствует  $1/8$  длины волны. Таким образом, можно сделать вывод, что на погрешность определения скорости горения СВЧ-методом не оказывает ощутимого влияния уровень шероховатости поверхности горения ЭКС, равный менее  $1/8$  длины волны в данном материале, что для диэлектрических характеристик большинства безметаллических ЭКС равно  $\approx 3$  мм. Уровень шероховатости от  $3$  до  $6$  мм ощутимо изменяет погрешность только в области влияния краевых эффектов. Таким образом, даже при значительном уровне шероховатости поверхности горения большая часть данных по скорости горения образца является достоверной.

## МЕТОД ЧИСЛЕННОЙ КОРРЕКЦИИ

Для снижения систематической составляющей погрешности разработан численный метод, состоящий в определении корректирующих поправок по данным градуировочных экспериментов. Такие эксперименты проводятся

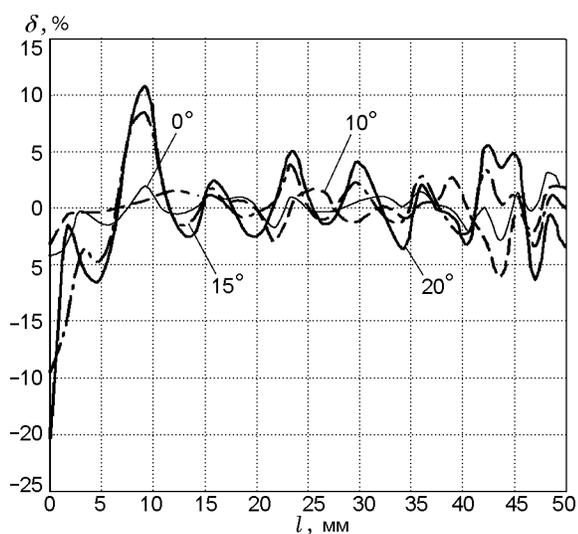


Рис. 12. Относительная погрешность определения скорости изменения уровня жидкости при различных углах ориентации поверхности раздела фаз

в стационарном режиме горения с использованием метода локальных контрольных точек (для определения эталонной скорости горения ЭКС) и СВЧ-метода. Отклонение измеренной СВЧ-методом скорости горения от эталонной для каждого замера градуировочного пуска ( $\Delta u_{\text{град}i}$ ) рассчитывается по формуле

$$\Delta u_{\text{град}i} = \bar{u}_{\text{град}} - u_{\text{град}i},$$

где  $\bar{u}_{\text{град}}$ ,  $u_{\text{град}i}$  — соответственно эталонная и измеренная СВЧ-методом скорость горения в процессе градуировочного пуска,  $i$  — порядковый номер индивидуального дискретного замера параметров.

Корректировочная поправка вычисляется по формуле

$$F_i = \Delta u_{\text{град}i} / \bar{u}_{\text{град}}$$

отдельно для каждого  $j$ -го градуировочного эксперимента ( $F_{ij}$ ). После этого определяется массив средних значений корректировочной поправки:

$$\bar{F}_i = \sum_{j=1} \frac{F_{ij}}{j}.$$

Осредненный массив значений  $\bar{F}_i$  действителен для конкретной установки с СВЧ-системой измерения и исследуемого состава материала и характеризует погрешность скорости горения в каждом  $i$ -м замере.

Измеренная скорость горения приводится к действительному значению по формуле

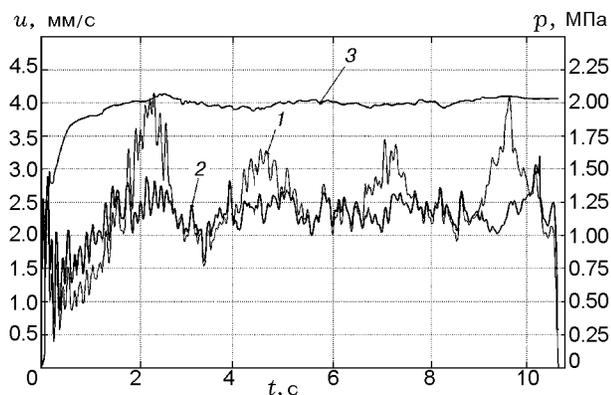


Рис. 13. Сравнение исходной (1) и скорректированной методикой численной коррекции (2) скоростей горения (3 — давление в камере сгорания)

$$u_{\text{действ}i} = u_{\text{измер}i}(1 - \bar{F}_i).$$

Скорости горения смесового образца ЭКС, полученные по методике численной коррекции, представлены на рис. 13.

Сравнение экспериментальных данных с паспортными данными горения ЭКС и с осредненной на стационарном участке давления скоростью горения, полученной нами по СВЧ-методике, показало, что в случае применения разработанной методики численной коррекции погрешность измерения скорости горения не превышает 4.5 %.

## ВЫВОДЫ

1. В результате анализа данных по взаимодействию СВЧ-излучения с образцом ЭКС и конструкцией экспериментальной установки определен характер влияния на точность измерения скорости горения ЭКС следующих факторов: краевых эффектов, незапредельности волновода, осаждения продуктов сгорания и неполного разложения бронирующего покрытия, шероховатости поверхности горения ЭКС и внутрикамерного давления.

2. Выявлена зависимость погрешности измерения скорости горения ЭКС СВЧ-методом от длины образца. Показано, что погрешность можно снизить за счет внедрения практических рекомендаций в методику эксперимента и использования разработанных алгоритмов обработки экспериментальных результатов.

3. Разработана методика численной коррекции, позволяющая снизить погрешность измерения нестационарной скорости горения СВЧ-методом до 4.5 %.

4. Разработаны практические рекомендации по экспериментальному определению скорости горения ЭКС с помощью СВЧ-системы измерения с получением максимально достоверных и точных данных:

- применять запредельный волновод (для данной частоты и диэлектрических параметров исследуемого материала);

- использовать минимальное заглубление образца в волновод, равное диаметру волновода;

- ограничить максимальную толщину бронировки значением 1.5 мм на радиус (для волновода диаметром 18 мм при частоте 9027 МГц);

- учитывать при анализе данных по скорости горения ЭКС зависимость погрешности

измерения от физической длины образца.

Авторы выражают признательность И. В. Гавриленко за помощь и содействие при подготовке рукописи.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Петренко В. И., Соколовский М. И., Зыков Г. А. и др.** Управляемые энергетические установки на твердом ракетном топливе / под общ. ред. М. И. Соколовского, В. И. Петренко. — М.: Машиностроение, 2003.
2. **Архангельский И. И., Афанасьев П. П., Болотов Е. Г. и др.** Проектирование зенитных управляемых ракет / под ред. И. С. Голубева, В. Г. Светлова — М.: Изд-во МАИ, 2001.
3. **Ягодников Д. А. и др.** Экспериментальная методика и модельная установка для исследования горения энергетических конденсированных систем при высоких давлениях // Вестн. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Машиностроение. Спец. вып. «Энергетическое и транспортное машиностроение». — 2011. — С. 63–73.
4. **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. — Т. 36, № 1. — С. 68–78.
5. **Лавров Б. П., Шарай Ю. М., Сергеев А. В.** Применение метода измерения  $S$ -параметров для исследования процесса горения твердых ракетных топлив // Электромагнит. волны и электрон. системы. — 2007. — Т. 12, № 3. — С. 46–51.
6. **Лавров Б. П. и др.** Определение скорости горения твердого топлива с применением измерителя полных сопротивлений СВЧ-диапазона // Вестн. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение. — 2009. — № 1. — С. 28–36.
7. **Сухов А. В. и др.** Газофакельное воспламенительное устройство // Вестн. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Машиностроение. — 2010. — № 3. — С. 70–76.
8. **Банков С. Е., Курушин А. А.** Расчет антенн и СВЧ структур с помощью HFSS Ansoft. — М.: НПП «Родник», 2009.

*Поступила в редакцию 11/II 2013 г.*

---