

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ГОРЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТОПЛИВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ

В. Е. Зарко, Д. В. Вдовин, В. В. Перов

Институт химической кинетики и горения СО РАН, 630090 Новосибирск

Описаны принципы и приведен краткий обзор способов измерения скорости горения твердых топлив с помощью СВЧ-метода. Дано описание разработанного авторами измерителя скорости горения 2-миллиметрового диапазона СВЧ-излучения, и приведены предварительные результаты, полученные при работе с этим прибором. Рассмотрены ограничения метода, источники ошибок и проблемы, связанные с выбором диапазона СВЧ-излучения и схем измерения. Перечислены проблемы, которые необходимо решать для повышения точности и надежности измерений скорости горения СВЧ-методом.

ВВЕДЕНИЕ

Точные измерения скорости горения твердых топлив представляют большой интерес как для инженеров, занимающихся разработкой и тестированием твердотопливных двигателей и газогенераторов, так и для научных работников, изучающих процессы горения. При проектировании твердотопливного двигателя необходимо иметь сведения о скорости горения твердого топлива с погрешностью не более 1 % [1]. Данные скорости горения могут быть получены в результате либо расчетов, либо прямых или косвенных измерений. К сожалению, в настоящее время теоретические модели не позволяют рассчитывать скорость горения с требуемой точностью из-за того, что отсутствует детальное понимание механизмов физико-химических процессов, происходящих в зоне реакций в окрестности поверхности горения.

Экспериментальные методы позволяют сравнительно просто получать сведения о стационарной скорости горения, однако измерения в нестационарных условиях проводить неизмеримо сложнее. В то же время информация о нестационарном горении представляет особую ценность для исследователей и инженеров в связи с задачами тестирования моделей горения и обеспечения безопасных режимов работы камеры сгорания. Несмотря на многолетнюю историю проблема измерения нестационарной скорости горения твердых топлив с требуемыми точностью и временным разрешением до сих пор остается актуальной. Для ее ре-

шения необходим надежный метод измерения, обладающий высоким временным и пространственным разрешением и не оказывающий влияния на процесс горения. В работе [2] приведены оценки требований к системе измерения нестационарной скорости горения в условиях переменного давления. Согласно [2] в случае, когда давление в камере p модулируется с частотой 400 Гц и амплитудой δp , при скорости горения $r = 1$ см/с, функции отклика скорости горения по давлению $R = (\delta r/r)/(\delta p/p) = 1$ и при значении $\delta p/p = 0,1$, требуется измерить изменение скорости горения $\delta r = 0,1$ см/с при временном разрешении не хуже 0,5 мс. Для достижения таких показателей система должна иметь эквивалентное разрешение по толщине выгорающего слоя на уровне долей микрометра.

Известные прямые методы основаны на измерении скорости движения поверхности горения. При этом особый интерес представляют методы, позволяющие измерять мгновенную скорость горения. Анализ показывает [1, 3], что из трех хорошо известных методов: кино съемки в рентгеновских лучах, ультразвукового метода и радиоволнового сверхвысокочастотного метода (СВЧ-метода) — только последний теоретически может обеспечить измерение скорости горения с ошибкой менее 1 % на малой базе и может быть использован для исследования нестационарного горения. В частности, при измерении скорости движения идеальной отражающей поверхности можно достичь пространственного разрешения $\approx (0,1 \div 1)$ мкм при временном разрешении $\approx (1 \div 5)$ мс. СВЧ-метод

является бесконтактным методом контроля и не влияет на процесс горения, так как мощность применяемых СВЧ-генераторов обычно не превосходит единиц — десятков милливольт.

В настоящей работе дан краткий обзор принципов и способов измерения скорости горения твердых топлив с помощью СВЧ-метода, которые были использованы различными исследователями для измерения стационарной и нестационарной скоростей. Приведены предварительные результаты, полученные авторами при работе с СВЧ-измерителем скорости горения 2-миллиметрового диапазона СВЧ-излучения. Рассматриваются ограничения метода, источники ошибок и проблемы, связанные с выбором диапазона СВЧ-излучения и схем измерителей.

ПРИНЦИПЫ СВЧ-ИЗМЕРЕНИЙ

СВЧ-метод измерения неэлектрических величин, в частности скорости движения, толщины и других характеристик, интересных с точки зрения изучения процессов горения, основан на использовании зависимости интегральных характеристик электромагнитных систем с распределенными параметрами от измеряемых величин. Электромагнитные системы, применяемые в качестве первичных преобразователей (датчиков) СВЧ-измерителей, могут работать в диапазоне от десятков мегагерц до сотен гигагерц.

Можно указать следующие основные информативные параметры электромагнитной системы: основная резонансная частота; резонансная частота высших типов колебаний; число резонансных импульсов, возбуждаемых на определенном интервале частот; добротность резонансной системы; параметры стоячей волны на фиксированной частоте генератора; время распространения электромагнитного сигнала до контролируемого объекта и обратно; частотный сдвиг частотно-модулированной падающей волны по отношению к отраженной или прошедшей волне; фазовый сдвиг падающей и отраженной или прошедшей волн; доплеровский сдвиг частоты отраженной или прошедшей волны по отношению к частоте падающей волны; амплитуда отраженной или прошедшей волны. Такое многообразие позволяет выбрать оптимальный информативный параметр для конкретной задачи и тем самым обеспечить эффективное техническое решение,

удовлетворяющее характеру объекта, метрологическим требованиям, условиям эксперимента и т. д.

СВЧ-метод в применении к задачам горения позволяет измерять линейную скорость горения для различных режимов горения и технологических параметров топлива (плотности, влажности, степени полимеризации и т. д.). Возможно применение метода для измерения массовой скорости горения, а также для контроля качества топлива [4] при его изготовлении.

При измерении скорости горения в качестве информативного параметра используется изменение фазы волны СВЧ-излучения при ее отражении от движущейся поверхности горения или прохождении через поверхность горения. Фазометрический метод предполагает вычисление скорости горения на основе данных об изменении текущей фазы СВЧ-излучения в результате взаимодействия с поверхностью горения. При движении поверхности горения непрерывно изменяющийся фазовый сдвиг в любой момент времени пропорционален толщине топлива, а скорость горения пропорциональна производной фазового сдвига по времени. Получить информацию о текущей фазе СВЧ-сигнала можно двумя методами.

1. Интерференционный метод. В схеме интерферометра происходит взаимодействие опорного и измерительного СВЧ-сигналов. Мгновенная амплитуда результирующего сигнала соответствует мгновенному сдвигу фаз между опорным и измерительным сигналами. Наиболее часто схемы интерферометров строятся на основе СВЧ-моста — так называемого двойного волноводного тройника, в котором происходит деление первичного сигнала и сложение отраженных сигналов из двух разных плеч интерферометра. Отраженный сигнал опорного плеча имеет постоянную амплитуду и фазу. Фаза отраженного сигнала измерительного плеча изменяется при движении поверхности горения. Амплитуда этого сигнала также изменяется, так как изменяется ослабление СВЧ-сигнала по мере изменения толщины исследуемого топлива. Этот способ применяется в основном для измерения стационарной и квазистационарной скоростей горения по экстремальным точкам интерферограммы. Возможность применения данного способа для нестационарных измерений ограничивается теми случаями, когда амплитуда измерительно-

го сигнала существенно не меняется, так как для извлечения информации о фазе с разрешением, требуемым для нестационарных измерений скорости, необходимо получение постоянной амплитуды интерферограммы. Это соответствует топливам с малыми потерями СВЧ-мощности и (или) малой толщиной топлива.

2. Метод прямого измерения текущего сдвига фазы между опорным и измерительным сигналами с помощью фазометра. В этом случае фазовый сдвиг преобразуется в пропорциональный временной интервал. Измерение фазы сводится к измерению пропорционального фазе интервала времени. При этом изменение амплитуды сигнала не имеет существенного значения для нестационарных измерений. Принципиальным здесь является разрешающая способность фазометра и его быстродействие.

Условия применимости СВЧ-методов, различающихся способом (интерференция и прямое измерение фазы) получения выходного сигнала, можно сформулировать следующим образом.

В случае, когда поверхность горения представляет собой идеальную отражающую поверхность и нет существенных потерь СВЧ-мощности в топливе, оба метода принципиально пригодны как для стационарных, так и для нестационарных измерений. При этом в случае определения нестационарной скорости по интерферограмме существуют зоны пониженной точности в окрестностях экстремумов синусоиды. пилообразный выходной сигнал при методе прямого измерения фазы имеет зоны неопределенности в окрестности перехода на соседний линейно нарастающий участок пила.

В случае идеальной отражающей поверхности, но существенных потерь СВЧ-мощности в топливе определение нестационарной скорости по интерферограмме с требуемой точностью оказывается невозможным, если не применять способы поддержания постоянного уровня сигнала интерференции. В методе прямого измерения фазы изменение уровня измерительного сигнала за счет потерь СВЧ-мощности в топливе не ограничивает принципиальной возможности нестационарных измерений.

Неидеальность отражающей поверхности в одинаковой степени ограничивает точность измерений как интерференционного, так и прямого фазометрического метода в заданном СВЧ-диапазоне.

КРАТКИЙ ОБЗОР БИБЛИОГРАФИИ

Первая работа, посвященная применению СВЧ-метода [5] для исследования горения и взрыва, появилась в 1953 г. В ней описано применение метода для измерения скорости детонации взрывчатых веществ. Этой же теме посвящены работы [6, 7]. Несколько позже были опубликованы результаты измерений характеристик горения твердых топлив [8]. В этой работе обсуждались вопросы вычисления скорости горения, приведен сравнительный анализ методик ее измерения. Была предложена методика, основанная на интерференции зондирующей волны и волны, отраженной от поверхности горения. Для повышения чувствительности измерительной системы использовалась мостовая схема на основе двойного волнового тройника. Эксперимент показал работоспособность метода в применении к задачам горения твердых топлив.

Применение СВЧ-метода для измерения скорости горения в условиях слабопеременного давления исследовано в [9]. В этой работе применялась бомба с повышением давления в процессе горения. Мощность СВЧ-генератора при частоте порядка 24 ГГц равнялась 250 мВт. Зондирующее СВЧ-излучение распространялось по волноводной системе и отражалось от поверхности горения, а также от всех неоднородностей СВЧ-тракта. Для согласования волноводного тракта с нагрузкой, образованной исследуемым топливом в бомбе, применялся трансформатор полных сопротивлений. Это позволило преодолеть экспериментальные трудности, связанные с большим изменением уровня отраженного сигнала в процессе горения. Был сделан вывод, что основным источником ошибок измерений является погрешность определения длины волны СВЧ-излучения в топливе, а также потери СВЧ-мощности в некоторых типах топлива.

Дальнейшее развитие СВЧ-техники для исследования процессов горения шло по пути освоения более коротковолновых диапазонов длин волн. Для исследования квазистационарных процессов горения в [10, 11] использован СВЧ-метод в 8-миллиметровом диапазоне, что позволило повысить разрешающую способность метода по сравнению с 3-сантиметровым диапазоном. В работе [10] упоминается возможность фокусировки СВЧ-излучения, говорится о перспективности применения (2 ÷ 5)-миллиметрового диапазона по мере снижения цен на СВЧ-компоненты этого диапазона. Ва-

риации квазистационарной скорости горения при акустических колебаниях давления в ракетном двигателе измерены в работе [12]. В отчетах [13, 14] описаны эксперименты с СВЧ-системой в (30 ГГц)-диапазоне. Для согласования СВЧ-системы с топливом применялся рупорный переход с корректирующей линзой для обеспечения плоского фазового фронта волны, распространяющейся в топливе. Группа авторов из университета Белграда [15–17] разработала СВЧ-интерферометр (на отражение и прохождение) с длиной волны $\lambda = 8$ мм для измерения скорости горения двухосновных и смешанных топлив в модельном ракетном двигателе. В перечисленных выше работах для стационарных и квазистационарных измерений скорости горения использовали интерферометрические схемы.

В ряде работ СВЧ-метод применялся для измерения скорости горения в нестационарных условиях. Первые сведения о применении СВЧ-метода для измерений нестационарной скорости горения при колебаниях давления опубликованы в [18]. В работе [19] описаны эксперименты со смешанными топливами, помещенными в запердельный (в отсутствие диэлектрика) волновод. Заполненный топливом, данный волновод поддерживал одномодовый режим распространения СВЧ-волны.

В работах [2, 20, 21] с помощью СВЧ-метода измерены функции отклика скорости горения по давлению. Из-за низкой разрешающей способности ранняя версия методики была пригодна только для квазистационарных измерений. Для нестационарных измерений скорости горения применялся метод прямого измерения текущего сдвига фаз. Усовершенствованная методика имела разрешение по фазе 10 миллиградусов, что эквивалентно теоретическому разрешению по длине образца 0,2 мкм.

Применимость той или иной методики для измерения скорости горения лабораторных образцов топлива либо для измерения скорости горения топлива в двигателе определяется, в основном, выбором способа согласования СВЧ-тракта измерительной системы с топливом (ввод СВЧ-излучения в топливо). Способы такого согласования, применявшиеся в работах по измерению скорости горения, можно классифицировать следующим образом.

Длинный цилиндрический образец топлива в свободном пространстве, облучаемый в осевом направлении. В работе [6] такая струк-

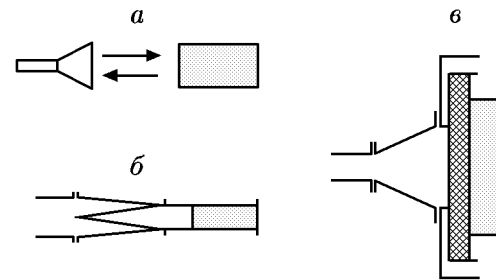


Рис. 1. Способы согласования СВЧ-тракта измерителя скорости горения с топливом:

a — образец топлива в режиме диэлектрического волновода/резонатора, *б* — полый металлический волновод, заполненный топливом, *в* — топливо как диэлектрическая среда с распространяющейся в ней плоской электромагнитной волной

тура рассматривалась как диэлектрический волновод (рис. 1, *a*). Следует заметить, что при определенных соотношениях длины волны и расстояния от излучателя до торца образца при таком способе согласования образец топлива может рассматриваться как диэлектрический резонатор. При этом в случае топлива с малыми потерями СВЧ-мощности, т. е. при относительно высокой добротности, на выходе измерителя получается последовательность хорошо выраженных резонансов, что может повышать точность определения квазистационарной скорости горения (на базе половины длины волны).

Образец топлива, помещенный в волновод круглого или прямоугольного сечения (рис. 1, *б*). Поперечные размеры волновода выбираются таким образом, что при отсутствии в нем топлива волновод является запердельным для данной частоты СВЧ-излучения, т. е. процесс распространения волны в нем носит ярко выраженный аперидический характер с быстрым затуханием излучения. При помещении образца в волновод получается структура, обеспечивающая одномодовый режим распространения СВЧ-излучения. Это, в совокупности с уменьшением паразитных отражений с помощью согласующего устройства, обеспечивает на выходе измерителя неискаженную синусоидальную интерферограмму либо позволяет выполнить однозначные прямые измерения фазы отраженного от поверхности горения СВЧ-сигнала (с помощью гетеродинного переноса частоты в более низкочастотный диапазон). Такой способ ввода СВЧ-излучения в топливо наиболее предпочтителен с радиотехниче-

ской точки зрения. Он применялся для нестационарных измерений в [2, 20].

В миллиметровом СВЧ-диапазоне поперечные размеры одномодового волновода достаточно малы: при типичных значениях диэлектрической проницаемости топлива $\epsilon_p \approx 4 \div 5$ диаметр одномодового волновода в 8-миллиметровом диапазоне равен ≈ 4 мм, в 2-миллиметровом диапазоне — ≈ 1 мм. Однако при использовании образцов гетерогенных топлив малого диаметра не удается получить информацию о статистически усредненной скорости горения. Действительно, при наличии зерен окислителя с размерами $\approx (200 \div 500)$ мкм их концентрация на горячей поверхности образца диаметром $\approx (1 \div 2)$ мм в разные моменты времени может существенно отличаться от средней. Таким образом, в миллиметровом СВЧ-диапазоне целесообразно применять сверхразмерный (многомодовый) волновод диаметром $10 \div 12$ мм и требуется дополнительно исследовать влияние этого способа согласования на точность метода. Существенным недостатком метода можно считать влияние теплопроводности стенок волновода на скорость горения. Влияние этого эффекта на точность измерений требует проведения теоретических оценок и экспериментальной проверки для различных условий горения (давление, время горения), толщины и материала стенок волновода.

Слой топлива с поперечными размерами в несколько длин волн СВЧ-излучения, облучаемый с помощью рупорного облучателя. Топливо располагается, как правило, в ближней зоне рупорной антенны, поэтому требуется корректирующая линза, которую можно помещать в раскрытие рупора, для коррекции фазового фронта волны (рис. 1, в). Такой способ удобен для измерения скорости горения топлива в ракетном двигателе либо в случае массивных образцов топлива [3, 11, 13, 14].

ИЗМЕРИТЕЛЬ СКОРОСТИ ГОРЕНИЯ НА ОСНОВЕ 2-МИЛЛИМЕТРОВОГО СВЧ-ИНТЕРФЕРОМЕТРА

Блок-схема СВЧ-интерферометра

СВЧ-измеритель 2-миллиметрового диапазона планировался для измерения скорости горения лабораторных образцов топлива длиной $5 \div 10$ мм. Поэтому решено было начать с интерферометра по оптическому типу как менее дорогостоящей схемы.

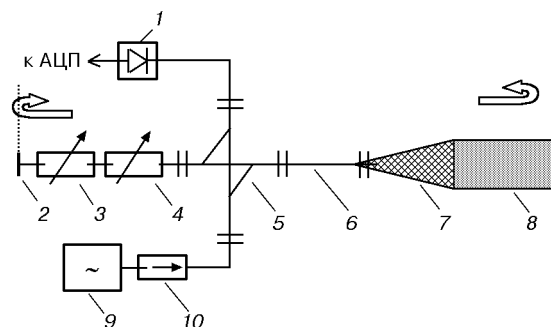


Рис. 2. Блок-схема 2-миллиметрового СВЧ-измерителя скорости горения твердых топлив:

1 — приемник, 2 — короткозамыкатель, 3 — переменный фазовращатель ($0 \div 360^\circ$), 4 — переменный аттенюатор ($0 \div 30$ дБ), 5 — двойной Т-мост, 6 — соединительный волновод сечением $0,8 \times 1,6$ мм, 7 — согласующий элемент (диэлектрический конус), 8 — образец исследуемого топлива (типичная длина 10 мм, диаметр 6–8 мм), 9 — генератор Ганна 2-миллиметрового диапазона, 10 — вентиль ферритовый

Измерительная система состоит из СВЧ-блока, электронной схемы регистрации и программного обеспечения. Для минимизации отражений от холодного торца образца и связанных с этим искажений интерферограммы применено согласующее устройство. Образец топлива использовался как диэлектрический волновод, согласованный с волноводным трактом измерителя с помощью конического диэлектрического перехода, выполненного из кварцевого стекла.

Блок-схема СВЧ-измерителя представлена на рис. 2. В качестве задающего генератора применялся генератор на диоде Ганна мощностью 10 мВт, на частоте 139,8 ГГц. На выходе генератора включен развязывающий вентиль. СВЧ-сигнал задающего генератора подается в двойной волноводный тройник (Т-мост), который делит сигнал задающего генератора на два сигнала равной амплитуды и фазы. Один направляется через волноводный тракт и согласующее устройство в образец топлива, отражается от поверхности горения и возвращается в тройник. Другой сигнал проходит по волноводному тракту опорного плеча, отражается от нагрузки и также возвращается в Т-мост. Регулируемые фазовращатель, аттенюатор и нагрузка позволяют установить оптимальные для измерения фазу и амплитуду опорного сигнала. Отраженные сигналы измерительного и опорного плеч интерферируют внутри Т-моста, и результирующий сигнал подается в приемник, состоящий из генератора,

гетеродина, смесителя, фильтра промежуточной частоты (ПЧ), предусилителя и детектора. В смесителе происходит перенос частоты сигнала интерференции на промежуточную частоту $1,35 \div 1,4$ ГГц. Сигнал ПЧ проходит через фильтр ПЧ (полоса пропускания 400 МГц), что позволяет снизить уровень шумов, затем усиливается предусилителем до уровня, оптимального для работы детектора.

Выходной сигнал детектора усиливается и оцифровывается с помощью АЦП для дальнейшей компьютерной обработки. В процессе горения образца СВЧ-сигнал на выходе СВЧ-моста изменяется во времени приблизительно по синусоидальному закону (при постоянной скорости движения отражающей поверхности). Этот синусоидально модулированный СВЧ-сигнал подается на детектор, выделяющий огибающую сигнала биений. Смещение поверхности горения на расстояние, равное половине длины волны СВЧ-излучения в топливе, соответствует одному периоду на выходном синусоидальном сигнале. Это позволяет вычислять скорость горения.

Отраженные сигналы имеют следующий вид:

$E_r = e_r \sin(\omega_0 t + \varphi_r)$ — сигнал, отраженный от нагрузки в опорном плече;

$E_m = e_m \sin(\omega_0 t + \varphi_m)$ — сигнал, отраженный от нагрузки в измерительном плече.

Здесь E_r , E_m — текущие значения напряженности электрического поля СВЧ-излучения соответственно в опорном и измерительном плечах интерферометра; e_r , e_m — амплитуды напряженности электрического поля волны в опорном и измерительном плечах интерферометра; ω_0 — круговая частота СВЧ-сигнала; t — время; φ_r , φ_m — текущие фазы опорного и измерительного сигналов, $\varphi_m = \varphi_r + \varphi$; φ — текущий сдвиг фазы между опорным и измерительным сигналами, пришедшими в тройник после отражения от нагрузок.

При движении поверхности горения выходной сигнал тройника меняется по следующему закону (векторная сумма): $e^2 = e_r^2 + e_m^2 - 2e_r e_m \cos \varphi$.

На выходе квадратичного детектора $V_d = ae^2 = (e_r^2 + e_m^2 - 2e_r e_m \cos \varphi)$, где V_d — напряжение на выходе детектора.

Последнее выражение показывает, что выходной сигнал детектора является синусоидой, если амплитуды отраженных сигналов в плечах интерферометра постоянны. В действи-

тельности, амплитуда сигнала в опорном плече не меняется, в то время как в измерительном плече может изменяться в процессе горения в результате потерь СВЧ-мощности в топливе.

Тестирование СВЧ-интерферометра

С помощью описанного прибора были проведены измерения стационарной скорости горения твердых топлив при атмосферном давлении и комнатной начальной температуре. Поскольку горение происходило в стационарных условиях, диэлектрические свойства топлива определяли по интерферограммам. Знание диэлектрических свойств топлива позволяет рассчитывать скорость горения. Для оценки работоспособности метода использовали топлива различного состава.

На рис. 3 показаны интерферограммы горения образцов безметалльных топлив. Здесь и далее ПБ — полибутадиен, ПХА — перхлорат аммония, ПММА — полиметилметакрилат. Форма зарегистрированных сигналов хорошо соответствует ожидаемой: синусоида с нарастающей амплитудой. В случае горения двухосновного топлива (см. рис. 3, б) заметны искажения формы сигнала, вызванные образованием углеродистых остатков на поверхности горения. На рис. 4 приведены типичные интерферограммы, зарегистрированные при горении образцов модельных топлив с различным содержанием алюминия. Искажение интерферограмм при увеличении содержания алюминия в топливе вызвано рассеянием СВЧ-излучения на частицах металла. Дополнительное искажение интерферограмм происходит из-за накопления частиц металла на поверхности горения в результате процесса агломерации, что увеличивает шероховатость поверхности.

На рис. 5 показана запись сигнала при переходе волны горения через границу между смешевым безметалльным топливом на основе ПБ/ПХА и катализированным двухосновным топливом.

Полученные интерферограммы использовали для определения текущей длины образца l и соответствующей скорости его горения r . Для обработки интерферограмм применяли процедуру «Peak Peaks» программного пакета «Origin 4.1», которая позволяет определять временное положение максимумов и минимумов интерферограммы. Далее по известной длине волны СВЧ-излучения в исследуемом топливе рассчитывали мгновенное значе-

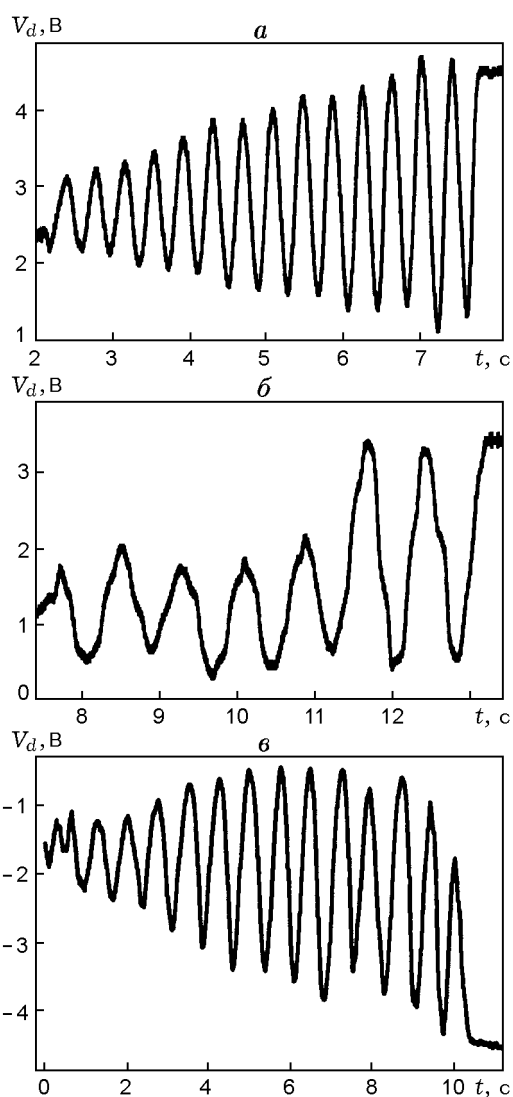


Рис. 3. Интерферограммы горения образцов безметалльного смешного топлива на основе ПБ и ПХА (*a*), двухосновного катализированного топлива (*б*) и прессованной стехиометрической смеси ПХА и ПММА (*в*)

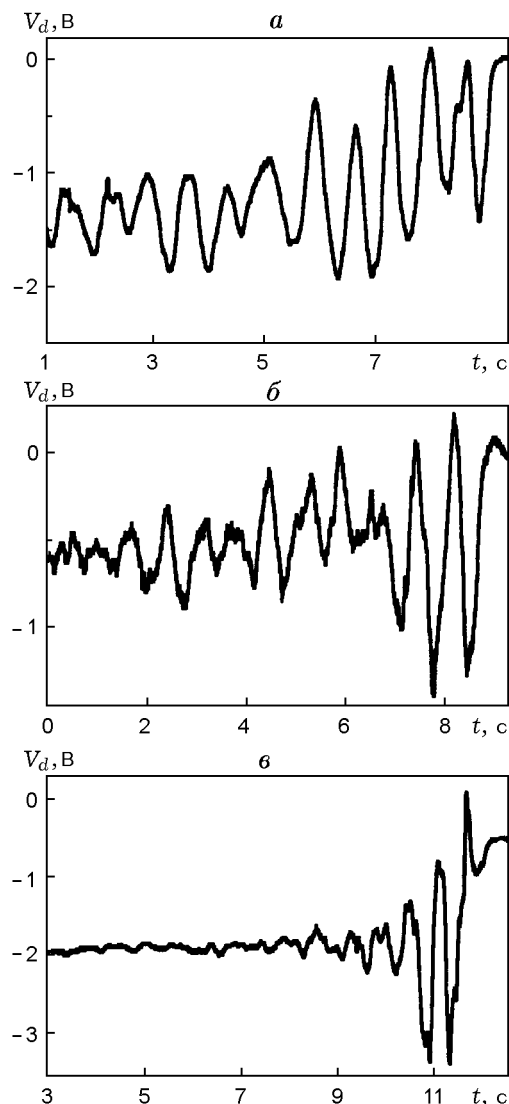


Рис. 4. Интерферограммы горения образцов прессованной стехиометрической смеси ПХА/ПММА с добавкой Al ($D_{30} = 15$ мкм) 5 (*a*), 10 (*б*), 20 % (*в*)

ние длины образца топлива. Кривые изменения длины и скорости горения смешного безметалльного топлива ПБ/ПХА приведены на рис. 6. Коэффициент наклона кривой изменения длины давал среднюю скорость горения, а дифференцирование текущей длины — значения скорости горения образцов топлива, осредненные на отрезке ≈ 250 мкм.

При определении скорости горения не учитывались точки, соответствующие участкам зажигания и погасания образцов. Погрешность вычисления скорости горения опреде-

ляется точностью определения длины волны СВЧ-излучения в топливе и точностью определения положения пиков на интерферограмме. Определение длины волны СВЧ-излучения по результатам горения в стационарных условиях можно осуществить с погрешностью $2 \div 4$ %. Эта погрешность соответствует стандартной процедуре «Peak Peaks» пакета «Origin 4.1». Применение специальных математических методов может уменьшить погрешность в $2 \div 3$ раза. Результаты измерений скорости горения приведены в таблице.

Скорость горения образцов при $p = 1$ атм, $T_0 = 20$ °С

Тип топлива	l , мм	d , мм	q , кал/(см ² ·с)	v , мм/с
Смесевое ПБ/ПХА	9,6	8	15	$1,37 \pm 0,05$
Двухосновное катализированное	7	6	15	$0,67 \pm 0,02$
ПХА/ПММА, стехиометрия	8,1	8	15	$0,69 \pm 0,03$
ПХА/ПММА + 5 % Al	7,3	8	15	0,74*
ПХА/ПММА + 10 % Al	7,0	8	15	0,73*

Примечание. * соответствует единичным измерениям; d — диаметр образца, q — удельный тепловой поток зажигания, l — длина образца.

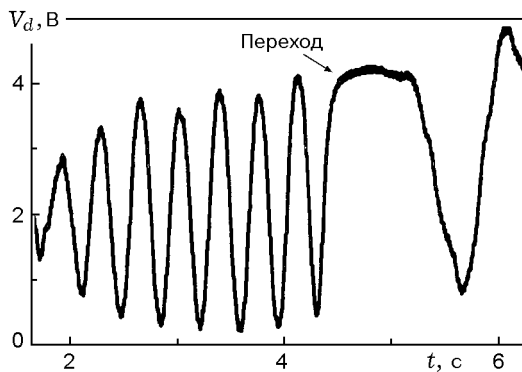


Рис. 5. Интерферограмма для случая перехода волны горения через границу безметального смешиваемого и катализированного двухосновного топлив

ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ГОРЕНИЯ СВЧ-МЕТОДОМ

При работе с СВЧ-измерителями скорости горения твердых топлив необходимо учитывать факторы, ограничивающие точность метода.

Вибрация экспериментального оборудования. Вибрация является общей проблемой при работе с высокочувствительными датчиками, и методы уменьшения этого влияния достаточно хорошо разработаны (демпфирование вибраций, использование массивных оснований и т. д.).

Сжимаемость топлива. Сжимаемость топлива может сказываться в опытах с большим изменением давления (быстрый сброс давления) [14, 19]. При измерении скорости горения при постоянном давлении или при низкочастотных модуляциях давления сжимаемость топлива не влияет на измерение скорости.

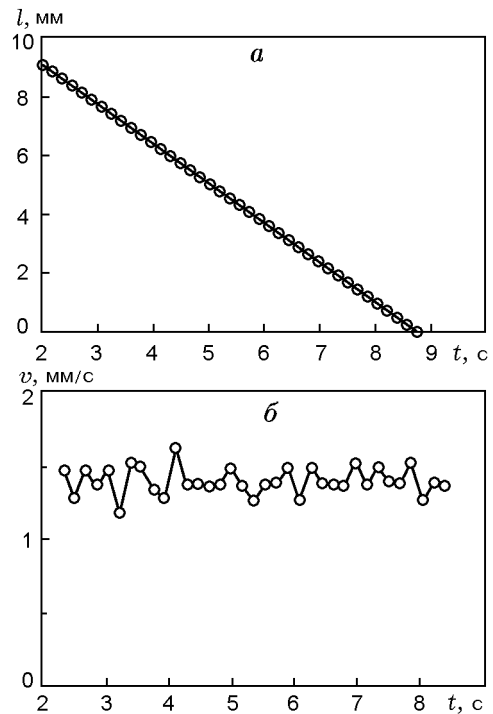


Рис. 6. Изменение длины (а) и скорости горения (б) образца смешиваемого топлива ПБ/ПХА, $p = 1$ атм, $T = 20$ °С

Отражения от плазмы пламени. Экспериментальные оценки, проведенные в 8-миллиметровом [18] и в 2-миллиметровом (наши измерения) диапазонах, продемонстрировали незначительное влияние плазмы пламени на амплитуду и фазу СВЧ-сигнала. В работе [19] показано, что появление пламени в момент зажигания не приводит к скачку фазы отраженного сигнала. Если бы плазма пламени вносила вклад в отраженный сигнал, должен был бы возникнуть скачок фазы в несколько десятков градусов.

Изменение диэлектрических свойств топлива. Изменение диэлектрических свойств топлива в прогретом слое может быть вызвано изменением температуры, а также физических свойств материала (плотности, пористости) либо химического состава за счет химических реакций. Кроме того, диэлектрические свойства могут изменяться по длине образца топлива из-за технологических особенностей производства топлива. Изменение диэлектрических свойств обуславливает изменение длины волны СВЧ-излучения в топливе в процессе горения и приводит, таким образом, к ошибкам при вычислении скорости горения. Для учета этих изменений необходимо знать зависимости диэлектрических свойств от температуры, давления, влажности, условий прессования и т. д. Кроме того, нужна информация о процессах в приповерхностной зоне конкретного топлива, которую можно получить с помощью рентгеновской съемки или скоростной киносъемки.

Шероховатость поверхности горения. Шероховатость поверхности горения может вызывать изменения коэффициента отражения волны СВЧ-излучения, а изменения шероховатости в процессе горения вызывают колебания положения эффективной отражающей поверхности. Типичные значения шероховатости поверхности смесового безметалльного топлива, обусловленные наличием частиц окислителя, составляют $100 \div 600$ мкм. Такая шероховатость не влияет на коэффициент отражения в 3-сантиметровом диапазоне. При проведении нестационарных измерений, которые требуют эквивалентной разрешающей способности по длине порядка долей микрометра, возникают шумы, связанные с колебаниями положения эффективной отражающей поверхности, проведенной по среднему уровню амплитуды неоднородностей. Последние обусловлены хаотическими изменениями шероховатости в процессе горения, например, в результате очагового горения, разной скорости выгорания связки и окислителя при различных режимах горения, и т. п. Кроме того, в миллиметровом диапазоне изменение шероховатости может вызывать изменение коэффициента отражения от поверхности в процессе горения, что приводит к провалам амплитуды интерферограммы. Для 2-миллиметрового диапазона вопрос о влиянии шероховатости особенно актуален, так как значения шероховатости

становятся сопоставимыми с длиной волны в топливе. Соответственно требуется проводить анализ искажений фазового фронта волны при отражении от такой поверхности, а также разрабатывать специальные методы обработки сигнала при разных значениях шероховатости для данного топлива и условий горения. В случае металлизированного топлива шероховатость поверхности обусловлена агломерацией и ее зависимостью от условий горения.

Кривизна поверхности горения. Кривизна может быть вызвана неплоскостью зажигания или прогоранием бронировки, т. е. нарушением послойного горения. Степень влияния кривизны поверхности горения зависит от применяемого СВЧ-диапазона. Отражающая поверхность может считаться плоской, если радиус кривизны больше $30 \div 40$ длин волн СВЧ-излучения. Кривизна поверхности, а также ее изменения в процессе горения дают шумовой компонент в выходном сигнале, что в некоторых случаях может привести к сильному искажению интерферограммы.

Затухание и рассеяние СВЧ-излучения. Затухание в топливах с большими потерями СВЧ-мощности приводит к ограничению толщины топлива, а рассеяние излучения на внутренних неоднородностях, особенно на металлических частицах, — к искажению фазового фронта волны излучения. Использование образца в качестве волноводной структуры с поверхностной волной либо облучение топлива со стороны пламени могут оказаться полезными для того, чтобы избежать трудностей, связанных с внутренней неоднородностью топлива и вариациями диэлектрической проницаемости в прогретом слое. Другой способ — использование нескольких длин волн. Его эффективность продемонстрирована в работе [3], где для минимизации ошибок при измерении скорости горения применяли усреднение результатов измерений на двух частотах СВЧ-излучения.

Погрешности, вызванные нестабильностью параметров прибора. Эти погрешности не носят принципиального характера, так как на сегодняшний день существуют хорошо разработанные методы стабилизации параметров СВЧ-генераторов для всех частотных диапазонов. Ниже приведены данные для измерителя скорости горения, описанного в настоящей статье и имеющего следующие параметры.

Рабочая частота $f = 139,8$ ГГц. Абсолютная нестабильность частоты генератора Ган-

на $\delta f = 1$ МГц, относительная нестабильность $\delta f/f = 10^{-5}$. Частота гетеродина $f_g = 138,5$ ГГц. Нестабильность частоты гетеродина $\delta f_g = 1$ МГц. Промежуточная частота $F = 1,3$ ГГц, ее нестабильность $\delta F = 1,4$ МГц. Уровень выходной мощности $P_0 = 5$ мВт. Относительная нестабильность уровня мощности $\delta P/P_0 \leq 10^{-4}$. Соотношение сигнал/шум 2-миллиметрового диапазона равно $S/N = 10^2$ по напряжению на выходе усилителя.

Погрешность определения скорости горения топлива, обусловленная нестабильностью частоты генератора Ганна и гетеродина, равна 0,3 %. Нестабильность промежуточной частоты обусловлена нестабильностью частот генератора и гетеродина. Поэтому дополнительной погрешности эта нестабильность не вносит, так как она уже учтена.

Погрешность, обусловленная относительной нестабильностью уровня мощности СВЧ-сигнала 10^{-4} , равна 0,3 %. Если нестабильность уровня мощности СВЧ-сигнала 10^{-3} , соответствующий вклад в погрешность определения скорости увеличивается до 1 %.

Погрешность, обусловленная соотношением $S/N = 10^2$, равна 4,5 %. Для существующего прибора возможно достижение значения $S/N = 3 \cdot 10^3$, при этом относительная погрешность определения скорости горения будет равна 0,8 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье изложены принципы СВЧ-измерений в применении к задачам изучения характеристик горения конденсированных веществ. Основное внимание уделено вопросам измерения скорости горения твердых топлив. Потенциальные возможности СВЧ-методов этим не исчерпываются и можно ожидать в дальнейшем расширения областей использования СВЧ-излучения в задачах о горении конденсированных веществ.

1. Экспериментальные результаты, полученные при работе с 2-миллиметровым СВЧ-измерителем скорости горения, показали работоспособность метода при вводе излучения с холодного торца образца для измерения квазистационарной скорости горения однородных и безметаллических гетерогенных твердых топлив. Данный СВЧ-диапазон предоставляет преимущества по разнообразию методов согласования волноводного тракта измерителя с исследуемым топливом и позволяет реализовать отно-

сительно высокую пространственную разрешающую способность (по сравнению с устройствами более длинноволновых диапазонов).

2. Ограничения метода в 2-миллиметровом диапазоне связаны с тем, что длина волны СВЧ-излучения в топливе близка к характерным значениям шероховатости поверхности горения и неоднородностей в топливе. Это приводит к искажению выходного сигнала измерителя. Практически 2-миллиметровый СВЧ-измеритель скорости горения может применяться для исследования безметаллических или слабо металлизированных (5 ÷ 10 % Al) топлив. К настоящему времени измерения скорости горения проводили только при постоянном (атмосферном) давлении, но метод применим также в условиях умеренно растущего во времени давления для определения закона скорости горения. Для этого, однако, необходима информация о зависимости диэлектрической проницаемости от давления. Предварительные эксперименты показали возможность применения метода для изучения переходного горения, например перехода волны горения с одного состава на другой.

3. Дальнейшее развитие применения СВЧ-метода для измерения скорости горения твердых топлив требует детального количественного анализа факторов, приводящих к ошибкам измерений. Особое значение имеют следующие вопросы.

- Теоретические оценки и экспериментальные измерения зависимости диэлектрической проницаемости топлив от температуры, давления, влажности, степени полимеризации в сантиметровом и миллиметровом диапазонах длин волн.

- Электродинамическое моделирование и экспериментальная работа по изучению влияния качества и структуры поверхности горения (шероховатость, кривизна, наличие пенного слоя, изменение химического состава) на ее отражающие свойства в зависимости от применяемого СВЧ-диапазона и способа согласования волноводного тракта с топливом. Требуется выяснить, что является эффективной отражающей поверхностью, как проявляются ее шумовые колебания, в каких пределах изменяется коэффициент отражения.

- Совершенствование применявшихся ранее методов согласования и разработка новых: образец топлива как волноводная структура с поверхностной волной, облучение поверхности горения со стороны пламени и др.

В итоге должны быть сформулированы критерии выбора СВЧ-диапазона, схемного решения, способа согласования, метода обработки для оптимальной реализации метода в зависимости от типа топлив, условий и задач эксперимента. В принципе возможна разработка комплексной методики, позволяющей разработать в различных СВЧ-диапазонах. Представляется перспективным использование различных способов согласования СВЧ-излучения с исследуемым топливом: фокусировка излучения на поверхности горения, возбуждение образца топлива в режиме волноводной структуры с поверхностной волной.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке университета Бригама Янга (США, руководитель проекта проф. М. Бекстед) и Федеральной программы «Интеграция» (грант 1080К). Авторы благодарят А. Б. Кискина за помощь в обработке экспериментальных данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Zarko V. E. and Kuo K. K.** Critical review of methods for regression rate measurements of condensed phase systems // *Nonintrusive Combustion Diagnostics* / K. K. Kuo and T. Parr (Eds). New York: Begel House, 1994. P. 600–623.
2. **Strand L. D., Magiawala K. R., and McNamara R. P.** Microwave measurement of solid-propellant pressure-coupled response function // *J. Spacecraft*. 1980. V. 17, N 6.
3. **Foss D. T., Roby R. J., and O'Brien W. F.** Development of dual-frequency microwave burn-rate measurement system for solid rocket propellant // *J. Propulsion and Power*. 1993. V. 9, N 4.
4. **Venugopalan P., Jose K. A., Nair K. G., et al.** Microwave method for locating inhomogeneities in cured rocket propellant samples // *NDT International*. 1986. V. 19, N 6.
5. **Koch B.** Reflexion de micro-ondes par des phenomenes de detonation // *C. r. Acad. Sci. Paris*. 1953. V. 236. P. 661–663.
6. **Cook M. A., Doran R. L., and Moris G. J.** Measurement of detonation velocity by doppler effect at three-centimeter wavelength // *J. Appl. Phys.* 1955. V. 26, N 3.
7. **Cawsey G. F., Farrands J. L., and Thomas S.** Observations of detonation in solid explosives by microwave interferometry // *Proc. Roy. Soc. London. Ser. A: Mathematical and Physical Sciences*, V. 248. May 1958. P. 499–521.
8. **Johnson D. L.** Microwave measurement of the solid propellant burning rates. Duarte: Giannini Controls Corp., TN, July 1962.
9. **Cole R. B.** High pressure solid propellant combustion studies using a closed bomb // Rohm and Haas Co., Rept. S-68, Contract DA-01-021 ord-11, 909(Z). Huntsville, AL, Oct. 1965.
10. **Dean D. S. and Green D. T.** The use of microwaves for the detection of flaws and measurement of erosion rates in materials // *J. Scient. Instrum.* 1967. V. 44, N 9.
11. **Wood H. L., O'Brien W. F., and Dale C. B.** Measurement of solid propellant burning rates employing microwave techniques // *Proc. of the 6th Intern. Sympos. on Air Breathing Engines*. Paris, France, 1983.
12. **Gittins J., Gould R. D., Penny P. D., and Wellings P. C.** Solid propellant combustion instability // *J. British Interplanetary Soc.* 1972. V. 25, N 6.
13. **Wood H. L. and O'Brien W. F.** Progress Report, NASA Research Grant NGR 47-004-024, Virginia Polytechnic Institute. Blacksburg, Va, 1968.
14. **Wood H. L.** Final Report, NASA Grant NGR 47-004-024, Virginia Polytechnic Institute. Blacksburg, Va, 1970.
15. **Anicin B. A., Jojic B., Blagojevic D., et al.** Flame plasma and the microwave determination of solid propellant regression rates // *Combust. and Flame*. 1986. V. 64.
16. **Bozic V. S., Blagojevic D. D., and Anicin B. A.** Measurement system for determining solid rocket propellant burning rate using reflection microwave interferometry // *J. Propulsion and Power*. 1997. V. 13, N 4.
17. **Bozic V. S., Blagojevic D. D., and Anicin B. A.** Measurement system for determining solid propellant burning rate using transmission microwave interferometry // *J. Propulsion and Power*. 1998. V. 14, N 4.
18. **Shelton S. V.** A technique for measurement of solid propellant burning rates during rapid pressure transients // *Bulletin of the 4th ICRPG Combustion Conference*, CPIA Publication N 162; V. I. Silver Spring, Md, Dec. 1967. P. 361–372.
19. **Alkidas A., Clary A., Giles G., and Shelton S.** Measurement of steady state and transient solid propellant burning rates with microwaves // *Final Report*, Georgia Inst. of Technology, U. S. Air Force Office of Scientific Research 70-1934. Atlanta, GA, Dec. 1973.
20. **Strand L. D., Schultz A. L., and Reedy G. K.** Microwave doppler shift technique for determining solid propellant transient regression rates // *J. Spacecraft and Rockets*. 1974. V. 11, N 2.
21. **Strand L. D. and McNamara R. P.** A variable-frequency driver-microwave transient regression rate measurement system // *Experimental Diagnostics in Combustion of Solids* / T. L. Boggs and B. T. Zinn (Eds). *Progress in Astronautics and Aeronautics*; V. 63. 1978. P. 155–172.

Поступила в редакцию 15/VI 1999 г.