

УДК 536.46;621.372.812

УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЙ СВЧ-МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ГАЗИФИКАЦИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ВЕЩЕСТВ

А. И. Подшивалов^{1,2}, Ю. А. Гришин¹, А. Б. Кискин¹, В. Е. Зарко^{1,3}

¹Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН,
630090 Новосибирск, anpodig@gmail.com

²Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, 630090 Новосибирск

³Томский государственный университет, 634050 Томск

Описана новая СВЧ-методика измерения скорости газификации в нестационарном режиме. Особенность методики заключается в том, что для определения убыли массы в процессе газификации проводится измерение изменяющейся во времени резонансной частоты СВЧ-резонатора с исследуемым образцом, осуществляемое путем последовательной регистрации резонансных характеристик датчика. При этом обеспечивается независимость результатов измерений от изменения добротности резонатора в процессе газификации образца топлива. Испытан действующий макет датчика, представляющего собой коаксиальный резонатор, в котором исследуемый образец помещен в область максимального электрического поля. Экспериментально показано, что чувствительность (отношение изменения резонансной частоты к изменению внутреннего диаметра образца) датчика новой конструкции в 2–4 раза выше, чем у предыдущей модели датчика.

Ключевые слова: СВЧ-метод, резонаторный датчик, новая модель, нестационарная скорость газификации, увеличенная чувствительность, высокое быстродействие.

DOI 10.15372/FGV20220511

ВВЕДЕНИЕ

При разработке и проектировании различных двигателей на твердом топливе одним из основных баллистических параметров является скорость газификации (горения, испарения). На практике требуется обеспечить точность измерения данного параметра порядка 1 % в стационарном режиме. Для нестационарных процессов требование точности измерения скорости газификации составляет приблизительно $2 \div 3$ %, а требуемое временное разрешение порядка 1 мс. Вместе с тем результаты измерения скорости горения в нестационарном режиме могут быть эффективно использованы в качестве источника информации о механизме горения и давать необходимые данные для проверки существующих моделей горения [1].

Для получения достаточно точных дан-

ных о нестационарной скорости газификации необходимо решить сложные технические задачи — обеспечить эффективное пространственное разрешение метода, равное нескольким микрометрам, и временное разрешение менее 1 мс. В литературе описаны многочисленные попытки разработать методы измерения динамических параметров горения (газификации) с использованием оптических, ультразвуковых, а также рентгеновских методов. Их короткое перечисление дано ниже.

Динамическое взвешивание: измерение текущего веса или массы образца (несколько граммов). Разрешение по массе составляет $4 \div 5$ мг, рабочая полоса частот до 400 Гц [2].

Инерционный способ: измерение частоты собственных колебаний упругого элемента с установленной на нем (присоединенной) массой (несколько граммов). Рабочая полоса частот составляет 150 Гц, разрешение по массе — $1 \div 2$ мг [3].

Интерферометрия: динамическая запись интерферограмм газовой фазы для оценки образующейся при горении массы газа. Частотное разрешение около 50 Гц [4], параметры точ-

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект № 075-15-2020-781) и программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030).

© Подшивалов А. И., Гришин Ю. А., Кискин А. Б.,
Зарко В. Е., 2022.

ности определения массы неизвестны.

Регистрация отраженного лазерного луча: местоположение поверхности горения определяется путем измерения угла отклонения луча. При давлении 1.7 МПа пространственное разрешение составляет 0.08 мм, ширина полосы измерительной системы — 20 Гц [5].

Прямая видеосъемка: пространственное разрешение составляет $10 \div 20$ мкм, предельная частота колебаний скорости горения — 50 Гц [6].

Оптическая проекция: лазерный луч установлен параллельно поверхности горения и степень перекрытия пучка детектируется фотоэлементом. Пространственное разрешение для гладкой поверхности горения — 10 мкм [7].

Ультразвук: измерение промежутка времени между генерируемыми и отражаемыми от поверхности горения сигналами. Ограничения: образец — торцевой заряд с характерным размером не более 30 мм, временное разрешение менее 300 Гц [8].

Рентгенография: получение рентгеновских боковых изображений или измерение локального ослабления рентгеновских лучей горящим образцом. Пространственное разрешение — 100 мкм [9].

Фазовый СВЧ-метод: измерение доплеровского фазового сдвига для сигнала, отраженного от поверхности горения. В теории пространственное разрешение составляет доли микрометра [10].

Измерение реактивной силы продуктов горения: разрешение по величине силы составляет $3 \div 5$ мГ, диапазон частот — 500 Гц [11].

Резюмируя, можно утверждать, что в настоящее время известные методы не обеспечивают требуемой точности и временного разрешения при измерении нестационарной скорости газификации (горения) твердого топлива. Таким образом, существует необходимость в дальнейшей разработке высокоточных методов измерения скорости газификации высокоэнергетических материалов с временным разрешением менее 1 мс и пространственным разрешением, равным единицам микрометров.

РЕЗОНАТОРНЫЙ МЕТОД 1. ПЕРВАЯ МОДЕЛЬ СВЧ-ДАТЧИКА

В рамках решения этой задачи в Институте химической кинетики и горения СО РАН был предложен и разработан СВЧ-резонаторный метод [12–15]. Этот метод осно-

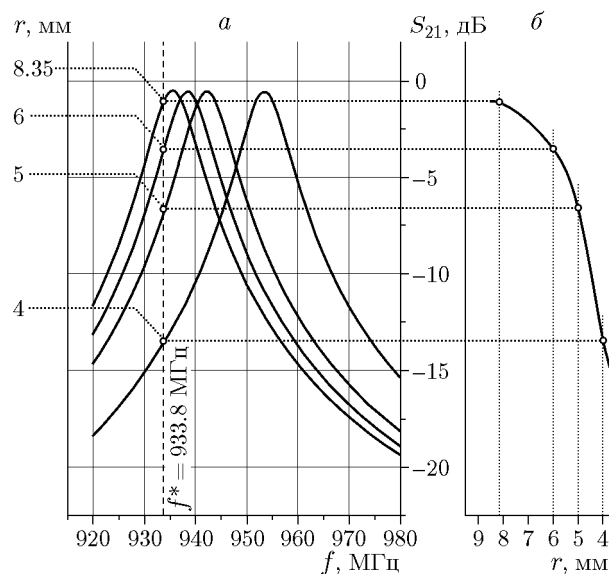


Рис. 1. Коэффициент передачи S_{21} на фиксированной частоте при различных радиусах внутреннего канала образца:

a — поведение частотных характеристик резонатора при изменении радиуса, *б* — зависимость S_{21} от радиуса на частоте f^* (на основе данных из [15])

ван на динамической регистрации количества газифицируемого вещества в СВЧ-датчике резонаторного типа. Образец исследуемого вещества (канальный заряд) помещают в центральную часть резонатора и обдувают горячим газовым потоком, происходит газификация исследуемого вещества с увеличением диаметра внутреннего канала образца. При этом масса (и объем) образца уменьшается, что приводит к изменению частотных характеристик датчика (увеличению резонансной частоты, см. рис. 1). В методике, описанной в [12–15], измерялся коэффициент передачи $S_{21} = P_{out}/P_{in}$, представляющий собой отношение регистрируемой на выходном порту резонатора мощности P_{out} к поступающей на входной порт мощности P_{in} на фиксированной частоте f^* в пределах частотной характеристики резонатора (рис. 1, б).

Изменения S_{21} регистрируются анализатором частотных характеристик, что теоретически позволяет с достаточно высокой точностью и быстродействием определять скорость газификации. В [12, 13] погрешность измерения мощности СВЧ на входе резонатора принята равной 0.5 %, а точность измерения мощности на выходе — 0.2 %. При этом предельно достижимая точность измерения внутреннего

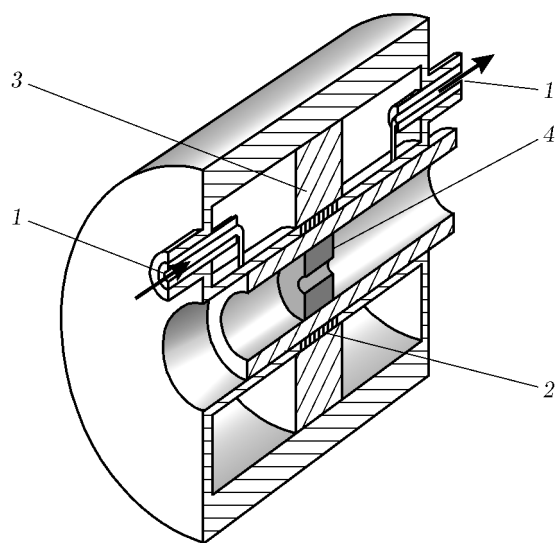


Рис. 2. Конструкция первой модели СВЧ-датчика (рисунок из [13]):

1 — порты подключения к линиям передачи, 2 — система металлических и диэлектрических колец, 3 — изолирующая вставка (фторопласт), 4 — образец

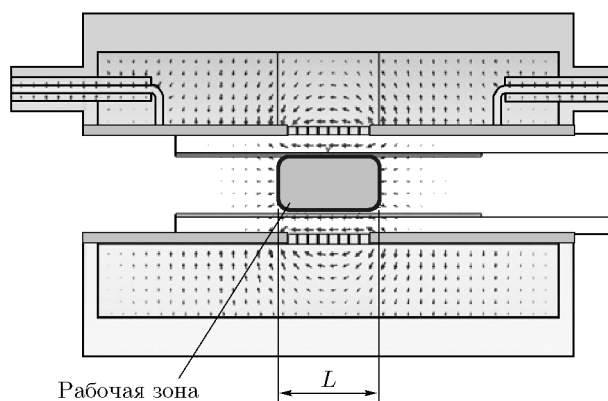


Рис. 3. Структура электрического поля основной моды колебаний в СВЧ-резонаторе датчика (рисунок на основе [13])

диаметра образца может составлять несколько микрон при временном разрешении до 10 нс.

Схематическое изображение первой модели разработанного в ИХКГ СВЧ-датчика приведено на рис. 2. Датчик представляет собой цилиндрический резонатор TM_{010} , характеризующийся почти однородным распределением продольного электрического поля в рабочей зоне (рис. 3). Рабочая зона образована вырезом в центральном канале датчика, заполненным набором металлических и диэлектрических ко-

лец. В данной модели СВЧ-датчика длина рабочей зоны L выбрана равной диаметру образца (20 мм).

СВЧ-сигнал подается в резонатор через входной (левый) порт, мощность прошедшего сигнала регистрируется в выходном (правом) порту. Изолирующая вставка выполнена из диэлектрического материала с низким коэффициентом диэлектрических потерь, оказывает незначительное влияние на электрическое поле и используется для механического удержания системы металлических разделительных колец. Исследуемый образец твердого топлива (как правило, диэлектрик с потерями) помещается внутри изолирующей трубки в центральный канал СВЧ-датчика и находится в пределах рабочей зоны датчика.

Величина S_{21} в соответствии с калибровкой (статические измерения на образцах с различными диаметрами внутреннего канала) пересчитывается затем в толщину горящего свода образца и мгновенную скорость газификации (см. рис. 1). Недостатком этой методики является то, что она основана на предположении о неизменности формы частотной характеристики датчика в процессе горения. В соответствии с ним полагается, что нагруженная добротность резонатора остается постоянной во время измерений. Это возможно, если исследуемое вещество является диэлектриком, не имеющим потерь. Однако реальные вещества обладают конечными диэлектрическими потерями, и при уменьшении количества вещества абсолютная величина вносимых потерь уменьшается. Соответственно, добротность резонатора увеличивается. Кроме того, при горении могут выделяться продукты реакции (копоть, сажа и т. п.), что приводит к дополнительным потерям и уменьшению добротности резонатора и, следовательно, к неконтролируемой ошибке в интерпретации результатов. Исходя из этого, можно считать приведенные в [12, 13] параметры (чувствительность и временное разрешение) оценочными и практически недостижимыми.

РЕЗОНАТОРНЫЙ МЕТОД 2. НОВАЯ МОДЕЛЬ РЕЗОНАТОРНОГО СВЧ-ДАТЧИКА

В настоящей работе предложена альтернативная методика измерения нестационарной скорости газификации, согласно которой периодически проводится запись полной частотной

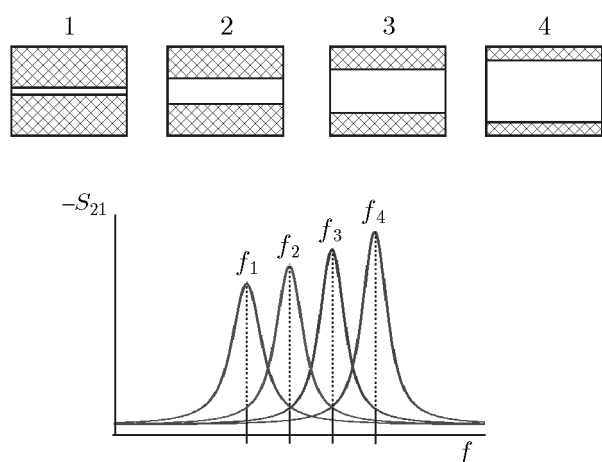


Рис. 4. Изменение частотной характеристики при изменении диаметра внутреннего канала образца (верхний ряд)

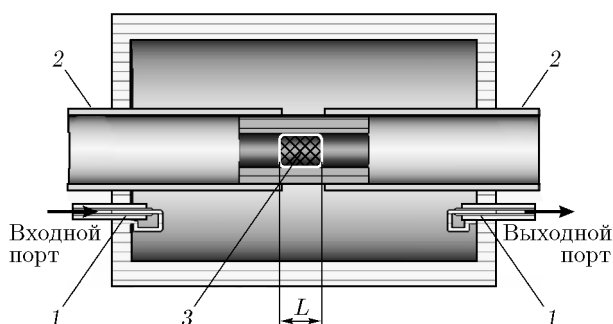


Рис. 5. Конструкция новой модели СВЧ-датчика (сечение)

характеристики СВЧ-резонатора и определяется изменяющаяся во времени резонансная частота (рис. 4). Резонансная частота (в первом приближении) зависит только от диэлектрической проницаемости исследуемого материала, геометрии резонатора и размера (массы) образца.

После проведения измерений с первоначальной конструкцией СВЧ-датчика [12–15] был поставлен вопрос о модификации конструкции и способа регистрации. При этом ставилось целью снижение технологических трудностей при изготовлении датчика (сложность изготовления системы колец и невозможность оперативного изменения размеров рабочей зоны) и исключение зависимости результатов измерений от изменения добротности резонатора в процессе газификации образца топлива.

Общий вид новой модели датчика представлен на рис. 5. Он состоит из следующих

основных частей.

1. Входной и выходной порты (рис. 5, 1). В качестве элементов связи используются две петли: одна (входной порт) служит для возбуждения колебаний; другая, как и в предыдущей модели, для регистрации прошедшей СВЧ-мощности (т. е. измеряется S_{21}).

2. Металлические трубки (рис. 5, 2). Зазор между трубками образует рабочую зону, длина которой примерно равна длине зазора.

3. Образец (рис. 5, 3). Представляет собой цилиндр из диэлектрического материала (например, с каналом внутри).

В новой модели отсутствуют металлические кольца в рабочей зоне, что позволяет оперативно варьировать расстояние между металлическими трубками резонатора. При этом изменяются длина центрального зазора и, следовательно, объем рабочей зоны. Также в новой модели предусмотрена возможность изменения коэффициентов связи обоих портов путем вращения петель связи вокруг оси подводящих кабелей. Отметим, что для повышения точности измерения частотной характеристики использовался режим слабой связи с линиями передачи в обоих портах ($S_{11} \approx -5$ дБ, $S_{21} \approx -30$ дБ, где $S_{11} = P_{refl}/P_{in}$ — отношение мощности, отраженной от входного порта (P_{refl}), к подаваемой на входной порт мощности). Сделано это потому, что при слабой связи наблюдаемая частотная характеристика зависит только от собственных параметров резонатора и свойств образца (форма, размеры, диэлектрические свойства), тогда как при сильной связи на форму частотной характеристики существенное влияние оказывает связь с подводящей и приемной линиями. При смене образцов проводили подстройку величины связи с целью сохранения условий слабой связи для образцов с различными диэлектрическими параметрами.

На рис. 6 изображена структура электрического поля в новой модели СВЧ-датчика.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК РЕЗОНАТОРА

Для обеих конструкций резонатора были проведены измерения основных характеристик (резонансная частота и добротность) и их сравнение. Образцы с варьiruемым внутренним диаметром помещались в рабочую зону резонатора, и проводилась запись его резонансной

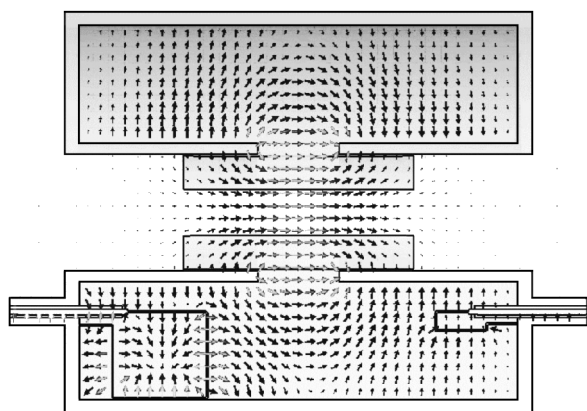


Рис. 6. Структура электрического поля основной моды колебаний в новой модели датчика

кривой. Для уменьшения шумов, не имеющих отношения к процессу горения, применяли аппроксимацию экспериментальных кривых зависимостью Лоренца:

$$P(f, f_0, Q) \approx \frac{Q^2}{(f_0/f)^2 + Q^2(1 - f_0^2/f^2)^2}, \quad (1)$$

где $P(f, f_0, Q)$ — мощность, регистрируемая на выходном порту резонатора, Q — добротность резонатора, f — текущая частота, f_0 — резонансная частота (эту форму имеет частотная характеристика нашего резонатора в используемом нами диапазоне частот).

Изменение (увеличение) внутреннего диаметра образца приводит к изменению (повышению) резонансной частоты датчика из-за уменьшения количества диэлектрика в зоне максимума электрического поля. Если образец обладает конечными потерями, происходит также и изменение добротности резонатора.

Обозначим через f_0 резонансную частоту пустого датчика, через f_i — резонансную частоту датчика с образцом. Величину f_n будем называть нормированной резонансной частотой: $f_n = f_i/f_0$.

Экспериментально были получены данные по зависимости нормированной резонансной частоты f_n и добротности резонатора Q от внутреннего диаметра образца для обоих датчиков, причем измерения датчиком новой конструкции были сделаны при трех длинах рабочей зоны: $L = 4, 7, 13$ мм. Результаты измерений приведены на рис. 7 и 8.

В качестве модельного образца использовали длинную трубку из полимеризованной эпоксидной смолы ЭД-20 в виде обратного ко-

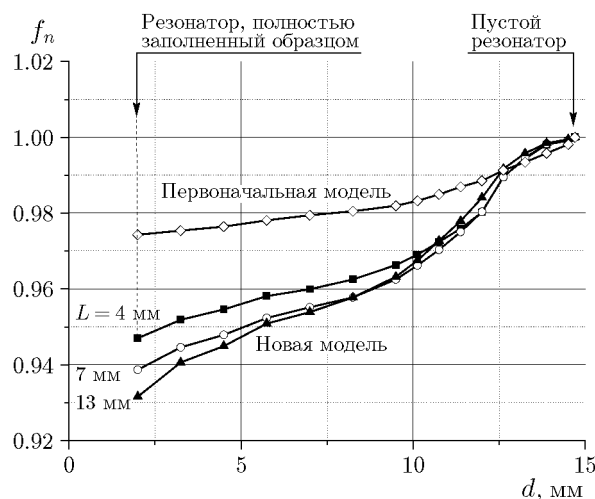


Рис. 7. Зависимость нормированной резонансной частоты для первоначальной и новой моделей СВЧ-датчика от диаметра внутреннего канала образца:

резонансная частота пустого датчика: первоначальная модель — $f_0 = 898.5$ МГц; новая модель — $f_0 = 984.5, 1139.2, 1356.1$ МГц соответственно при длине рабочей зоны $L = 4, 7, 13$ мм

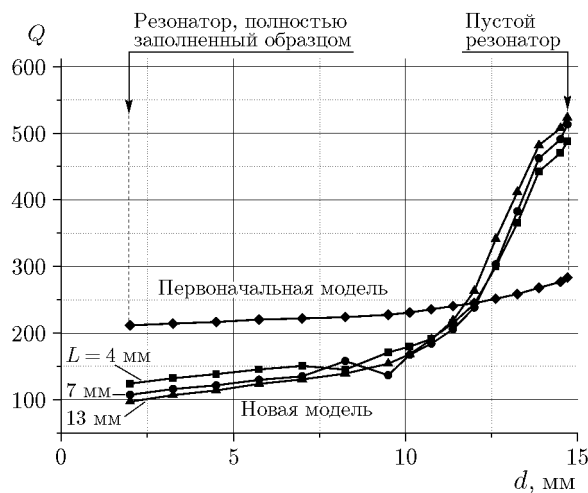


Рис. 8. Зависимость добротности первоначальной и новой (при $L = 4, 7, 13$ мм) моделей СВЧ-датчика от диаметра внутреннего канала образца

нуса с внешним диаметром 14 мм и внутренним диаметром, изменяющимся вдоль оси образца от почти полного заполнения до нулевой толщины стенок. Эксперименты проводились в режиме последовательного перемещения модельного образца внутри металлических трубок в СВЧ-датчике. При этом длина образца и угол образующей обратного конуса бы-

ли выбраны такими, чтобы на длине рабочей зоны резонатора можно было практически пренебречь изменением внутреннего диаметра образца. Диэлектрическая проницаемость образца (по нашим измерениям на частотах $0.7 \div 1.2$ ГГц) составляла $\varepsilon = 3.3$, параметр диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta \approx 0.05$.

Видно, что, во-первых, каждой длине рабочей зоны соответствует (см. рис. 7) своя резонансная частота (с ростом L растет f_n). Во-вторых, чувствительность датчика (пропорциональное изменение f_n при вариации внутреннего диаметра образца) возрастает с увеличением длины зоны измерений. При этом чувствительность новой модели датчика даже при малом значении L выше, чем у первой модели. Связано это с наличием металлических колец в рабочей зоне первоначального датчика, которые уменьшают величину связи полости резонатора с образцом.

Графики на рис. 8 показывают, что добротность пустого датчика первой конструкции гораздо ниже, чем добротность пустого датчика новой модели. В то же время при полном заполнении образцом добротность первоначального датчика оказалась выше по сравнению с новым датчиком.

Как видно из рис. 8, добротность в обеих моделях резонатора при изменении внутреннего диаметра образца изменяется. Для первой модели это изменение добротности при использовании образцов с фиксированными диэлектрическими потерями ($\operatorname{tg} \delta \approx 0.05$) составляет около 20 %, а для новой модели достигает 4–5 раз. Это означает, что если проводить измерения на фиксированной частоте (первая СВЧ-методика), то появится заметная ошибка в случае изменения в процессе газификации диэлектрических потерь в образце как в газовой, так и в твердой фазе (при изменении потерь меняется форма резонансной кривой, см. формулу (1)).

На основе данных, приведенных на рис. 7, путем простых вычислений можно показать, что точность измерения радиуса канала составляет $R^* \approx 4.2$ мкм. Подробнее об определении R^* изложено в приложении, формула (П2).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

В прежней модели датчика реализация СВЧ измерительного тракта (рис. 9) базировалась на использовании анализатора скалярных

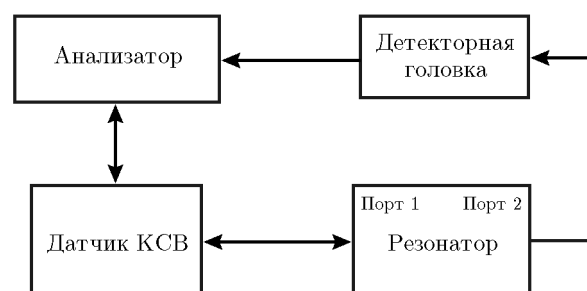


Рис. 9. Принципиальная схема измерительного тракта установки

цепей Р2М-04А (МИКРАН, Томск). В статических калибровочных экспериментах по новой методике для регистрации коэффициента отражения S_{11} и коэффициента передачи S_{21} также применялся этот анализатор. Входящий в него датчик КСВ использовался для измерения параметра S_{11} , который служил для настройки величины связи источника СВЧ с резонатором; с помощью детекторной головки проводились измерения параметра S_{21} .

Анализатор Р2М-04А способен сканировать спектр с частотой развертки до 5000 точек в секунду, однако при этом временная пауза между сканами (кадрами) составляет ≈ 20 мс. Такие параметры существенно ограничивают возможности новой методики.

При применении резонаторного метода 2 в нестационарных экспериментах необходимо достаточно быстро сканировать заданный диапазон частот в рамках одного кадра и время сканирования кадра должно быть, как минимум, на порядок меньше характерного времени исследуемого процесса. Для увеличения быстродействия установки в качестве источника СВЧ-колебаний был использован генератор, управляемый напряжением (ГУН), MVCO-075150 (МИКРАН, Томск). Этот генератор работает в частотном диапазоне от 700 МГц до 1.5 ГГц (при изменении управляющего напряжения от 0.5 В до 18 В) и обеспечивает развертку частоты порядка $10^4 \div 10^5$ кадр/с. Диапазон изменения частоты задавали исходя из требуемого времени развертки и количества отсчетов, обеспечивающих требуемую точность определения резонансной частоты. Мощность на выходном порту резонатора ($\sim S_{21}$) регистрировали диодным детектором (HP/Keysight 423B low-barrier Schottky diode detector).

На рис. 10 приведена схема экспериментальной установки. Управление частотой осу-

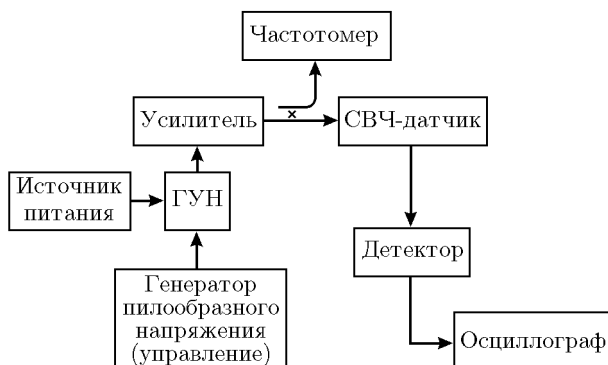


Рис. 10. Блок-схема экспериментальной установки

ществляется с помощью генератора пилообразного напряжения AG1011F (OWON). В качестве регистрирующего прибора использован 12-битный осциллограф XDS2102A (OWON). В схеме также используется дополнительный СВЧ-усилитель +20 дБ (HP/Keysight 8447F), поскольку выходная мощность ГУН недостаточна для надежной регистрации выходного сигнала датчика диодным детектором.

Линейно изменяющееся управляющее напряжение подается на ГУН, откуда СВЧ-колебания поступают на входной порт резонатора. Сигнал с выходного порта детектируется, и полученное напряжение записывается в память осциллографа. Синхронно во второй канал памяти записывается величина соответствующего управляющего напряжения для последующего восстановления значения резонансной частоты. Предварительно проводится калибровка ГУН — измеряется зависимость частоты генератора f_g (с помощью частотомера ЧЗ-63) от управляющего напряжения $U_{control}$. График зависимости представлен на рис. 11. На нем отмечен рабочий диапазон частот, в котором проводились измерения нестационарной скорости газификации.

На рис. 12 показаны резонансные кривые новой модели СВЧ-датчика, полученные экспериментально при изменении внутреннего диаметра образца (толщины горящего свода канального заряда). Принцип измерений показан ранее (см. рис. 4).

В данном эксперименте временное разрешение (длительность интервала измерения частотной характеристики) составляло 10 мс, однако реально быстроедействие схемы позволяет получать разрешение порядка 10 мкс. Видно, что с течением времени (слева направо) вели-

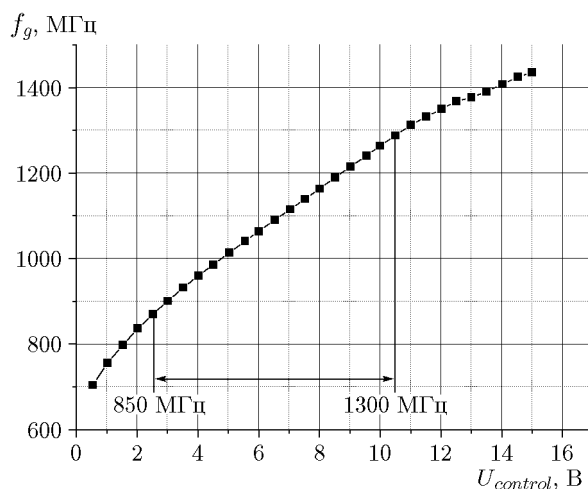


Рис. 11. Калибровочный график зависимости частоты генератора от управляющего напряжения

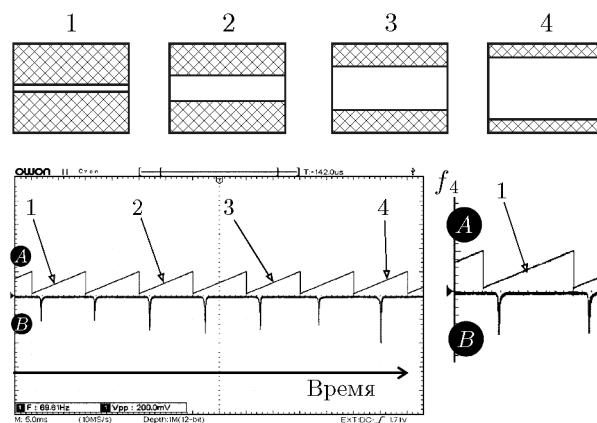


Рис. 12. Частотные характеристики новой модели СВЧ-датчика при изменении внутреннего диаметра образца:

A — управляющий сигнал, однозначно связанный с текущей частотой, B — напряжение на выходе детектора

чина резонансной частоты на индивидуальном кадре смещается в правую сторону, что соответствует уменьшению заполнения резонатора веществом: начало газификации, большой объем образца; конец газификации, пустой резонатор.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описана новая СВЧ-резонаторная методика, позволяющая измерять скорость газификации в нестационарном режиме. Особенность методики заключается в том, что проводится последовательная регистрация частотных ха-

рактических СВЧ-датчика и определяется динамика изменения его резонансной частоты, служащей мерой количества газифицируемого вещества в резонаторе.

Спроектирована конструкция новой модели датчика, и испытан его действующий макет. Отличием нового датчика является отсутствие металлических колец в резонаторе и наличие двух новых возможностей: изменения длины рабочей зоны и регулирования коэффициента связи с подводными линиями с целью получения «слабой связи» резонатора с генератором и детектором. Оценка чувствительности приведена в приложении.

ЛИТЕРАТУРА

1. Zarko V. E., Kuo K. K. Critical review of methods for regression rate measurements of condensed phase systems // *Int. J. Energ. Mater. Chem. Propul.* — 1994. — V. 3, N 1-6. — P. 600–623. — DOI: 10.1615/IntJEnergeticMaterialsChemProp.v3.i1-6.590.
2. Mikheev V. F., Zarko V. E., Borin S. M., Kutsenogii K. P., Simonenko V. N. Measurement of burning rates in transient combustion processes under influence of external radiation // *Prog. Astronaut. Aeronaut.* — 1976. — V. 63. — P. 173–187. — DOI: 10.2514/5.9781600865374.0173.0187.
3. Зарко В. Е. Основы нестационарного горения твердых топлив: дис. ... д-ра физ.-мат. наук / Ин-т химической кинетики и горения СО АН СССР. — Новосибирск, 1984.
4. Аbruков В. С., Аверсон А. Э., Мальцев В. М. Новые возможности исследования процессов горения конденсированных систем методами интерферометрии // *Физика горения и взрыва*. — 1983. — Т. 19, № 5. — С. 66–69.
5. Frederick R. A., Jr. Measuring the regression of a burning solid propellant // *Rev. Scient. Instrum.* — 1996. — V. 67, N 8. — P. 2903–2909. — DOI: 10.1063/1.1147070.
6. Eisenreich N., Kugler H. P., Sinn F. An optical system for measuring the burning rate of solid propellant strands // *Propell., Explos., Pyrotech.* — 1987. — V. 12. — P. 78–80.
7. Wang J., Gao Z., Sang B. Laser technology for measurement of solid propellant transient burning rates during rapid depressurization // *Fuel*. — 2001. — V. 80, N 2. — P. 263–271. — DOI: 10.1016/S0016-2361(00)00087-9.
8. Murphy J. J., Krier H. Evaluation of ultrasound technique for solid-propellant burning rate response measurements // *J. Propul. Power*. — 2002. — V. 18, N 3. — P. 641–651. — DOI: 10.2514/2.5978.
9. Xiao Y., Amano R. S., Cai T., Li J., He G. Particle velocity on solid-propellant surface using X-ray real-time radiography // *AIAA J.* — 2003. — V. 41, N 9. — P. 1763–1770. — DOI: 10.2514/2.7294.
10. Strand L. D., Magiawala K. R., McNamara R. P. Microwave measurement of the solid-propellant pressure-coupled response function // *J. Spacecraft Rockets*. — 1980. — V. 17, N 6. — P. 483–488. — DOI: 10.2514/3.57768.
11. Кискин А. Б., Зарко В. Е., Мамаев А. С. Датчик малых сил с расширенным частотным диапазоном и компенсацией возмущений окружающей среды // *Горение и плазмохимия*. — 2016. — Т. 14, № 4. — С. 279–284.
12. Перов В. В., Зарко В. Е., Жуков А. С. Новый микроволновый метод измерения нестационарной массовой скорости газификации конденсированных систем // *Физика горения и взрыва*. — 2014. — Т. 50, № 6. — С. 130–133.
13. Zarko V., Perov V., Kiskin A., Nalivaichenko D. Microwave resonator method for measuring transient mass gasification rate of condensed systems // *Acta Astronaut.* — 2019. — V. 158. — P. 272–276. — DOI: 10.1016/j.actaastro.2019.03.028.
14. Зарко В. Е., Кискин А. Б., Наливайченко Д. Г. Система измерения массовой скорости газификации: Пат. на полезную модель № 189669. — 30.05.2019. — https://www1.fips.ru/register-doc-view/fips_servlet?DB=RUPM&rn=127&DocNumber=189669&TypeFile=html.
15. Zarko V., Perov V., Zvegintsev V., Nalivaichenko D. New method for measuring transient mass gasification rate of condensed systems // 56th Israel Annu. Conf. on Aerospace Sci. — 2016.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Определим пространственное разрешение R^* как точность, с которой измеряется внутренний радиус канального образца. Для оценки данного параметра требуется определить, с какой точностью (δf) задается частота, на которой происходит измерение S_{21} . В начале определим, как меняется частота генератора в зависимости от управляющего напряжения (ГУН). Согласно калибровочному графику для ГУН на рис. 11 рабочему диапазону частот $f_1 \div f_2$ (800 МГц $\div$ 1.3 ГГц) соответствует диапазон изменения управляющего напряжения $U_1 \div U_2$ (2.5 $\div$ 10.5 В). Следовательно, при изменении напряжения на 1 В частота меняется на величину $[(f_1 - f_2)/(U_1 - U_2)]$ (в нашем случае 62.5 МГц/В). Если напряжение

задается и измеряется с точностью $\pm\delta U$, то параметр δf определяется формулой

$$\delta f = \delta U \frac{f_1 - f_2}{U_1 - U_2}. \quad (\text{П.1})$$

В нашем случае $\delta U = 0.5$ мВ (определяется стабильностью используемого источника питания). Подставляем значения параметров в формулу (П.1) и получаем $\delta f = 32.5$ кГц.

Рассмотрим значения двух резонансных частот (обозначения из рис. 4 и 7): f_1 для радиуса r_1 (принадлежит исходному объему образца) и f_4 для радиуса r_4 (принадлежит пустому резонатору); $r_4 > r_1$ и $f_4 > f_1$. Обозначим: $\Delta f_{\text{рез}} = f_4 - f_1$, $\Delta r = r_4 - r_1$. Отношение $\Delta f_{\text{рез}}/\Delta r$ назовем чувствительностью датчика. Тогда, если изменению внутреннего радиуса Δr соответствует изменение резонансной частоты $\Delta f_{\text{рез}}$, то R^* будет соответствовать δf .

Отсюда получаем выражение для оценки пространственного разрешения:

$$R^* = \frac{\Delta r}{\Delta f_{\text{рез}}} \delta f. \quad (\text{П.2})$$

Оценим R^* для новой модели датчика с длиной рабочей зоны $L = 4$ мм. По рис. 7 определяем параметры Δr и $\Delta f_{\text{рез}}$: $r_1 = 1$ мм, $r_4 = 7$ мм, $\Delta r = 6$ мм; $f_1 = 934.5$ МГц, $f_4 = 984.5$ МГц, $\Delta f_{\text{рез}} = 50$ МГц. После подстановки этих величин в формулу (П.2) получаем, что пространственное разрешение примерно равно $R^* \approx 4$ мкм.

Поступила в редакцию 25.02.2022.

Принята к публикации 30.03.2022.