

## НОВЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ГОРЕНИЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА С ПОМОЩЬЮ УЛЬТРАЗВУКА

К. Хасегава, К. Хори

Институт космических наук и астронавтики, Японское агентство аэрокосмических исследований Сагамихара, Канагава 229-8510, Япония, hasegawa@keisoku.jaxa.jp

Разработан новый метод измерения скорости горения твердого топлива с помощью ультразвука. Ультразвук направляется на поверхность горения образца топлива со стороны холодного торца, и отраженная волна со смещенной в соответствии с эффектом Доплера частотой анализируется с помощью вейвлет-метода. Этот способ позволяет получить мгновенные значения линейной скорости горения и, таким образом, является мощным инструментом изучения неустойчивости горения твердых топлив. Для идентификации сигнала отраженной от поверхности горения ультразвуковой волны предпочтительнее оказался вейвлет-анализ, даже при очень низкой интенсивности сигнала, неотличимой от белого шума при обычном способе измерения. Предприняты меры для исключения соединительного материала между ультразвуковым зондом и образцом топлива, чтобы смоделировать реальную ситуацию измерения в ракетном двигателе. С успехом применено устройство поглощения шумовых колебаний, ослабляющее сигнал сильных многократных переотражений в металлической пластине между образцом топлива и зондом. Благодаря этим двум усовершенствованиям стало возможным обнаружить и обработать сигнал в более длинном образце в условиях, соответствующих работе реального твердотопливного ракетного двигателя.

Ключевые слова: твердое топливо, ультразвук, вейвлет-анализ, скорость горения.

### ВВЕДЕНИЕ

Для проектирования ракетного двигателя в первую очередь важно знать характеристики стационарной скорости горения твердого топлива. Однако незнание особенностей поведения скорости в нестационарных условиях может привести к серьезным авариям. Обычно линейную скорость горения в стационарных условиях получают методом перегорающих в образце топлива проволочек или на маленьких двигателях. Во Французском национальном космическом агентстве исследований (ONERA) создана ультразвуковая методика «Round trip technique» (что можно перевести как «туда и обратно», т. е. методика генерации тестового сигнала и регистрации его отражения от поверхности горения, — *примеч. пер.*), позволяющая получать характеристики скорости горения твердого топлива весьма сложным образом, и разработано устройство EDUM (электронное устройство для ультразвуковых измерений), широко используемое в мире при исследовании горения твердых топлив [1–13].

Принципиальная схема этого метода представлена на рис. 1. Образец торцевого горения, расположенный внутри камеры сгорания, горит одномерно. Между образцом и зондом находится соединительный материал (СМ), который защищает зонд от воздействий высокой

Соединительный материал

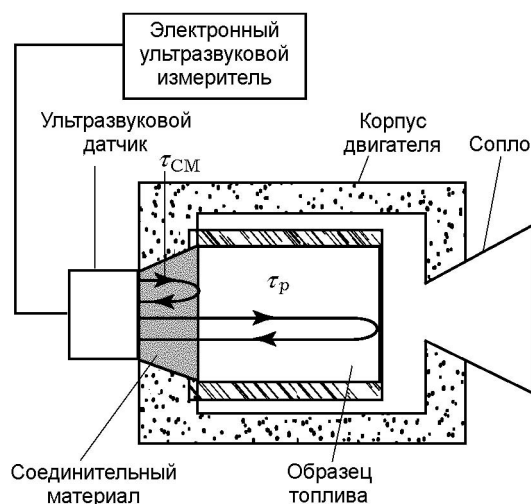


Рис. 1. Схема ультразвукового метода измерения «туда и обратно»

К. Hasegawa, K. Hori.

The Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, Sagami-hara, Kanagawa 229-8510, Japan.

температуры и давления внутри камеры. Излучаемый зондом ультразвук проходит через СМ и топливо, при этом линейная скорость горения  $r_b$  определяется уравнением

$$r_b = \frac{d}{dt} \left[ \frac{c}{2} (\tau_p - \tau_{СМ}) \right]. \quad (1)$$

Здесь  $\tau_p$  — время прохождения туда и обратно волны, отраженной от поверхности горения топлива,  $\tau_{СМ}$  — время прохождения туда и обратно волны, отраженной от поверхности раздела соединительного материала и образца топлива,  $c$  — скорость звука в топливе. В общем случае структура горячей поверхности меняется с давлением, и это должно оказывать влияние на величину  $\tau_p$ . Однако ультразвуковые сигналы не достигают поверхности горения. Они отражаются от акустической поверхности, которая фактически формируется между основной массой топлива и тонким поверхностным слоем, в котором вследствие быстрого роста температуры и существенного изменения плотности велики изменения акустического импеданса. По этой причине изменение структуры поверхностного слоя не влияет на  $\tau_p$ . Поскольку толщина поверхностного слоя зависит от температуры горячей поверхности, а зависимость последней от давления, как правило, невелика, толщину поверхностного слоя можно считать постоянной с довольно высокой точностью. Все это служит обоснованием уравнения (1). Этот метод в принципе может быть применен также и к исследованию неустойчивости, и скорость нестационарного горения можно получить путем увеличения количества отсчетов.

Однако при использовании методики «Round trip» возникают следующие проблемы.

1. Специфические требования к характеристикам СМ. Для применения метода необходима специальная камера сгорания с СМ в торце. Кроме того, акустический импеданс СМ должен максимально соответствовать импедансу топлива, чтобы подавить паразитные отражения от границы раздела СМ/топливо. При измерении скорости горения обычных смесевых топлив в качестве СМ обычно выбирается эпоксидная смола, а повышение акустического импеданса достигается добавлением в СМ определенных типов тонкодисперсных порошков. Однако, если необходим пониженный акустический импеданс, то уже требуется заменить материал самого СМ. Но найти другой

материал, с более низким акустическим импедансом, очень трудно. Кроме того, при очень высоком давлении на краях раздела между СМ и стенкой камеры концентрируются высокие напряжения, вызывающие разрушение СМ. По нашим наблюдениям предел по давлению находится около 15 ÷ 20 МПа, и измерения выше этого уровня весьма затруднительны.

2. Осреднение скорости горения  $r_b$  за период измерительного (повторяющегося) цикла сигнала ультразвука. Изменения, которые происходят между циклами, осреднены, потому что  $r_b$  определяется дифференцированием по времени измеренной длины образца топлива (рис. 2). Например, если частота повторения составляет 100 Гц, скорость горения является средней величиной за промежуток времени 10 мс. Кроме того, чтобы уменьшить влияние шумов, перед дифференцированием проводится сглаживание зависимости длины образца от времени по результатам нескольких десятков измерений. Таким образом, трудно утверждать, что этот метод подходит для регистрации нестационарных явлений.

3. Требование постоянства интенсивности сигнала для точного измерения времени распространения. В данной методике сигнал отраженной волны диагностируется по его амплитуде. Используется метод пересечения нулевого уровня, суть которого в том, что порог срабатывания задается существенно больше, чем эффективная величина белого шума поступающих данных, и  $\tau_p$  определяется как момент времени, когда амплитуда сигнала превышает этот порог. На рис. 3 представлены регистрируемые сигналы.

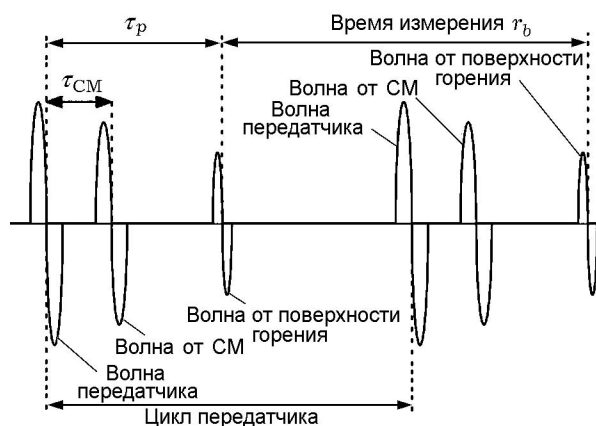


Рис. 2. Временное окно в методе «туда и обратно»

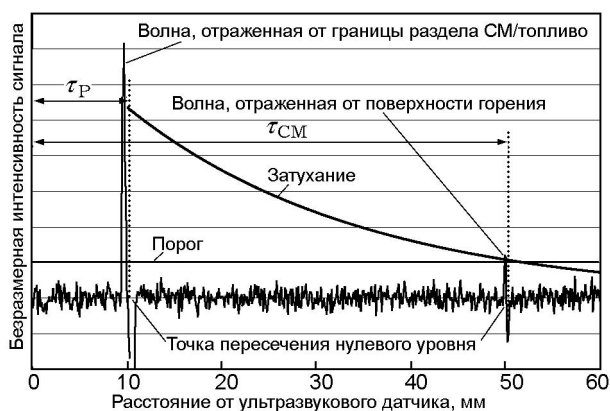


Рис. 3. Типичная кривая ослабления ультразвукового сигнала

В случае гауссовского белого шума вероятность появления амплитуды шума, превышающей порог, уменьшается с ростом величины порога. Однако, поскольку интенсивность регистрируемого сигнала должна быть достаточно высокой, измерения на длинных образцах в конечном счете невозможны из-за сильного ослабления сигнала веществом твердого топлива.

В настоящей работе основное внимание уделено анализу изменения частоты ультразвука. Посредством измерения разницы между частотами излученной и пришедшей волн, которая обусловлена отражением от перемещающейся поверхности горения, была оценена скорость движения поверхности горения с использованием значения скорости звука в топливе [14–16].

Так как в гауссовском белом шуме не присутствуют какие-либо выделенные частоты, ультразвук, содержащий фиксированную частоту, может быть выделен частотным анализом, даже если интенсивность сигнала мала и маскируется шумами. Это позволяет измерять скорость горения образца большей длины, чем при использовании метода «туда и обратно».

Кроме того, с помощью ультразвукового метода единичные данные по скорости горения можно получить из данных по изменению частоты в соответствии с эффектом Доплера, что позволяет определить значение не осредненной, а мгновенной скорости горения, которая необходима при исследовании неустойчивости.

## 1. ЭКСПЕРИМЕНТ

### 1.1. Образец топлива

Образец топлива торцевого горения представлял собой цилиндр диаметром 30 мм, заполнявший внутренность бакелитовой трубки. Длина образца являлась экспериментальным параметром. Исследовался стандартный состав, содержащий перхлорат аммония (ПХА)/полибутадиен с концевыми гидроксильными группами (НТРВ)/алюминий (Al) в соотношении по массе 65/16/19. Состав дополнительного образца, роль которого будет объяснена ниже, был таким же.

### 1.2. Камера сгорания

Камера сгорания представляла собой цилиндр из нержавеющей стали длиной 370 мм, внешним диаметром 155 мм и внутренним диаметром 120 мм. Камера оборудована соплом, датчиком давления и предохранительным клапаном в донной части, а также разъемом для электроподжига и креплением для ультразвукового зонда на поверхности головной части (крышки). Ультразвуковой зонд устанавливался непосредственно на торцевой поверхности, без использования СМ. В камеру сгорания вставлен теплостойкий графитовый вкладыш, а образец топлива торцевого горения приклеивался на поверхность крышки. Поскольку площадь поверхности горения образца недостаточно велика, в нижнюю часть камеры сгорания помещался дополнительный образец топлива того же состава для регулирования уровня максимального давления во время огневого теста. Сферический воспламенитель, состоящий из электроподжига, дымного пороха и

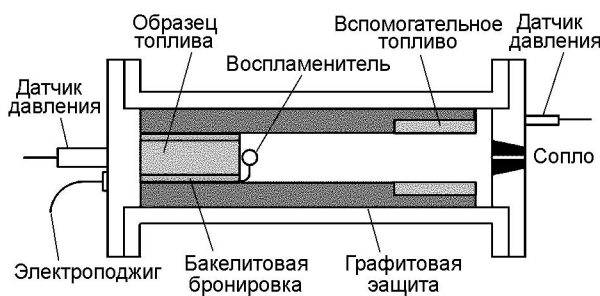


Рис. 4. Схема камеры сгорания

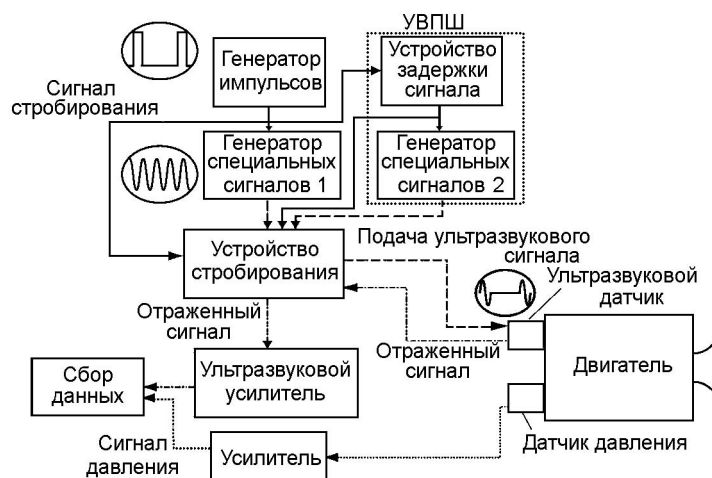


Рис. 5. Принципиальная электрическая схема в методе Доплера

маленьких кусочков топлива ПХА/НТРВ, использовался для «мягкого» зажигания, при котором давление увеличивается медленно, что позволяет измерить скорость горения образца топлива в диапазоне давлений от атмосферного до максимального в одном эксперименте. Схема камеры сгорания показана на рис. 4. Если в ней обе торцевые пластины заменить специальными пластинами, приспособленными для измерения скорости звука, камеру можно использовать для определения скорости звука в топливе как функции давления и температуры.

### 1.3. Ультразвуковая система

Использовался широкополосный высокочувствительный ультразвуковой зонд полимерного типа с частотой 3 МГц. Блок-схема измерения и контроля представлена на рис. 5. С помощью импульсного генератора и генератора сигналов специальной формы три импульсных сигнала с частотой следования 100 Гц и напряжением 10 В посылаются в зонд. Поскольку интенсивность излучаемых сигналов велика, использовалось устройство стробирования, чтобы управлять синхронизацией каналов подачи сигнала и усилителя и направлять в усилитель только слабые отраженные сигналы, защищая его от мощных импульсов генератора сигналов. Запись проводилась с использованием 100-мегагерцового регистрирующего устройства.

## 2. НОВЫЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ МЕТОД (МЕТОД ДОПЛЕРА)

### 2.1. Принцип работы

Ультразвук, аналогично обычным звуковым волнам, характеризуется такими фундаментальными свойствами, как распространение, преломление и отражение, и тоже подвержен эффекту Доплера. Схематически это изображено на рис. 6. Частота ультразвука, излучаемая зондом, равна  $f_0$ , частота сигнала, отраженного от горячей поверхности, увеличена до  $f$  в соответствии с эффектом Доплера. Соотношение между  $f_0$ ,  $f$ ,  $r_b$ ,  $c$  задано уравнением

$$f = f_0 \frac{c + r_b}{c - r_b}. \quad (2)$$

Чтобы оценить  $r_b$  в соответствии с уравнением (2), необходимо точно знать скорость рас-

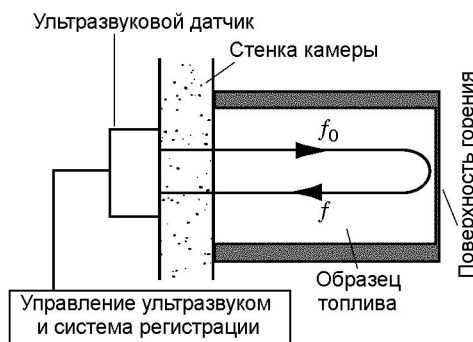


Рис. 6. Принцип метода Доплера

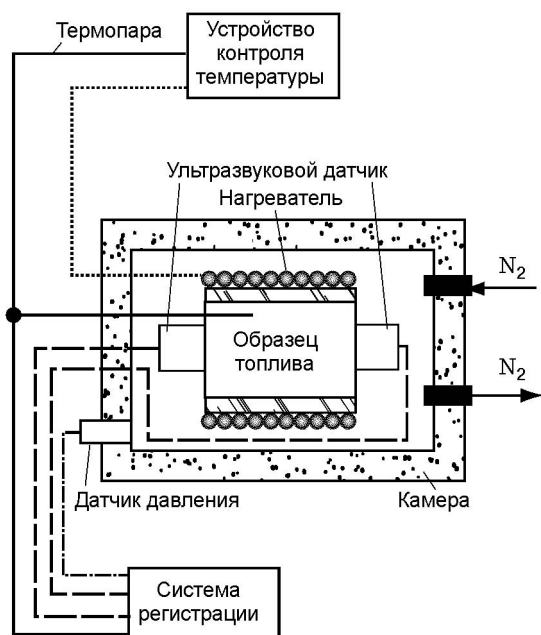


Рис. 7. Схема установки измерения скорости звука в топливе

пространения ультразвука в образце топлива, которая является функцией давления и температуры:  $c = c(p, T)$ . Метод ее измерения показан на рис. 7. Для измерения использовалась главная часть камеры сгорания — цилиндр, а головная и донная пластины были заменены. Нагреватель образца, термопара и устройство термокомпенсации нуля устанавливались внутри камеры. Камера накачивалась сжатым азотом. С помощью пары датчиков ультразвука на обоих торцах образца была измерена скорость звука как функция давления и температуры в диапазонах  $0.1 \div 10$  МПа и  $20 \div 60$  °С.

## 2.2. Удаление шумов

Первый шаг обработки сигнала — удаление шумов для выделения только отраженной от поверхности горения волны. В данной экспериментальной методике тестирования проблема заключается в многократно отраженном эхе, возникающем в головной торцевой пластине камеры сгорания. Типичная форма волнового сигнала показана на рис. 8, а. В большинстве случаев отраженные от поверхности горения волны не могут быть диагностированы, поскольку мощность сигнала многократного эха значительна. Обычно для устранения таких шумов используется полосовой фильтр, однако частота многократного эха  $f_0$  близка к  $f$  и

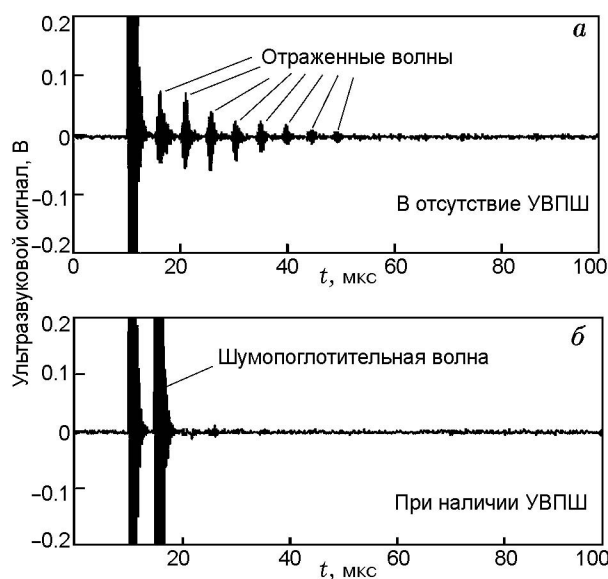


Рис. 8. Эффект от применения устройства волнового поглощения шумов

такой фильтр не удается применить, поскольку скорость его подстройки недостаточно велика. Это привело к созданию устройства волнового поглощения шумов (УВПШ), которое излучает волну, называемую шумопоглощающей, в противофазе первому эху, и гасящую последующие отраженные эхо. Разработка УВПШ оказалась успешной, эффект от его применения продемонстрирован на рис. 8, б. При использовании УВПШ многократные эхо значительно ослабляются, что дает возможность определить волны, отраженные от поверхности горения, независимо от величины периода их следования. После обработки сигналов УВПШ, для того чтобы облегчить анализ частоты отраженной волны, применялся полосовой фильтр с пологой характеристикой, которая не влияет на отраженные сигналы.

## 2.3. Частотный анализ (вейвлет-метод)

Значения скорости звука  $c \approx 2000$  м/с и скорости горения топлива  $r_b \approx 5$  мм/с отличаются примерно на пять порядков. Поэтому разница между  $f$  и  $f_0$  очень мала, всего несколько герц, и частота отраженной волны  $f$  должна быть измерена с очень высокой степенью точности, чтобы определить скорость горения с необходимой достоверностью. При частотном анализе обычно применяется метод преобразования Фурье, однако в данной экспери-

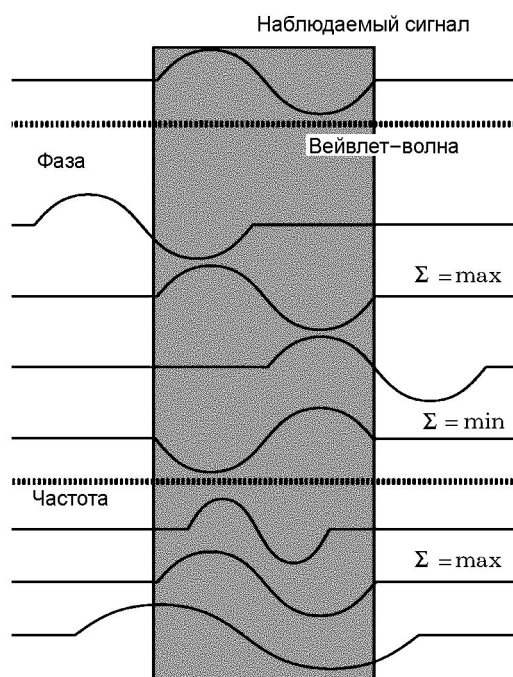


Рис. 9. Принцип вейвлет-анализа

ментальной методике импульсная форма волны и очень короткий цикл повторения не позволяют получить длительность сигнала, достаточную для достижения требуемой точности измерения скорости горения. Был применен вейвлет-анализ (wavelet-technique), часто используемый для получения максимально высокой точности измерения частоты импульсных сигналов. Методика заключалась в интегрировании по анализируемому интервалу произведения величины регистрируемого сигнала и «вейвлет-волны» с частотой и фазой в качестве параметров. Схема метода представлена на рис. 9. Вейвлет-интеграл максимален, когда фазы и частоты регистрируемой волны и вейвлет-волны совпадают. Результат показан на рис. 10 в трехмерных координатах. Поиск точки максимума на этой диаграмме эквивалентен поиску частоты и фазы регистрируемых сигналов, а скорость горения вычисляется по  $f$ ,  $f_0$  и  $c(p, T)$  в соответствии с уравнением (2).

Для оценки погрешности определения скорости горения топлива новым методом проведен дополнительный анализ ошибок измерения скорости звука  $c(p, T)$ , параметров  $f$ ,  $f_0$  и давления во время эксперимента. Точность измерения  $c(p, T)$  обусловлена ошибками измерения длины образца, температуры и давления. Точ-

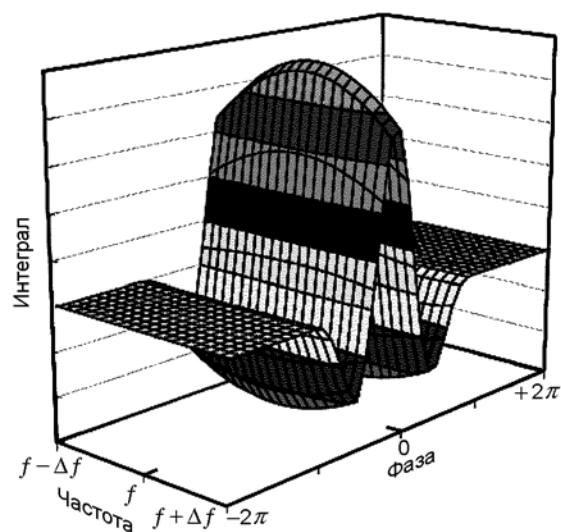


Рис. 10. Трехмерное представление вейвлет-интеграла

ность измерения длины образца — 0.05 мм при длине образца 100 мм, следовательно, ошибка измерения находится в пределах 0.05 %. Счетчик времени распространения ультразвука имеет достаточно высокую точность измерения. Точность измерения температуры определяется характеристиками усилителя и составляет 0.6 К, а давление измеряется с ошибкой 0.5 %. Таким образом, полная ошибка определения скорости звука при атмосферном давлении и температуре 25 °С может быть оценена как 0.24 %, что следует из кривых калибровки скорости звука как функции температуры и давления, приведенных ниже в § 3, и эта величина является типичной для всего диапазона условий экспериментов данного исследования.

Считалось, что ультразвуковой передатчик не вносит ошибок в значение излучаемой частоты, поскольку стабилен с относительной точностью  $10^{-12}$ . Однако частотные характеристики механического отклика ультразвукового зонда могут стать причиной проблем при измерении частоты, если она выходит за пределы оптимального частотного диапазона зонда. Но в данном методе сдвиг частоты за счет эффекта Доплера составляет всего несколько герц и не оказывает значительного влияния. Это также касается электрических характеристик усилителя ультразвукового сигнала и фильтра белого шума.

Ошибки вейвлет-анализа зависят прежде всего от его разрешающей способности при измерении частоты и фазы. Из теоремы о вы-

борке оригинальная форма волны может быть воспроизведена при удвоенной (по крайней мере) частоте оцифровки, а в настоящем исследовании данные получены с частотой выборки 100 МГц (в 100 раз превосходящей частоту ультразвука 1 МГц), вполне достаточной для измерения. Далее вейвлет-анализ проводился с дискретностью 100 ГГц и фаза изменялась с соответствующей дискретностью. Таким образом, собственные ошибки метода незначительны при условии достаточной интенсивности сигнала. В начале горения образца топлива, когда его длина максимальна, а интенсивность сигнала слаба, становится существенным уровень белого шума. Возникает статистическая ошибка, обусловленная корреляцией между динамическим диапазоном измерительного прибора и уровнем шумов, и ошибка измерения частоты тем больше, чем слабее регистрируемые волны. Эта ошибка была оценена в численных экспериментах. Генерируемый случайным образом белый шум с гауссовским распределением добавляли к синусоидальной волне с варьируемым параметром отношения сигнал/шум, затем анализировали величину ошибки и стандартное отклонение. Стандартное отклонение составляет  $0.06 \div 0.6$  в диапазоне изменения отношения сигнал/шум  $-30 \div -10$  дБ, что ведет к ошибке в скорости горения приблизительно 5 % при  $3\sigma$  ( $\sigma$  — среднеквадратическая ошибка). Очевидно, эта ошибка доминирует среди всех упомянутых выше, и этот уровень ошибки вполне сопоставим с обычным уровнем для данных, получаемых стандартным методом, и, следовательно, вполне приемлем.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты калибровки скорости звука в образце топлива как функции температуры и давления представлены на рис. 11. Скорость звука замедляется с повышением температуры и увеличивается с ростом давления. В диапазоне выбранных условий калибровки влияние температуры оказалось значительнее. Поскольку затруднительно выразить результаты этого трехмерного графика одним уравнением, включающим температуру и давление как параметры, мы использовали эмпирическое выражение с постоянной температурой, которая соответствует начальной температуре образца топлива в каждом эксперименте.

Типичный пример изменения давления при горении образца длиной 60 мм показан на

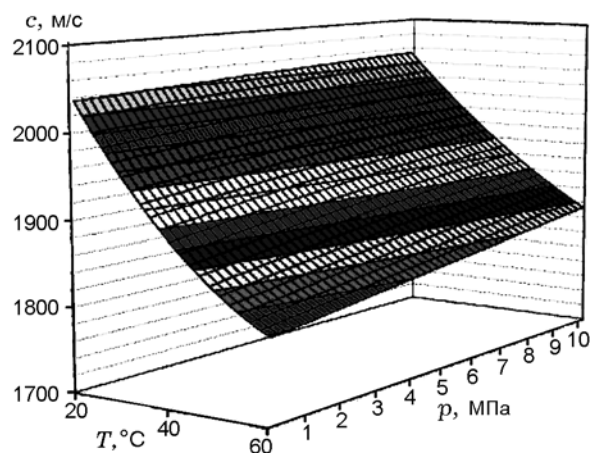


Рис. 11. Скорость звука в топливе как функция давления и температуры

рис. 12. На начальной стадии воспламенителем был «мягко» зажжен только торец образца. Вследствие этого в течение нескольких секунд давление держалось на атмосферном уровне, а затем, когда вспомогательный заряд топлива, расположенный в камере вниз по течению, был инициирован, давление возросло. На рис. 12 представлен рост давления для дополнительного трубчатого заряда, горящего по внутренней поверхности. В данном случае давление нарастало приблизительно до 11 МПа, таким образом, данные по скорости горения были получены в диапазоне давления от атмосферного до 11 МПа в одном эксперименте. В нескольких точках скорость горения была вычисле-

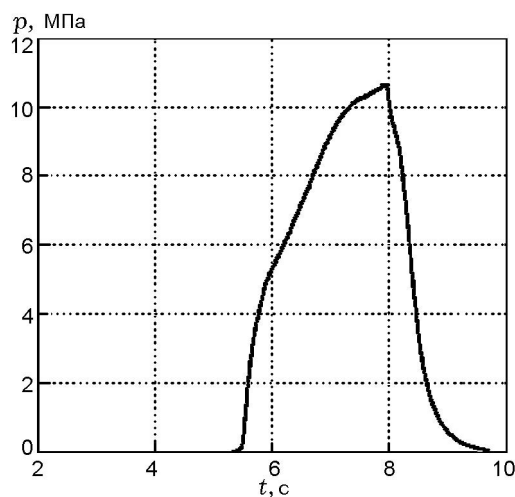


Рис. 12. Типичная кривая давления в камере сгорания во время горения

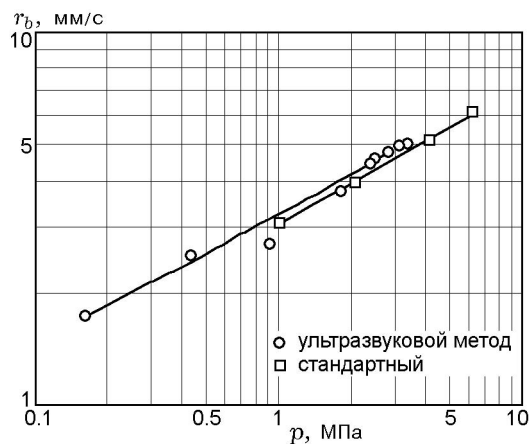


Рис. 13. Сравнение линейных скоростей горения, полученных ультразвуковым методом и методом перегорающих проволочек

на с помощью вейвлет-анализа и сопоставлена с данными, полученными методом перегорающих проволочек (рис. 13). Результаты измерения обоими методами совпадают, что указывает на высокую степень достоверности доплеровского метода измерения скорости горения. Как показано выше, ошибка этого метода оценена в 5 % при большой длине образца топлива и очень слабой интенсивности сигнала. На рис. 13 видно, что разброс данных относительно велик при низких (<1 МПа) давлениях, что соответствует начальной стадии горения, а значит, и максимальной длине образца. В данном исследовании экспериментально доказано, что отраженная от поверхности горения волна детектируема вплоть до 100-миллиметровой длины образца топлива. Это значение приблизительно в два раза превосходит предельное для метода «Round trip», с использованием СМ, что свидетельствует об очень хорошем качестве работы УВПШ в купе с вейвлет-анализом.

Разработанный метод можно применять при исследовании неустойчивого горения, поскольку значения скорости горения можно получать из данных при использовании единичного импульса. В настоящее время генерация импульсов ультразвукового сигнала с частотой 100 Гц недостаточно эффективна и измерения ограничиваются стационарными или квазистационарными режимами. Однако ожидается, что в ближайшее время достижения в области техники аналого-цифрового преобразования и передачи данных приведут к увеличению частоты и исследованию неустойчивости горе-

ния данным методом станет возможным. А повышение энергии сигнала расширит предел по длине образца топлива и сделает метод применимым к полноразмерным огневым испытаниям двигателей ракеты.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развит новый метод измерения линейной скорости горения твердого топлива с применением ультразвука. Чтобы устранить промежуточный соединительный материал, который обычно использовался в методе «туда и обратно», применялось устройство волнового поглощения шумов. Его эффективность была подтверждена экспериментально. Применение метода сдвига частоты, основанного на использовании эффекта Доплера и вейвлет-анализа, позволило значительно увеличить максимальную длину исследуемого топлива. Значения линейной скорости горения, измеренные этим методом, хорошо совпадают с данными по методу перегорающих проволочек. Поскольку каждое значение скорости горения получается из единичной отраженной волны, то ожидается, что этот метод удастся применить к изучению явлений неустойчивости, которые трудно исследовать традиционным методом «туда и обратно».

Авторы выражают глубочайшую благодарность г-ну Сеичи Ясуда (Seiichi Yasuda) и г-ну Шигеру Шимоси (Shigeru Shimose) из Института космических и астронавтических наук Японского агентства аэрокосмических исследований (The Institute of Space and Astronautical Science/Japan Aerospace Exploration Agency) и г-ну Хидефуми Шибамото (Hidefumi Shibamoto) из Пироинженерной компании Хосоя (Hosoya Pyro-engineering Co., Ltd) за сотрудничество в проведении данного исследования.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Traineau J. C., Kuentzmann P.** Ultrasonic measurements of solid propellant burning rates in nozzleless rocket motors // J. of Propulsion and Power. — 1986. — V. 2. — P. 215.
2. **Dijkstra F., Korting P., Van der Berg R.** Ultrasonic regression rate measurement in solid fuel ramjets // AIAA Paper. — 1990. — N 90-1963.
3. **Cauty F., Demarais J. C.** Ultrasonic measurement of the uncured solid propellant burning rate // Proc. of 21st Intern. Conf. of ICT. — 1990.



4. **Cauty F.** Electronic device for ultrasonic measurements (EDUM) of regression rates of solid materials // ONERA Report. — 1995.
5. **Boardman T. A., Porter L. G., Brasfield F. W., Abel T. M.** An ultrasonic fuel regression rate measurement technique for mixture ratio control of a hybrid motor // AIAA Paper. — 1995. — N 95-3081.
6. **McQuade W.** Determination of the ultrasonic burning rate technique // AIAA Paper. — 1998. — N 98-3555.
7. **Murphy J. J., Krier H.** Ultrasound measurements of solid propellant burning rates: theory and application // AIAA Paper. — 1998. — 98-3556.
8. **Lefrere R.** Ultrasonic measurement applied to ground tests of solid propellant rocket motors // AIAA Paper. — 1999. — N 99-2518.
9. **Dauch F., Moser M. D., Frederick R. A., Jr., Coleman H. W.** Uncertainty assessment of the pulse-echo ultrasonic burning rate measurement technique // AIAA Paper. — 1999. — N 99-2224.
10. **Cauty F.** Ultrasonic method applied to full-scale solid rocket motors // J. of Propulsion and Power. — 2000. — V. 16. — P. 523.
11. **Cauty F., Erades C., Godon J. C.** Experimental study of the degradation of an internal thermal insulator // AIAA Paper. — 2000. — N 2000-3329.
12. **Lefrere R., Ribdreau D., Fouin G., Dauch F.** Assessment of solid propellant motor internal ballistics at full-scale with ultrasound measurement // AIAA Paper. — 2000. — N 2000-3809.
13. **Kohga M., Frederick R. A., Jr., Moser M. D.** Ultrasonic properties of propellant ingredients // AIAA Paper. — 2001. — N 2001-3751.
14. **Hasegawa K., Shimose S., Yamaya T., Shimoda M., Hori K.** New combustion velocity measurement method using ultrasound // Jap. Explosives Soc., Autumn Research Presentation Summary. — 1998. — V. 95.
15. **Hasegawa K., Yamaya T., Shimoda M., Hori K.** New combustion velocity measurement method using ultrasound (II) // Jap. Explosives Soc., Year 2000 Lecture Summary. — 2000. — V. 59.
16. **Hasegawa K., Shimose S., Yamaya T., Shimoda M., Hori K.** New combustion velocity measurement method using ultrasound (third report) // Jap. Explosives Soc., Autumn Research Presentation Summary. — 2000. — V. 83.

*Поступила в редакцию 30/III 2009 г.*