

## ПОГРЕШНОСТИ И ШУМЫ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ РЕАКТИВНОЙ СИЛЫ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА, ГОРЯЩЕГО ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРА

Ф. Коцци, А. Балазини, Р. О. Хесслер\*

Миланский технический университет, 20133 Милан, Италия

\*35670 Сомервилль, Алабама, США

Описаны результаты исследования шумов и погрешностей, сопровождающих измерения реактивной силы, возникающей при горении твердого топлива под действием лазерного излучения. Измерение реактивной силы является методом оценки отклика горящего энергетического вещества на флуктуации потока теплового излучения, генерируемого лазером. Методика основана на измерении крайне небольших значений реактивной силы, возникающей при оттоке горящего газа от поверхности. Преимущество этого способа измерений по сравнению с методикой акустической Т-камеры заключается в использовании образцов небольших размеров, низкой стоимости и потенциально более высокой точности измерений. Отрицательной стороной обсуждаемой методики является ее высокая чувствительность к шумам вследствие небольших значений измеряемой реактивной силы. В качестве источников шумов могут выступать электрические наводки, тепловой дрейф, вибрации конструкции, акустика и низкочастотные вариации атмосферного давления. Внесенные коррективы уменьшили общий уровень шумов в пять раз и позволили расширить используемый диапазон измерений с 200 до 700 Гц. Обсуждены тестовые эксперименты, и дан анализ некоторых погрешностей. Обнаружен линейный отклик реактивной силы при действии теплового потока с модуляцией амплитуды до 25 %.

### ВВЕДЕНИЕ

Отклик горящего энергетического вещества на флуктуации давления вызывает естественный интерес при изучении колебательно-горения в ракетных двигателях. Однако методики его регистрации не совсем удовлетворительны, поскольку результат устанавливается косвенно, при измерении акустического поведения камеры горения. Кроме того, стоимость получаемых данных достаточно высока.

Согласно теории отклик, сопряженный с давлением, близко связан с откликом на флуктуации теплового потока, воздействующего на горящую поверхность. Кроме того, как показывает теория, существует небольшая реактивная сила, приложенная к горячей поверхности, как результат потери массы с этой поверхности при горении. Эти два теоретических вывода комбинируются в предлагаемой методике измерения реактивной силы, генерируемой лазерным облучением, которая имеет несколько новых привлекательных моментов: непосредственные потенциально более точные измерения; сравнительно низкая стоимость получаемых данных за счет меньшего размера образца; возможность проведения многочисленных измерений в одном эксперименте; возмож-

ность измерения как амплитуды, так и фазы отклика.

Методика измерения реактивной силы, возникающей под действием лазерного облучения, позволяет оценить отклик сжигаемого энергетического вещества на флуктуации потока теплового излучения посредством измерения реактивной силы, генерируемой потерей массы с горячей поверхности. Затем на основе теоретических построений полученные значения отклика, сопряженного с излучением, преобразуются в отклик, связанный с давлением. Эта концепция была предложена Милфисом [1] в 1972 г. в США и затем развивалась, в основном, в бывшем Советском Союзе [2]. В современной методике измерений модулированный источник теплового излучения, обычно генерируемого лазером (главным образом, CO<sub>2</sub>- или Nd:YAG-лазером) или ксеноновой дуговой лампой, воздействует на поверхность горения [3–6]. Ключевым элементом в аппаратуре для измерения реактивной силы является датчик малых сил, как правило, пьезоэлектрический или емкостный, либо индуктивный преобразователь. Модулированный во времени поток излучения, направленный на горящую поверхность твердого ракетного топлива, вызывает колебания

скорости горения и, соответственно, появление флуктуаций реактивной силы. Для синусоидальных модуляций потока небольшой амплитуды наблюдаются синусоидальные колебания скорости горения и реактивной силы. Однако при больших амплитудах синусоидальных колебаний потока может проявляться нелинейность, приводящая к несинусоидальной форме волн отклика. Низкие значения отношения сигнал/шум, обусловленные небольшой амплитудой реактивной силы и влиянием разнообразных источников шумов, представляют основную экспериментальную проблему. Для ее преодоления предлагается комбинированное решение: изоляция от внешних (акустических и конструктивных) шумов, уменьшение внутренних шумов и увеличение модуляции излучения в пределах линейных границ, для того чтобы увеличить реактивную силу. Большинство экспериментов выполнено при атмосферном давлении, но были проведены испытания и при более высоком давлении [4, 7]. Несмотря на существующие проблемы, эта методика является, тем не менее, полезным инструментом для анализа новых типов твердых топлив и контроля качества промышленного производства твердого топлива, а также дает солидную основу для лучшего понимания процессов горения. Цель настоящей работы заключается в исследовании проблемы шумов и погрешностей при измерениях реактивной силы, вызванной лазерным облучением. Основное внимание, уделено двум главным задачам:

- идентификация источников шумов и погрешностей,
- уменьшение степени их воздействия на экспериментальные результаты.

Ниже описаны экспериментальная аппаратура и методика обработки данных. Обсуждается проблема шумов, обнаруженных ранее в других работах, и применяющаяся методика снижения шумов. Для того чтобы показать влияние шумов на качество экспериментальных данных, приведен частотный отклик реактивной силы, вызванной излучением, для неметаллизированного смесового топлива на основе перхлората аммония — AP18 (ПХА — 80 %, полибутадиена с гидроксильными концевыми группами — 18 %, добавок — 2 %). Указаны возможные причины возникновения погрешностей. Приведены некоторые выводы и рекомендации.

## ОБСУЖДЕНИЕ

Отклик (функция чувствительности) реактивной силы  $F$  на колебания потока излучения  $I_s$  определен как

$$R_{fq} = \frac{F'/\bar{F}}{I'_s/\bar{I}_s}. \quad (1)$$

Это требует одновременного измерения как постоянных ( $\bar{F}$  и  $\bar{I}_s$ ), так и переменных ( $F'$  и  $I'_s$ ) компонент реактивной силы и теплового потока.

Измерение реактивной силы является сравнительно простым и непосредственным, однако ее значение очень мало. Реактивная сила, вызываемая потерей массы с горящей поверхности, зависит, среди прочих физических параметров, и от скорости горения. Для образца твердого топлива со скоростью горения 2 мм/с среднее значение реактивной силы на единицу площади порядка  $5 \cdot 10^{-3}$  Н/см<sup>2</sup> или 50 Па. Для обычно использовавшихся образцов с поперечным размером 7–8 мм постоянная компонента реактивной силы составляла  $\approx 2,5 \cdot 10^{-3}$  Н, а переменная —  $10 \div 20$  % этого значения (т. е.  $\approx 2,5 \div 5 \cdot 10^{-4}$  Н). Такие незначительные уровни силы, находящиеся на грани возможностей датчиков силы, требуют повышенного внимания к проблеме уменьшения влияния шумов на результаты измерений. Это особенно важно при тестировании материалов с низкими значениями отклика на тепловой поток, таких, например, как твердые топлива на основе ПХА при облучении CO<sub>2</sub>-лазером.

### 1. Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки показана на рис. 1. В качестве источника теплового излучения использован непрерывный CO<sub>2</sub>-лазер с длиной волны 10,6 мкм мощностью 200 Вт. Мгновенное значение излучаемой энергии контролируется персональным компьютером, который позволяет программировать произвольную временную зависимость интенсивности излучения. Программа Labview переводит требуемое значение потока теплового излучения в цифровой сигнал, и специализированный 12-битовый преобразователь генерирует требуемый сигнал напряжения, позволяющий контролировать энергию лазера. Аналоговый сигнал передается к лазеру с помощью линии оптической связи, чтобы уменьшить электрические шумы, связанные с системой питания лазера. Частотная характеристика линии оптической связи является плоской в

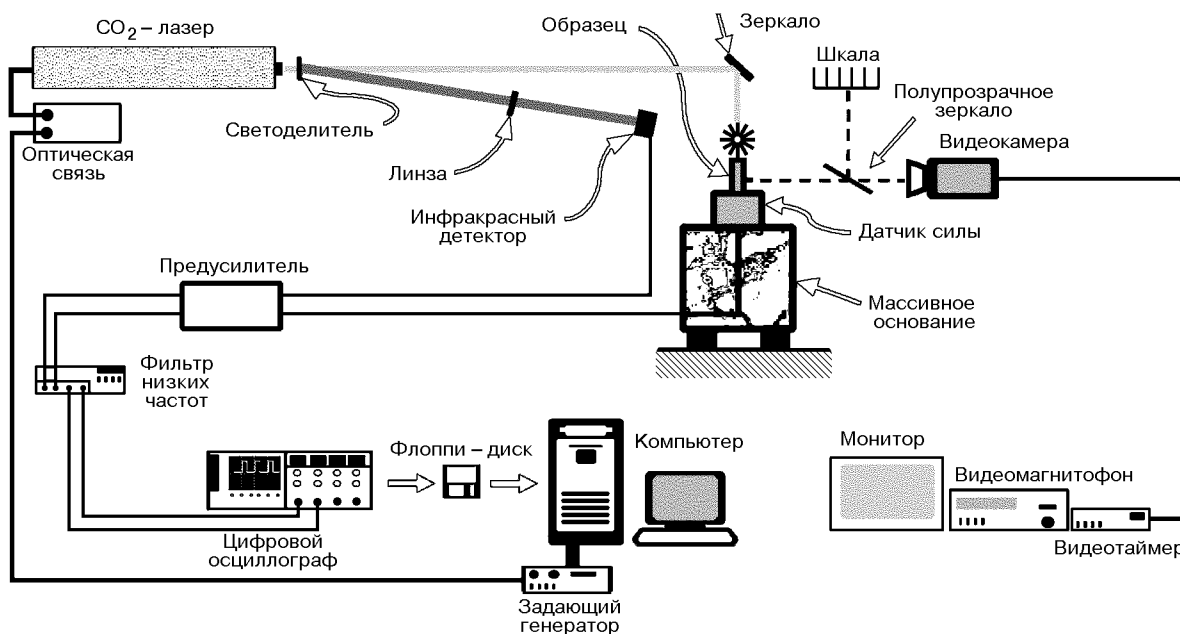


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для измерения отклика скорости горения с помощью пьезоэлектрического датчика силы

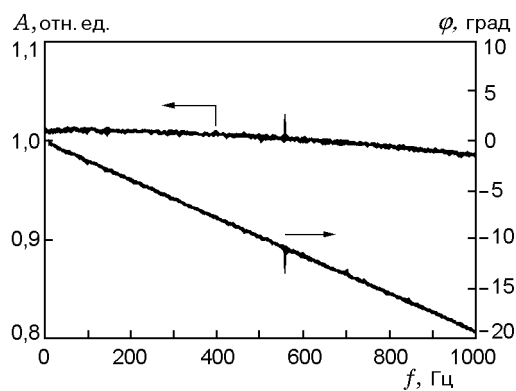


Рис. 2. Амплитуда ( $A$ ) и фаза ( $\varphi$ ) измеренного частотного отклика для системы оптической связи

пределах  $\pm 2\%$  в диапазоне  $0 \div 10^3$  Гц, с линейной зависимостью задержки фазы от частоты (рис. 2). Такая частотная характеристика дает уверенность в том, что лазерный управляющий сигнал передается с незначительным искажением амплитуды и фазы.

Цинкселеновая линза фокусирует  $0,1\%$  потока теплового излучения, расщепленного голографическим разделителем, на чувствительную площадь инфракрасного детектора для непрерывной регистрации интенсивности потока лазерного излучения. Реактивная сила измеряется пьезоэлектрическим датчиком силы, который имеет постоянную времени  $25$  с.

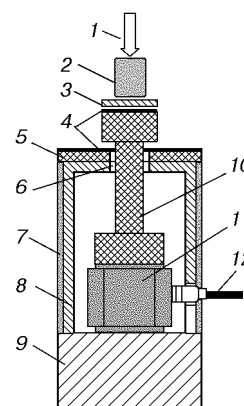


Рис. 3. Схема крепления образца и теплоизоляции датчика силы:

1 — лазерный пучок, 2 — образец, 3 — алюминиевая платформа, 4 — пластик, 5 — плексиглас, 6 — небольшой зазор, 7 — асбестовый экран, 8 — алюминиевый кожух, 9 — алюминиевое основание, 10 — плексигласовый пьедестал, 11 — пьезоэлектрический датчик, 12 — кабель

Образец твердого топлива приклеивается на алюминиевую платформу силиконовой смазкой. Платформа (рис. 3) используется для того, чтобы избежать повреждений плексигласовых компонентов установки горящими продуктами или тепловым потоком лазера. Пьезоэлектрический датчик силы с вертикальной чувствительной осью монтируется на массивном

основании, а образец располагается по отношению к чувствительной оси датчика так, что сила, приложенная к нему, является мгновенной суммой силы веса образца и реактивной силы. Сигналы силового и инфракрасного датчиков усиливаются, при этом обеспечивается чувствительность датчика силы  $3,2 \cdot 10^{-3}$  Н/В. Оба сигнала фильтруются при помощи аналогового фильтра низких частот, характеризующегося 8-полюсной функцией Бесселя, угловой частотой отсечки 2 кГц и постоянной групповой задержкой. Это позволяет исключить помехи, возникающие при цифровой фильтрации с недостаточно высокой частотой дискретизации, и добиться устранения высокочастотных шумов с минимальным искажением сигнала. Сигналы оцифровываются с тактовой частотой 10 кГц на двухканальном цифровом осциллографе с использованием 12-битового аналого-цифрового преобразователя и одновременно измеряются для сохранения фазовой связи между двумя сигналами. Данные сохраняются на диске для последующего анализа. Процесс горения записывается видеокamerой, что позволяет в последующем использовать видеозапись для контроля равномерности горения. Откалиброванная шкала и видеотаймер, совмещенные с кадрами горящего твердого топлива, дают возможность измерить среднюю скорость горения.

Для получения многократных точек измерений в единичном эксперименте поток теплового излучения модулировался на нескольких частотах. Обычно использовали два типа периодических воздействий: набор синусоид с возрастающей (уменьшающейся) частотой и псевдослучайные гармонические колебания. Набор синусоид получают при изменении частоты волны линейно со временем. Псевдослучайные периодические сигналы состоят исключительно из гармоник основной частоты. Это формирует дискретный спектр, удобный для последующего Фурье-анализа. Обычно гармоники в псевдослучайном сигнале имели равные амплитуды и случайную фазу, но конкретно используемые гармоники могут быть выбраны так, чтобы концентрировать большую часть энергии сигнала в некоторой ограниченной области интересующих частот. С использованием псевдослучайного периодического сигнала в одном эксперименте может быть получено до 40 точек частотных данных, в зависимости от величины отклика твердого топлива. Небольшой размер образца ( $\approx 0,7$  г) позволяет получать несколь-

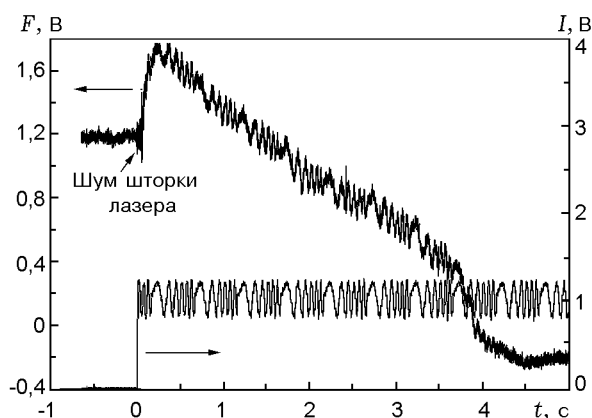


Рис. 4. Запись сигналов датчика силы и инфракрасного детектора с набором синусоид: твердое топливо AP18,  $\bar{I}_s = 135$  Вт/см<sup>2</sup>

ких сотен экспериментальных точек при наличии 10 г твердого топлива.

Подготовка эксперимента включает измерение и взвешивание образца твердого топлива, бронирование негорящей поверхности и прикрепление образца к алюминиевой платформе. Перед экспериментом в программу Labview вводятся средние значения лазерной энергии и амплитуды модуляции, основная частота лазерного сигнала, желательная временная зависимость потока теплового излучения и устанавливаются частота дискретизации и уровень запуска цифрового осциллографа. Эксперимент начинается в момент, когда открывается шторка лазера, вызывая зажигание образца потоком теплового излучения. При этом «акустически шумная» охлаждающая система лазера отключается. Для подготовки и проведения эксперимента требуется  $\approx 0,5$  ч, исключая время для бронировки боковой поверхности образца твердого топлива.

Сигналы реактивной силы и инфракрасного детектора, получаемые в типичном эксперименте, показаны на рис. 4. В момент времени  $t = 0$  шторка лазера открывается и поток излучения нагревает образец до тех пор, пока не произойдет зажигание. После зажигания среднее значение реактивной силы увеличивается и достигает максимума, когда устанавливается равновесное состояние горения. Затем в момент  $t = 0,4$  с начинается постоянный спад значений реактивной силы по мере уменьшения массы образца при постоянной скорости горения. В момент  $t = 4,5$  с образец твердого топлива сгорает полностью.

Запись сигнала реактивной силы в течение первых 0,5 с используется для количественной оценки общего уровня шумов, что будет обсуждаться в следующем параграфе. Шторка лазера сравнительно массивная, так как она должна выдержать действие полной энергии излучения. Следовательно, в момент открытия или закрытия шторки акустические шумы достаточно сильны и легко фиксируются датчиком как сильные колебания сигнала реактивной силы (около  $t = 0$ ). Описанные выше аппаратура и процедура измерений позволяют проводить оценку амплитуды и фазы отклика реактивной силы, генерируемой под действием излучения в воздушной среде при атмосферном давлении. Рабочий диапазон частот ограничен низкочастотными шумами и составляет  $10 \div 700$  Гц.

## 2. Обработка экспериментальных данных

Частотный отклик реактивной силы, генерируемой излучением, может быть представлен как частотный отклик системы «единичный вход — единичный выход», в которой реактивная сила представляет собой отклик системы (выход) на действие потока теплового излучения (вход). В рамках линейной инвариантной по времени системы оптимальная (метод наименьших квадратов) оценка функции частотного отклика системы  $\hat{H}(f)$  получается из отношения взаимного энергетического спектра сигналов реактивной силы и лазерного излучения  $\hat{S}_{xy}(f)$  к ожидаемому энергетическому спектру входа  $\hat{S}_{xx}(f)$  (см. [8, с. 165–185]):

$$\hat{H}(f) = \frac{\hat{S}_{xy}(f)}{\hat{S}_{xx}(f)}. \quad (2)$$

Оценка качества функции отклика может быть получена с помощью когерентной функции

$$\hat{\gamma}_{xy}^2(f) = \frac{|\hat{S}_{xy}(f)|^2}{\hat{S}_{xx}(f)\hat{S}_{yy}(f)}, \quad (3)$$

где  $\hat{S}_{yy}(f)$  — энергетический спектр выхода. Когерентная функция имеет максимальное значение, равное единице, при точной корреляции входа и выхода, значение меньше единицы — при частичной корреляции и нулевое значение — при полном отсутствии корреляции входа и выхода. Таким образом, когерентную

функцию можно использовать для отсеивания данных с плохим соотношением сигнал/шум.

Спектры, использованные в данных выше определениях, представляют собой средние значения взаимного энергетического и энергетических спектров, полученные по измерениям пар входного и выходного сигналов для последовательных периодов собственной частоты входного сигнала:

$$\hat{S}_{xy}(f) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_{xy}(f)_i, \quad (4)$$

$$\hat{S}_{xx}(f) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_{xx}(f)_i, \quad (5)$$

$$\hat{S}_{yy}(f) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_{yy}(f)_i. \quad (6)$$

Приведенные общие определения далее используются для нахождения частотного отклика генерируемой излучением реактивной силы и ее функции когерентности:

$$R_{fq}(f) = \frac{\hat{S}_{I_s F}(f)\bar{I}_s}{\hat{S}_{I_s I_s}(f)\bar{F}}, \quad (7)$$

$$\hat{\gamma}_{I_s F}^2(f) = \frac{[|\hat{S}_{I_s F}(f)|]^2}{\hat{S}_{I_s I_s}(f)\hat{S}_{FF}(f)}. \quad (8)$$

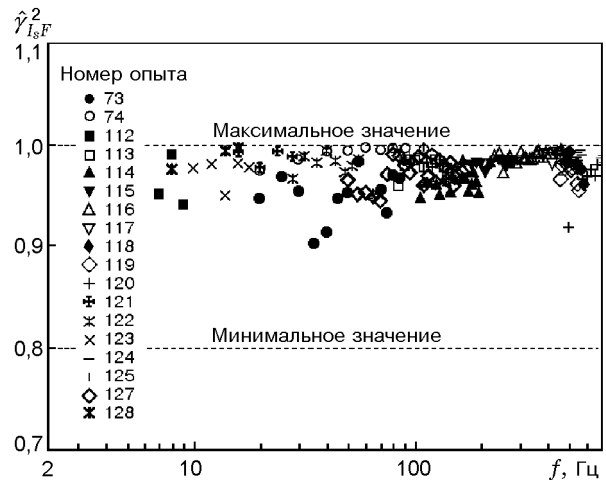


Рис. 5. Функция когерентности для топлива AP18 при  $\bar{I}_s = 80$  Вт/см<sup>2</sup>:

принятые минимальные значения когерентности для данных составляют 0,8, точки — данные различных опытов

При обработке данных частотные компоненты в функции отклика генерируемой излучением реактивной силы, имеющие значения  $\hat{\gamma}_{IsF}^2 < 0,8$ , не принимались во внимание, в то время как большая часть данных имела величину когерентности 0,95 и выше (рис. 5). Осреднение по ансамблю существенно понижает шумы, и лучшие результаты достигнуты в случаях, когда при обработке использовалось, по крайней мере, 10 периодов собственной частоты входного сигнала.

### 3. Анализ шумов

До применения методики понижения шумов существовал значительный разброс результатов при вычислениях частотного отклика генерированной излучением реактивной силы. Исследовался диапазон частот  $3 \div 200$  Гц. При более высоких значениях частот получено крайне мало экспериментальных точек вследствие повышенного уровня шумов. Уровень шумов при измерениях реактивной силы оказался намного выше, чем при измерении лазерного сигнала, поэтому исследование шумов было сконцентрировано на измерении силы. Зафиксированы следующие источники шумов и причины погрешностей:

- электрические наводки, связанные с заземлением источника питания,
- дрейф нуля датчика силы,
- вибрации пола,
- акустические и субакустические флуктуации давления, регистрируемые датчиком.

Проводился расчет двух характеристик шумов силового сигнала: корня среднего квадрата интенсивности шумов и энергетического спектра. Расчет обеих характеристик выполнен по начальной (0,5 с) записи невозмущенного сигнала, полученного непосредственно перед началом опыта. Предварительно средняя величина напряжения была вычтена из сигнала, после чего были вычислены среднеквадратичное значение и стандартное отклонение. Стандартные отклонения, измеренные в первых 12 опытах (перед сделанными изменениями в системе регистрации), изменялись в диапазоне  $60 \div 90$  мВ, соответствуя силе  $F = (2 \div 2,9) \cdot 10^{-4}$  Н. Осредненный по ансамблю энергетический спектр показан штриховой линией на рис. 6.

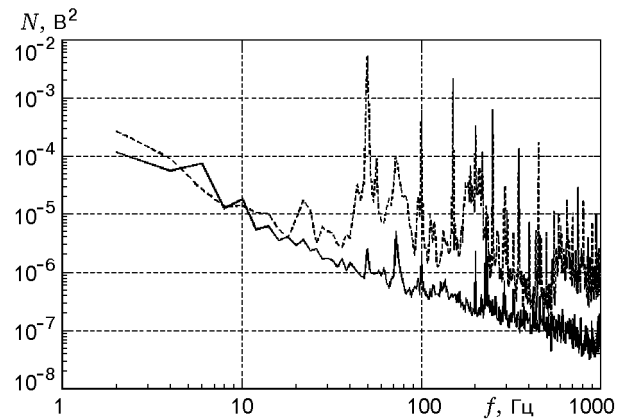


Рис. 6. Энергетический спектр шумов сигнала нулевой линии реактивной силы (без горения):

штриховая линия — первоначальный уровень шумов (среднее из 12 сигналов, частотное разрешение 2 Гц), сплошная линия — текущий уровень шумов (среднее из 25 сигналов, частотное разрешение 2 Гц)

Энергетический спектр холостого сигнала четко регистрирует пики на гармониках 50-герцовой линии энергии, что указывает на электрические наводки в линии питания. Большинство проблем, связанных с наводками, в значительной степени удалось решить после замены внутреннего источника питания датчика силы на батарею и введения оптической линии в цепь компьютерного управления энергией излучения лазера.

Пьезоэлектрический датчик силы чувствителен к температуре, и во время эксперимента его нулевой уровень значительно смещается вследствие температурных изменений в измерительной камере. Датчик силы был заключен в изолирующий алюминиевый кожух для исключения влияния конвекции и теплового излучения, что в значительной степени снижает, но не исключает полностью проблему дрейфа.

Широкая область шумов на частотах выше 40 Гц обусловлена главным образом вибрацией пола, передающейся датчику. Шумы в этом диапазоне частот сильно уменьшаются при помещении датчика силы на массивное основание (в данном эксперименте — крупный мраморный блок, установленный на четырех резиновых амортизаторах). Массивное основание наиболее эффективно при высоких частотах. При  $f < 5$  Гц вибрация передается полностью или с небольшим ослаблением.

Высокочувствительный датчик силы крайне восприимчив к акустическому и субакустическому давлению, что обнаружено

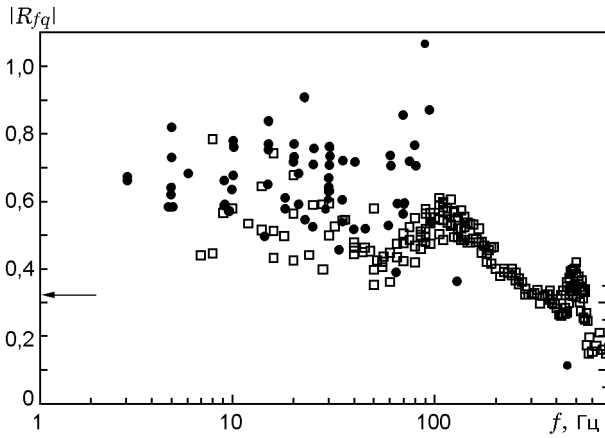


Рис. 7. Влияние шумов на измерение величины  $R_{fq}(f)$ :

• — первоначальный уровень шумов, □ — сниженный уровень шумов; топливо AP18,  $\bar{I}_s = 80 \text{ Вт/см}^2$ ; стрелкой показано значение  $R_{fq}(f) = 0,32$  при нулевой частоте

по возникновению шумов при открывании шторки лазера (см. рис. 4).

Измерение шумов перед началом эксперимента показало, что возникновение акустических шумов в лабораторном помещении связано с работой вакуумного насоса лазера, а также с внешними звуками, проходящими через стены и вентиляционные трубы. Воздействие акустического давления на датчик силы уменьшалось при окружении экспериментальной камеры полужесткими плексигласовыми стенками. Однако экспериментальная камера полностью не герметизировалась, поэтому низкочастотные субакустические колебания практически не испытывали затухания. Предполагается, что именно с субакустикой связаны остаточный дрейф датчика силы и низкочастотные шумы.

Измерение шумов проводилось по результатам 25 опытов, перед началом каждого были сделаны все вышеперечисленные операции. Стандартное отклонение, составлявшее 16 мВ ( $\approx 4,9 \cdot 10^{-4} \text{ Н}$ ), уменьшалось при этом в 4–5 раз. Осредненный энергетический спектр (сплошная линия на рис. 6) показывает, что наибольшее улучшение достигнуто на частотах выше 40 Гц. Энергия шумов уменьшается почти равномерно с увеличением частоты, что позволяет увеличить верхний предел диапазона частот для проведения измерений с 200 до 700 Гц. При  $f < 40 \text{ Гц}$  уменьшение шумов крайне незначительное.

Частотный отклик генерированной излучением реактивной силы определялся в экспериментах с твердыми топливами на основе ПХА при атмосферном давлении. Зависимость  $R_{fq}(f)$  показана на рис. 7. Эксперименты проводились как до, так и после модификации установки, выполненной с целью уменьшения уровня шумов. Разброс данных, полученных на установке после проведенных изменений, сильно уменьшился в диапазоне частот 40 ÷ 150 Гц, и уменьшение разброса наблюдалось вплоть до 700 Гц, где ранее измерения были невозможны. Разброс немного уменьшился и в диапазоне 20 ÷ 40 Гц, но ниже 20 Гц он остался практически одинаковым для обоих наборов данных.

#### 4. Анализ погрешностей

Относительную погрешность частотного отклика генерированной излучением реактивной силы (см. уравнение (7)), рассчитанную для одного периода основной вынуждающей частоты, можно вычислять на основе стандартных отклонений измеренных величин  $|\hat{S}_{I_s F}(f)|$ ,  $\hat{S}_{I_s I_s}(f)$ ,  $\bar{I}_s$ ,  $\bar{F}$ , полагая, что все они не скоррелированы:

$$\left(\frac{\sigma[|R_{fq}(f)|]}{|R_{fq}(f)|}\right)^2 = \left(\frac{\sigma[|\hat{S}_{I_s F}(f)|]}{|\hat{S}_{I_s F}(f)|}\right)^2 + \left(\frac{\sigma[\hat{S}_{I_s I_s}(f)]}{|\hat{S}_{I_s I_s}(f)|}\right)^2 + \left(\frac{\sigma[\bar{I}_s]}{\bar{I}_s}\right)^2 + \left(\frac{\sigma[\bar{F}]}{\bar{F}}\right)^2. \quad (9)$$

Хотя стандартные отклонения компонентов энергетического спектра широко изменяются с частотой, обычно используются следующие значения:

$$\frac{\sigma[|\hat{S}_{I_s F}(f)|]}{|\hat{S}_{I_s F}(f)|} = 0,2, \quad \frac{\sigma[\hat{S}_{I_s I_s}(f)]}{\hat{S}_{I_s I_s}(f)} = 0,01,$$

$$\frac{\sigma[\bar{I}_s]}{\bar{I}_s} = 0,05, \quad \frac{\sigma[\bar{F}]}{\bar{F}} = 0,17,$$

которые в итоге дают

$$\frac{\sigma[|R_{fq}(f)|]}{|R_{fq}(f)|} = 0,26. \quad (10)$$

Этот простой анализ показывает, что основным источником погрешностей в определении величины  $R_{fq}(f)$  служит неточность вычисления взаимного энергетического спектра

сигналов реактивной силы и лазерного излучения  $\hat{S}_{I_s F}(f)$ . Сравнительно небольшое стандартное отклонение значений  $\hat{S}_{I_s I_s}(f)$  показывает, что наибольшая погрешность возникает при измерениях реактивной силы.

Погрешность среднего значения  $R_{fq}(f)$  зависит от осреднения ансамбля, поскольку осреднение уменьшает погрешность  $|\hat{S}_{I_s F}(f)|$  и  $\hat{S}_{I_s I_s}(f)$  в  $1/\sqrt{N}$  раз, где  $N$  — число периодов основной частоты входа, на котором осредняется информация во время равновесного горения. Для примера, в эксперименте с топливом на основе ПХА (см. рис. 4) период установившегося горения составляет только 3,3 с, если исключить данные, соответствующие начальному и конечному переходным процессам. Данные по  $R_{fq}(f)$  при высоких частотах воздействия, скажем, свыше 100 Гц, были получены с использованием основной частоты на входе 10 Гц. Соответственно осреднение проводилось по 30 и более периодам, что дает погрешность среднего значения, равную 0,18. Однако при низких частотах основная частота входа составляла 1 Гц, и осреднение проводилось только по трем периодам, что дает погрешность среднего значения, равную 0,21. Это позволяет объяснить общую тенденцию разброса данных  $R_{fq}(f)$ , особенно при низких частотах.

Если разброс данных  $R_{fq}(f)$  обусловлен в основном остаточной погрешностью, вызванной шумами, то индивидуальные данные в ходе одного эксперимента должны иметь ощутимое отклонение от сглаженной кривой. Сглаженные кривые многочисленных опытов в этом случае должны быть сходными. Однако в общем случае этого не наблюдалось: разброс точек, полученных в ходе одного эксперимента, был невелик, а различие результатов, полученных в разных опытах, составляло значительную долю общего разброса. Это предполагает существование систематических погрешностей в процессе измерений.

Зависимость  $R_{fq}(f)$  после уменьшения шумов показана на рис. 7. Разброс данных для частот ниже 50 Гц слишком большой, чтобы четко обнаружить пик при низких частотах. Однако как величина  $R_{fq}(f)$ , превышающая значение при нулевой частоте ( $R_{fq}(f) = 0,32$ ), так и соответствующие данные по фазе предполагают существование пика при частоте  $f = 10$  Гц, как это предсказано теорией [9]. Тем не менее существуют два других пика данных — на частотах 100 и 500 Гц, которые не предсказаны теорией. Предварительные исследова-

ния [9] показывают, что пик при  $f = 100$  Гц, возможно, соответствует топливам на основе ПХА, однако пик при  $f = 500$  Гц обусловлен, вероятно, аппаратурой и не имеет отношения к твердому топливу.

Этот анализ возможных систематических погрешностей подсказывает, что необходимо сделать для того, чтобы оценить потенциальные причины экспериментальных ошибок.

Колебания реактивной силы, воздействующей на поверхность горения, вызывают вибрации не только датчика силы, но и всей опорной структуры — массивного основания и конструкции датчик силы/пьедестал/образец. Различные элементы опорной структуры могут вибрировать с большими амплитудами. Эти вибрации, в дополнение к реактивной силе, будут передаваться и фиксироваться датчиком. Дополнительные вибрации значительно искажают вычисления  $R_{fq}(f)$  в области собственных частот конструкции. Предположение, что этот механизм может быть ответственным за пик при  $f = 100$  Гц, тестировался с помощью регистрации отклика на ударное воздействие. Ударник использовался для ударов по образцу твердого топлива, закрепленного на конструкции датчик/пьедестал/массивное основание. Сигналы на входе (от ударника) и датчика силы (на выходе) фиксировались и использовались для вы-

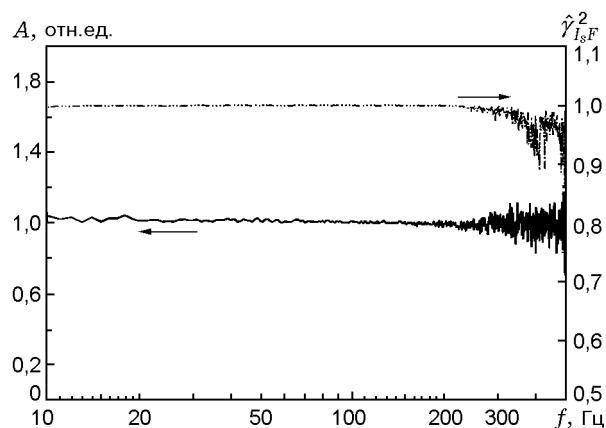


Рис. 8. Результаты ударного воздействия на конструкцию твердое топливо/пьедестал:

механический резонанс не фиксируется в диапазоне  $f = 10 \div 300$  Гц со значениями когерентности, очень близкими к 1; увеличение шумов и уменьшение когерентности при  $f > 300$  Гц происходит из-за очень малых величин возмущений датчика силы



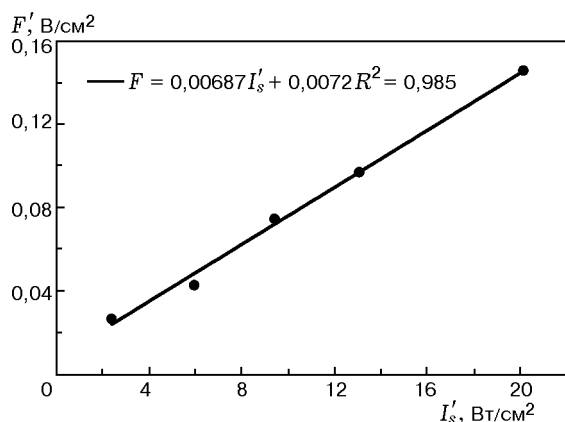


Рис. 9. Линейность отклика:

линейное соответствие между амплитудами колебаний реактивной силы  $F'$  и потока теплового излучения  $I'_s$  наблюдается при частоте синусоидальных колебаний 125 Гц; линейная интерполяция проведена без учета точки, соответствующей максимальной глубине модуляции; топливо AP18,  $\bar{I}_s = 80$  Вт/см<sup>2</sup>

числений частотного отклика структурной системы (рис. 8). Структурный резонанс не регистрируется в диапазоне  $f = 10 \div 300$  Гц. Частотные параметры удара контролируются выбором сменного наконечника ударника. Так как в это время интерес представлял пик на частоте 100 Гц, использовался ударник с мягким наконечником. Для опытов с пиком при  $f = 500$  Гц такой ударник не давал хороших результатов из-за малых амплитуд воздействия на высоких частотах. Тем не менее «ударные» тесты четко установили, что пик при  $f = 100$  Гц не связан с осевой модой структурного резонанса в силовой измерительной системе. В дальнейшем планируются «ударные» тесты с более высокими частотами и созданием поперечных мод колебаний.

В опытах с измерением зависимости  $R_{fq}(f)$  крайне небольшое значение реактивной силы заставляет использовать флуктуации теплового излучения, которые обычно не рассматриваются как очень малые. С другой стороны, требование небольших возмущений (по сравнению со средними величинами) должно выполняться, если изучается динамика линейного поведения. Поэтому у исследователей существует значительное беспокойство по поводу того, что такие модуляционные уровни сильно нарушают допущение о малых возмущениях и, соответственно, ведут к значительным нелинейным эффектам. В настоящее время принимается, что

нелинейные эффекты могут способствовать возникновению различий между опытами, когда уровень модуляции увеличивается (чтобы улучшить отношение сигнал/шум в некотором диапазоне частот). Ряд экспериментов с топливом AP18 проводился при среднем потоке 80 Вт/см<sup>2</sup>, изменяющемся по синусоидальному закону, с варьируемой амплитудой волны. Частоту устанавливали равной 125 Гц. При этом ожидалось, что более высокая амплитуда должна вызывать большие нелинейные эффекты. Значение реактивной силы, отнесенной к единице площади поверхности горения образца, показано на рис. 9. Хотя и существует некоторый разброс значений, реактивная сила строго пропорциональна величине входного сигнала при его модуляции в пределах  $2 \div 25$  %. Более того, значения отклика генерированной излучением реактивной силы, измеренные в этих экспериментах, оказались сравнимы с зарегистрированными в опытах с «бегущей» частотой (рис. 10). В обоих случаях отклонения от линейного поведения не зафиксировано, что подтверждает гипотезу о пренебрежимо малом нелинейном отклике топлива на основе ПХА на частоте 125 Гц даже при наиболее высокой глубине модуляции (25 %).

В используемой установке образец твердого топлива и датчик реактивной силы ориентированы по вертикальной оси, поэтому измерялась сумма реактивной силы и мгновенного значения веса образца. Значение веса исключалось при обработке результатов с помощью подбора наклона нулевой линии во время установившегося горения. Наклон соответствует средней массовой скорости горения в предположении существования плоской поверхности горения. Средняя скорость горения, оцененная таким способом, имеет стандартное отклонение  $\approx 15$  %. Средняя реактивная сила  $\bar{F}$ , использовавшаяся для вычисления всех данных по  $R_{fq}(f)$  в одном опыте, определялась экстраполяцией среднего наклона к нулевому моменту времени. Разброс между опытами имел стандартное отклонение  $\approx 17$  %, поэтому кажется вполне вероятным, что первопричиной разброса  $R_{fq}(f)$  является разброс значений  $\bar{F}$ .

Эксперименты по горению облучаемых лазером образцов регистрировались с помощью видеосъемки с большим увеличением для определения линейной скорости горения. Видеозапись показывает, что поверхность горения не плоская. Она имеет вогнутую форму, и ее во-

гнутость ощутимо увеличивается со временем. Это может служить объяснением, почему наклон нулевой линии постепенно отклоняется от прямой линии, как это видно на рис. 4. Вогнутая поверхность горения и ее изменение со временем почти определенно обусловлены гауссовским распределением излучения по поперечному сечению пучка. Это служит также причиной того, что средняя мощность излучения, попадающего на образец, отличается от мощности, регистрируемой инфракрасным датчиком, коэффициентом, соответствующим интегралу от интенсивности излучения по облучаемой поверхности. Подобным образом осевая компонента локальной реактивной силы уменьшается пропорционально косинусу угла наклона локального участка поверхности горения. При этом среднее значение реактивной силы на единицу площади сечения образца отличается от ожидаемой средней нормальной компоненты реактивной силы на величину коэффициента, определяемого теперь интегрированием косинусов по поверхности образца.

В то время как измерение интенсивности излучения и сигнала реактивной силы в некоторый момент времени соответствуют осредненным величинам при эффективной неплоской (вогнутой) поверхности горения, среднее значение величины реактивной силы  $\bar{F}$  при расчете  $R_{fq}(f)$  соответствует исходной плоской поверхности образца. Таким образом, при построении отношения флуктуаций потока излучения к его средней величине коэффициент неоднородности интенсивности излучения по пучку учитывается автоматически, а для отношения флуктуаций реактивной силы к ее среднему значению этого не происходит. Поскольку в разных экспериментах не удается одинаково совмещать направления осей датчика силы и образца топлива, вариации величины реактивной силы привносятся в результаты расчета  $R_{fq}(f)$ . Хотя могут действовать и другие факторы, такие как неоднородность состава топлива или догорание газов (благодаря кислородсодержащей среде), можно полагать, что неоднородность интенсивности излучения, ошибки установки образца, регулировка и анализ данных являются основным механизмом, посредством которого вариации  $\bar{F}$  вызывают разброс величин  $R_{fq}(f)$ . Планируемые изменения в аппаратуре и методиках обработки данных включают установку интегратора лазерного луча, с тем чтобы уменьшить ради-

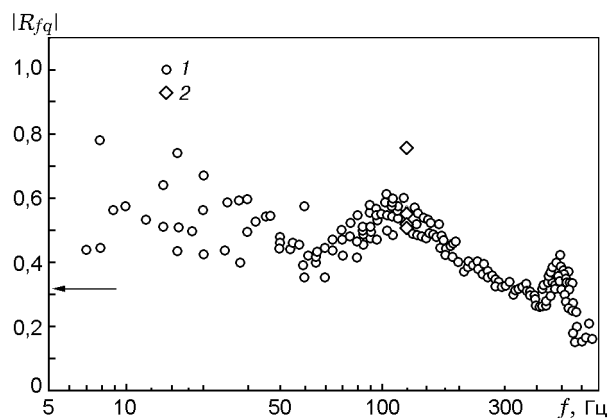


Рис. 10. Сравнение результатов экспериментов в режимах постоянной частоты колебаний 125 Гц и набора синусоид с монотонно изменяющейся частотой:

глубина модуляции при постоянной частоте колебаний изменялась в пяти сериях от 2,5 до 25 %; топливо AP18,  $\bar{I}_s = 80$  Вт/см<sup>2</sup>; 1 — режим набора синусоид; 2 — синусоидальный режим с частотой 125 Гц; стрелкой показано значение  $R_{fq}(f) = 0,32$  при нулевой частоте

альный градиент интенсивности, точное совмещение осей луча и образца и обработку временных вариаций при обработке экспериментальных данных.

Расположение датчика и образца по вертикальной оси привносит неустранимую потенциальную погрешность из-за флуктуаций скорости изменения массы образца. При вертикальном расположении нестационарная компонента измеренной силы представляет собой сумму изменяющейся реактивной силы и изменяющегося веса образца. Последнее происходит из-за флуктуаций скорости горения. Как результат, измеренная флуктуация общей силы  $R'$ , действующей на датчик, слегка больше флуктуаций реактивной силы  $F'$  и отстает от них по фазе. Погрешности амплитуды и фазы количественно определяются следующими отношениями [10]:

$$\left| \frac{R'}{F'} \right| = \sqrt{1 + \left( \frac{1}{s} \frac{\bar{m}}{\bar{F}} \frac{g_0 A_b}{2\pi f} \right)^2}, \quad (11)$$

$$\varphi = \arctg \left( - \frac{1}{s} \frac{\bar{m}}{\bar{F}} \frac{g_0}{2\pi f} \right), \quad (12)$$

(где  $\bar{m}$  — средняя массовая скорость горения,  $g_0$  — ускорение силы тяжести,  $A_b$  — площадь поверхности горения), которые можно использовать и для получения истинной амплитуды и фазы отставания силы  $F'$ . Параметр  $s$  явля-

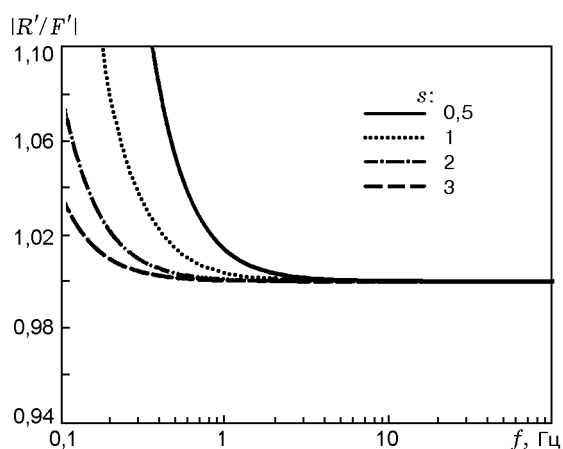


Рис. 11. Отношение измеряемых и теоретических значений колебаний реактивной силы:

наблюдается отклонение от единицы на низких частотах из-за колебаний потери массы, оно увеличивается при небольших значениях  $s$ , т. е. при слабой зависимости реактивной силы от массовой скорости горения

ется показателем степени в общем уравнении реактивной силы

$$F = km^s. \tag{13}$$

Полученные [11, 12] значения  $s$  лежат в диапазоне  $0,8 \div 2,3$ . На рис. 11 показаны результаты расчетов по уравнению (11) в параметрической форме ( $s = 0,5; 1; 2; 3$ ) с использованием значений других переменных, типичных для экспериментов с топливом AP18 в воздушной среде и при атмосферном давлении при  $I_s = 80 \text{ Вт/см}^2$ :

$$A_b = 0,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2, \quad \bar{F} = 0,25 \cdot 10^{-2} \text{ Н},$$

$$\bar{m} = \rho_c \bar{r}_b = 2,67 \text{ кг/(см}^2 \cdot \text{с)},$$

где  $\rho_c$  — плотность конденсированной фазы,  $\text{г/см}^3$ ,  $r_b$  — скорость горения,  $\text{см/с}$ .

Вычисленное значение  $s$  для AP18 составило 0,96, поэтому для расчетов можно использовать (с небольшой погрешностью) кривую  $s = 1$ . При частоте флуктуаций потока излучения 1 Гц погрешность измерения реактивной силы меньше 1 %, а запаздывание по фазе  $\approx 5^\circ$ . Для всего тестируемого частотного диапазона погрешность не превышает 0,1 %, что не влияет существенно на разброс экспериментальных данных по  $R_{fq}(f)$ . Представленные данные не скорректированы по этой погрешности. Погрешность можно полностью исключить, расположив образец и датчик силы по горизонтальной оси, и это изменение предполагается осуществить с целью улучшения методики.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проблемы погрешностей и шумов исследовались в рамках программы, направленной на улучшение качества и расширение диапазона измерений реактивной силы, генерированной излучением лазера. Хотя исследование велось только в одной специфической постановке и затруднялось низкочастотными шумами и дрейфом пьезоэлектрического датчика силы, возникшие проблемы погрешностей и шумов являются, по-видимому, общими и имеют отношение к другим постановкам.

Вибрации конструкции монтажного основания датчика силы и локальные акустические шумы являются источниками шумов при измерениях реактивной силы. Электрические наводки в оборудовании вызывают появление инструментальных шумов при измерениях силы и теплового излучения. Тепловой дрейф оказался основным источником низкочастотного дрейфа сигнала датчика силы.

Шумы в измерениях реактивной силы были уменьшены в пять раз благодаря следующим действиям.

1. Датчик силы был установлен на массивном основании для изоляции от вибрации пола.
2. Датчик и массивное основание помещены в жесткий плексигласовый корпус для изоляции от внешних акустических шумов.
3. Датчик и пьедестал образца заключены в теплоизолирующий экран для изоляции от конвективного, кондуктивного и радиационного теплообмена.
4. Источник питания датчика силы заменен на батарею, и введена оптическая линия в цепь компьютерного управления энергией излучения лазера.

Снижение уровня шумов реализовано в основном на частотах выше 40 Гц. Это значительно улучшило соотношение сигнал/шум при высоких частотах, расширив границы используемого диапазона частот с 200 до 700 Гц. Удалось добиться небольшого снижения на частотах менее 40 Гц, где шумы представляют значительную проблему. В дальнейшем эта работа будет продолжена для того, в частности, чтобы оценить роль локальной акустики и низкочастотных вариаций давления.

После улучшения ситуации с шумами наибольший вклад в разброс значений  $R_{fq}(f)$  принадлежал разбросу результатов повторяющихся опытов, а не данных, полученных в единичном опыте. Причина этой систематической погрешности пока объясняется совместным влиянием градиентов интенсивности лазерного пучка, которые невозможно полностью учесть, и соответствующих временных изменений в тестовой настройке, а также несовершенством методик анализа данных. Запланированы включение в установку интегратора луча, чтобы уменьшить градиенты по сечению пучка, а также тщательная переработка методик обработки данных для минимизации эффектов временных и пространственных вариаций.

Один из двух вторичных пиков в полученных зависимостях  $R_{fq}(f)$  связан, по-видимому, с конструкцией датчика силы, а не с характерной частотой тепловой релаксации твердого топлива, которая служит целью таких исследований. Обнаруженная чувствительность реактивной силы к действию механических и акустических возмущений предполагает, что вторичный пик может быть результатом взаимодействия механической и/или акустической мод экспериментальной установки и внешней среды. В дальнейших исследованиях планируется изучить эти эффекты.

Проведена оценка некоторых других возможных причин шумов. По большей части они невелики по сравнению с наблюдавшимися уровнями шумов и погрешностей, но будут, вероятно, становиться более значимыми по мере того, как будут снижаться уже рассмотренные уровни. Среди других результатов особый интерес вызывает обнаруженный в опытах линейный отклик реактивной силы при действии на образец топлива теплового потока с модуляцией амплитуды до 25 %.

Авторы благодарят Министерство научных исследований и технологии за поддержку большей части этой исследовательской работы, проф. Л. Т. Де Луку и проф. В. Е. Зарко за полезные дискуссии и А. Нардиноччи за предоставление некоторых результатов экспериментальных исследований.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Mihlfeith C. M., Baer A. D., and Ryan N. W.** Combustion instability as measured by combustion recoil // *AIAA Journal*. 1972. V. 10, N 10. P. 1280–1285.
2. **Mikheev V. F., Zarko V. E., Borin S. M. et al.** Measurement of burning rates in transient combustion processes under the influence of external radiation // *Progress in Astronautics and Aeronautics*; V. 63. Washington: AIAA, 1978. P. 173–187.
3. **Zarko V. E., Simonenko V. N., and Kiskin A. B.** Nonstationary combustion of condensed substances subjected to radiation // *Combust. Explosion and Shock Waves*. 1987. V. 23, N 5. P. 521–530.
4. **Zarko V. E., Simonenko V. N., and Kiskin A. B.** Radiation driven transient burning: Experimental results // *Progress in Astronautics and Aeronautics*; V. 143, ch. 10. Washington: AIAA, 1992. P. 363–398.
5. **Finlinson J. C., Hanson-Parr D., Son S. F., and Brewster M. Q.** Measurement of propellant combustion response to sinusoidal radiant heat flux // *AIAA Paper N 91-0204*. 1991.
6. **Brewster M. Q., Hites M. H., and Son S. F.** Dynamic burning rate measurements of metalized composite propellants using the laser-recoil technique // *Combust. Flame*. 1993. V. 94. P. 178–190.
7. **Finlinson J. C.** Laser recoil response of HMX, RDX, N5 GAP/BTTN and others from 1 to 6 atm // *AIAA Paper N 97-0698*. 1997.
8. **Bendat J. S. and Piersol A. G.** *Random Data. Analysis and Measurement Procedures*. Second edition. New York: Wiley, 1986.
9. **Cozzi F., Balasini A., De Luca L., and Hessler R. O.** Solid propellant combustion stability by laser radiation modulation // Paper presented at the AVT/RTO Meeting on Small Rocket Motors and Gas Generators for Land, Sea and Air Launched Weapon Systems, Corfu, Greece, 19–23 April 1999.
10. **Cozzi F.** Pirolisi e combustione di propellenti solidi sottoposti a radiazione laser // Dipartimento di Energetica, Dottorato in Energetica, Politecnico di Milano. Milan, 1997.
11. **Son S. F.** The unsteady combustion of radiant heat flux driven energetic solids // *Mechanical Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign*. Urbana, 1993.
12. **Kiskin A. B., Volpe E., and De Luca L. T.** Verifying the recoil force vs burning rate dependence // Paper presented at the Intern. Workshop on Measurement of Thermophysical and Ballistic Properties of Energetic Materials, Politecnico di Milano. Milano, Italy, 22–24 June 1998.

Поступила в редакцию 29/VII 1999 г.