

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА РЕГИСТРАЦИИ РЕАКТИВНОЙ СИЛЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ НЕСТАЦИОНАРНОЙ СКОРОСТИ ГОРЕНИЯ

А. Б. Кискин, В. Н. Симоненко

Институт химической кинетики и горения СО РАН, 630090 Новосибирск

При горении конденсированных веществ возникает реактивная сила оттекающих от поверхности горения продуктов газификации. Она непосредственно связана с мгновенной массовой скоростью горения. Обсуждается специфика регистрации реактивной силы с помощью датчиков различного типа. Анализируется влияние таких факторов, как аппаратные искажения, переменность параметров внешней среды и неоднородность горения. Делается вывод о предпочтительном использовании методики регистрации реактивной силы для измерения скорости горения с помощью предварительной экспериментальной градуировки и визуального контроля.

Измерение нестационарной скорости горения является актуальной задачей диагностики горения. Во-первых, потому что нестационарные процессы дают информацию, отсутствующую в стационарных экспериментах. Во-вторых, до сих пор не существует универсального метода непосредственного измерения скорости горения. Большая часть методик регистрирует положение поверхности горения либо некоего интегрального параметра, связанного с поверхностью горения и ее структурой. Таковыми являются методы фото-кино-видео-регистрации, рентгеноскопии, микроволновый и ультразвуковой методы и метод измерения массы. Детальный обзор способов измерения дан в работах [1–3]. Можно также отметить метод оптической интерферометрии, позволяющий измерять массу газообразных продуктов при зажигании конденсированных веществ [4] и механический импульс струи [5], которые связаны с массовой скоростью горения. Кроме индивидуальных ограничений указанные методики имеют общий недостаток — необходимо дифференцировать данные, чтобы получить скорость горения. Дифференцирование зашумленного сигнала снижает точность измерения, не уменьшает уровень шумов и не расширяет частотный диапазон измерений. Еще одним недостатком большинства из перечисленных методов является искажение сигнала вследствие изменения характеристик к-фазы при прогреве приповерхностного слоя вещества.

В отличие от названных способов измерения метод регистрации реактивной силы от-

текающих от поверхности горения газофазных продуктов позволяет измерять величину, непосредственно связанную с массовой скоростью горения вещества. На наш взгляд, именно массовая скорость горения является наиболее корректной характеристикой выгорания, особенно при неплоской поверхности газификации.

Цель данной работы заключается в комплексном изложении проблем, связанных с определением нестационарной скорости горения посредством измерения реактивной силы. Приводятся количественные оценки факторов, влияющих на величину регистрируемого сигнала. Формулируются условия организации эксперимента, позволяющие получать корректные данные.

Впервые данным методом с помощью микрофонного датчика нестационарные характеристики процесса горения получены в работе [6]. Однако этот способ не позволил регистрировать постоянную составляющую сигнала. Дальнейшее развитие методика получила в работах [7, 8], где использовался специальный датчик конденсаторного типа, прообразом которого послужило устройство определения убыли веса [9].

В настоящее время для регистрации реактивной силы применяют два методических принципа измерения малых усилий в диапазоне $0,01 \div 5$ г (именно таковыми являются типичные масштабы в лабораторных экспериментах). В соответствии с одним из них образец закрепляется на упругой подвеске и регистрируется ее перемещение (с помощью трех типов датчиков: конденсаторный, индуктивный и оп-

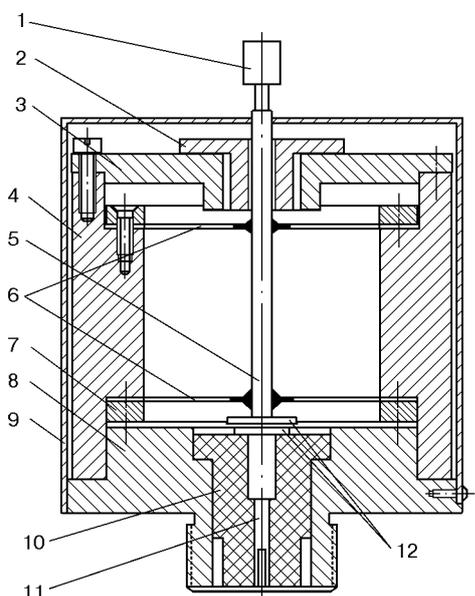


Рис. 1. Схема датчика реактивной силы:

1 — образец топлива; 2 — втулка для жидкостного демпфирования; 3 — фланец; 4 — корпус; 5 — подвижный стержень; 6 — мембраны; 7 — прижимное кольцо; 8 — фланец; 9 — защитный экран; 10 — втулка-изолятор; 11 — соединительный электрод; 12 — пластины конденсатора

тический). В соответствии с другой методикой образец жестко связан с измерительным элементом (пьезодатчиком).

В лаборатории горения конденсированных систем Института химической кинетики и горения СО РАН разрабатываются и используются датчики первого типа. Особенности измерения реактивной силы с помощью этих датчиков и будут обсуждаться ниже. Многие из излагаемого применимо также к датчикам второго типа.

Базовая конструкция (рис. 1) состоит из стержня, подвешенного на двух мембранах, и собственно датчика-измерителя перемещения стержня. В зазор между втулкой и подвижным стержнем может помещаться вязкая жидкость для демпфирования колебаний датчика. При горизонтальных ориентациях датчика и направления движения фронта горения под действием реактивной силы происходит смещение стержня с закрепленной на нем пластиной конденсатора, что приводит к изменению емкости конденсатора, либо индуктивности, либо длины оптического пути в зависимости от типа используемого датчика перемещения. При вер-

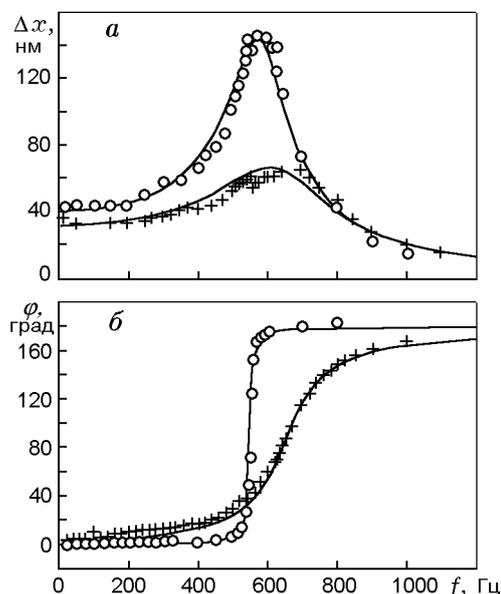


Рис. 2. Амплитудно-частотная (а) и фазочастотная (б) характеристики датчика реактивной силы:

эксперимент: \circ — слабое демпфирование, $+$ — сильное; сплошные линии — аналитическая аппроксимация по уравнению (1)

тикальной ориентации датчика можно регистрировать убыль веса образца (горизонтальное перемещение волны горения) либо суммарный сигнал реактивной силы и веса (волна горения движется сверху вниз). Заметим, что при вертикальной ориентации датчика необходимо иметь широкий динамический диапазон измеряемых усилий, так как изменение веса образца может составлять несколько граммов.

Рассмотрим основные факторы, влияющие на качество измерения скорости горения посредством датчика реактивной силы:

- аппаратные искажения,
- техногенный фактор,
- переменность параметров внешней среды,
- неоднородность горения.

Аппаратурные источники ошибок определяются уровнем собственных шумов электронного тракта преобразователя и усилителя сигнала и дискретностью АЦП при цифровой регистрации. Искажения регистрируемого сигнала возникают также в случае, когда частотный спектр реактивной силы шире полосы пропускания датчика. Конструкция датчика такова,

что он обладает конечной полосой пропускания. Математическая модель датчика, описывающая движение стержня массой M с закрепленным и горящим на нем образцом топлива массой $m(t)$, дается уравнением

$$-[M + m(t)]x''(t) - \beta x'(t) + kx(t) = F(t), \quad (1)$$

где F — реактивная сила, x — смещение стержня от равновесного состояния, t — время, k — коэффициент упругости мембран, β — коэффициент вязкого трения. Аналогично линейной колебательной системе датчик имеет собственную частоту, выше которой компоненты спектра реактивной силы значительно ослабляются (рис. 2,а) и появляется сдвиг фазы φ (рис. 2,б). Представленные на рис. 2 экспериментальные характеристики при разных степенях демпфирования датчика аппроксимированы аналитическим решением уравнения (1) при постоянном значении массы $M+m$ (данные предоставлены В. В. Карасевым и Д. В. Вдовиным). На рис. 3 приведен пример отклика (реакции) датчика в случае импульсного воздействия в процессе горения гексогена. Зажигание осуществлялось с помощью излучения лазера мощностью $q(t)$. При горении гексоген плавится и на поверхности расплавленного слоя происходит вскрытие газовых пузырей, что приводит к пульсациям реактивной силы и отклику датчика реактивной силы на частоте резонанса механической системы $f \approx 600$ Гц. Фотодиод показывает, что колебания светимости пламени при этом отсутствуют. С ростом давления p амплитуда отклика и, следовательно, воздействия уменьшается, и при $p > 4$ атм высокочастотные колебания уже не регистрируются.

Особенность конструкции измерительного элемента заключается в том, что он воспринимает усилия, действующие только вдоль оси подвижного стержня. Таким образом, если образец установлен под углом γ к оси датчика либо течение газов не является одномерным и результирующий вектор реактивной силы направлен под углом γ к оси датчика, регистрируемый сигнал будет в $1/\cos \gamma$ раз меньше полной реактивной силы, создаваемой при горении образца. Таким образом, для правильной интерпретации экспериментальных результатов необходимо вести видеоконтроль опытов с целью отбора корректных данных.

Техногенное влияние окружающей среды проявляется в виде электромагнитных наводок с частотой 50 и 100 Гц, а также в виде импульсных наводок по сети электропитания при ра-

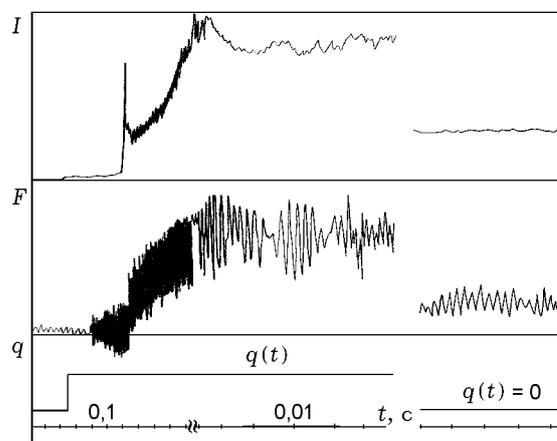


Рис. 3. Сигналы датчика реактивной силы и фотодатчика светимости пламени (I) при горении гексогена

боте мощных импульсных лазеров либо иных устройств, работающих на территории лабораторного здания. Еще один техногенный фактор — вибрации здания, создаваемые проезжающим автотранспортом и другими установками в здании. С учетом вышеперечисленного реальный динамический диапазон регистрации реактивной силы составляет 64 дБ при типичном уровне шумов, эквивалентном усилению в 3 мГ.

Влияние внешней среды проявляется в нагреве датчика излучением, а также в изменении температуры и состава окружающего газа либо давления. Защитой от излучения (пламени, лазер и т. д.) служит металлический экран (см. рис. 1). При проведении экспериментов в замкнутом объеме горение топлива приводит к изменению давления, температуры и состава окружающей датчик газовой среды. Поскольку внутренняя полость датчика свободно сообщается с внешней средой, каждый из перечисленных факторов влияет на диэлектрическую постоянную газа, находящегося между пластинами конденсатора (см. рис. 1).

Диэлектрическая постоянная ϵ определяется количеством молекул в единице объема и их типом:

$$\frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} = \frac{4\pi}{3} N \left(\alpha + \frac{\mu^2}{3kT} \right).$$

Здесь $N = p/kT$ — число молекул в единице объема, k — постоянная Больцмана, α — электронная поляризуемость, μ — дипольный момент (отличен от нуля только для полярных газов). Диэлектрическая проницаемость газов

близка к единице. Величина $(\varepsilon - 1)$ при $p = 1 \div 100$ атм изменяется в диапазоне $6 \cdot 10^{-4} \div 6 \cdot 10^{-2}$. Оценки показывают, что при проведении экспериментов в двухлитровой бомбе с образцами топлива весом 1 г изменение ε не превышает $3 \cdot 10^{-4}$, в то же время относительное изменение емкости измерительного конденсатора при типичном усилии 300 мВ составляет $5 \cdot 10^{-3}$. Таким образом, смещение сигнала за счет увеличения ε может составлять всего несколько процентов от уровня реактивной силы.

Изменение магнитной проницаемости газов как минимум на порядок слабее, чем изменение ε . За счет этого свойства и конструктивных особенностей датчик реактивной силы на индуктивном принципе значительно менее чувствителен к изменениям параметров среды.

Применявшийся оптический способ измерения перемещения стержня датчика реактивной силы основан на изменении фазы между монохроматическим излучением (длина волны 1,2 мкм) опорного источника и отраженным сигналом от торца подвижного стержня. При этом, поскольку путь излучения проходит через газовый зазор между источником и отражающей поверхностью, изменение фазы чувствительно к параметрам газовой среды. Величина изменения фазы за счет увеличения плотности газов при сжигании 1 г топлива в двухлитровой бомбе постоянного объема эквивалентна усилению 100 мВ, сопоставимому с сигналом реактивной силы при горении топлива. При этом воздушный зазор между источником излучения и торцом подвижного стержня того же размера, что и в конденсаторном датчике. По-видимому, переход к дифференциальной схеме измерения и уменьшение воздушного зазора могут существенно улучшить качество регистрации оптическим методом.

Кроме изменения ε влияние температуры окружающей среды проявляется также в неравномерном нагреве элементов датчика, что приводит к микродеформациям его корпуса и упругих элементов. Именно это воздействие оказывается наиболее существенным при проведении экспериментов по горению в замкнутом объеме. Результатом такого воздействия является смещение уровня сигнала по мере прогрева датчика. Величина смещения сравнима с амплитудой регистрируемого сигнала. Высокая чувствительность датчика реактивной силы к деформациям обусловлена тем, что рабочий ход стержня составляет доли микро-

метра. В последних разработках эти факторы были учтены, и датчик получил защиту от внешнего теплового воздействия.

Ошибки интерпретации. Кроме аппаратурных ошибок измерения реактивной силы существуют факторы, связанные с отличиями закономерностей распространения реального фронта горения от одномерного. Их также необходимо учитывать для правильной интерпретации регистрируемого сигнала.

В микромасштабе это неоднородность реагирования на поверхности горения, особенно в случае смесевых топлив. Влияние микроструктурных процессов на сигнал реактивной силы может проявляться в виде относительно высокочастотных (для процесса горения) шумов.

В макромасштабе неоднородность реагирования по поверхности (очаговое горение) создает нестационарный вклад в реактивную силу за счет переменности площади газификации. Следовательно, для получения равномерного характера сигнала реактивной силы необходимо использовать образцы с максимальной возможной площадью сечения для большей степени усреднения.

Неплоская, модифицирующаяся во времени поверхность горения также вносит нестационарность в поведение реактивной силы. Возможен вариант, когда при неоднородном зажигании поверхность горения может быть плоской, двигаться с постоянной скоростью и постоянным углом наклона θ к оси образца. В этом случае при использовании несгорающей бронировки реактивная сила будет в $1/\sin \theta$ раз больше за счет увеличения поверхности горения.

Собственно связь массовой скорости горения с реактивной силой $F(t)$ оттекающих от поверхности топлива продуктов газификации в предположении одномерности течения невязкого газа и в пренебрежении массовыми силами дается (после интегрирования уравнений сохранения массы и импульса) соотношениями

$$F(t) = \left(\rho(L, t)v^2(L, t) - \rho c u^2(t) + p(L, t) - p_\infty + \int_0^L \frac{\partial \rho(x, t)v(x, t)}{\partial t} dx \right) S, \quad (2)$$

$$m'(t) = \rho c u(t) = \rho(L, t)v(L, t) + \int_0^L \frac{\partial \rho(x, t)}{\partial t} dx, \quad (3)$$

$$\rho = \frac{p\mu}{RT}. \quad (4)$$

Здесь ρ и ρ_c — плотности газа и к-фазы, v — скорость движения газа, u — скорость горения, t — время, x — пространственная координата с началом, совмещенным с поверхностью горения, L — расстояние от поверхности горения, p — давление, p_∞ — давление окружающей среды, S — площадь сечения образца топлива, μ — средняя молярная масса газа, R — универсальная газовая постоянная.

В обычных условиях второй член в скобках уравнения (2) пренебрежимо мал по сравнению с первым и его не учитывают, однако при увеличении давления окружающей среды до 100 атм его вклад может достигать 2–3 %.

В нестационарных экспериментах для вычисления $F(t)$ требуется знать распределение по пространству плотности и скорости газа, чтобы рассчитать интеграл в (2). Однако если ограничиться достаточно медленно меняющимися режимами горения, при которых можно пренебречь изменением потока массы $\rho(x, t)v(x, t)$ по координате x в интервале от нуля до L , то

$$F(t) = \left(\frac{m'(t)^2}{\rho(L, t)} + L \frac{d}{dt}(m'(t)) + p(L, t) - p_\infty \right) S, \quad (5)$$

где $m'(t) = \rho_c u(t) = \rho(x, t)v(x, t)$. Для применимости соотношения (5) нужно, чтобы расстояние L было много меньше дистанции, проходимой газом за характерное время изменения режима горения, т. е.

$$L \ll \frac{\bar{m}'}{\bar{\rho}} \Delta t, \quad (6)$$

где Δt — характерное время изменения процесса горения, а чертой сверху обозначены средние значения.

На практике с целью организации одномерного течения газообразных продуктов газификации и предотвращения распространения пламени по боковой поверхности образец топлива покрывают несгорающей бронировкой, как правило, в виде трубки. Обычно длина трубки L выбирается такой, чтобы быть больше области протекания газофазных реакций. В этом случае давление на срезе трубки можно принять равным давлению окружающей среды. Если расстояние от поверхности горения топлива до места, где температура пламени стабилизируется, превышает длину охранной

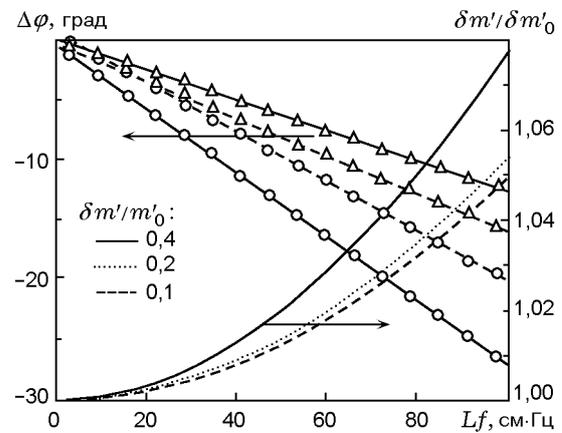


Рис. 4. Сдвиг фазы $\Delta\phi$ сигнала реактивной силы относительно скорости горения при различных глубинах модуляции, определяемой по положению точек максимума (Δ) и минимума (\circ) отклика. Отношение амплитуды отклика скорости горения $\delta m'$, рассчитанной по величине реактивной силы без учета охранной трубки, к истинной амплитуде $\delta m'_0$ при различных глубинах модуляции

трубки, сигнал реактивной силы будет меняться в соответствии с изменением температуры, так как плотность газа на срезе трубки определяется уравнением состояния (4). В области, где плотность газа непостоянна, изменяется и давление, т. е. $p(L, t)$ отлично от p_∞ . Строго говоря, в этом случае реальное течение двумерно и давление будет переменным по сечению торца охранной трубки.

Ниже приведены примеры того, как влияет член с производной в выражении (5) на величину реактивной силы в случае гармонического изменения скорости горения. Считается, что охранная трубка достаточно длинная и заканчивается в области стабилизации газофазных параметров. Из соотношения (6) следует ограничение на величину $Lf \leq 100$ см·Гц при $\Delta t = 1/f$, где f — частота колебаний. Было принято, что знак «много меньше» (6) означает отличие на порядок, а $\bar{m}'/\bar{\rho} = 1000$ см/с. На рис. 4 показано, насколько возрастет амплитуда колебаний скорости горения $\delta m'$, рассчитанная по величине реактивной силы без учета влияния охранной трубки, по сравнению с истинной $\delta m'_0$. Отметим, что с увеличением L появляется сдвиг фазы между экстремумами скорости горения и реактивной силы, различный для точек минимума и максимума отклика (см. рис. 4). В работе [10] приведен эксперимен-

тальный пример возрастания амплитуды колебаний с увеличением длины трубки по мере выгорания образца топлива.

Побочным эффектом применения несгорающей бронировки являются теплотери в охранную трубку. Теплотери меняются во время эксперимента: максимальны в начале, сразу же после зажигания, затем уменьшаются с последующей стабилизацией или замедляющимся снижением в зависимости от материала бронировки и скорости горения топлива. В некоторых случаях теплотери могут достигать 8 % от суммарного тепловыделения при горении, и их снижению способствует увеличение диаметра образца. Отказ от несгорающей бронировки приводит к отсутствию вышеописанных нестационарных эффектов. При этом в уравнении (5) в качестве p , v и ρ нужно использовать давление, скорость и плотность газа в точке сразу же над поверхностью горения, в противном случае необходимы более совершенные решения, учитывающие расходимость газофазного течения.

Модернизация выражений (2) и (5) необходима и при наличии диспергирования, что особенно актуально при горении смесевых металлизированных топлив.

Альтернативным получению детализированного решения является метод градуировки. Суть метода заключается в построении экспериментальной зависимости $F(u)$ в стационарных условиях и последующем ее использовании при обработке нестационарных экспериментов. Полученную градуировочную зависимость следует применять для тех же внешних условий и способов воздействия на процесс горения, при которых она была определена. Например, в [11] для аппроксимации использовалась зависимость в виде

$$F(m) = \text{const} \cdot (m')^n.$$

Для порохов Н и Н + 1 % РbО $n = 2$, однако для пороха Н с добавкой 1 % сажи значение $n = 2$ справедливо только в экспериментах, где скорость горения варьируется за счет давления. В случае использования излучения ксеноновой лампы $n = 1,6$. В работе [8] высказано предположение, что уменьшение значения n обусловлено диспергированием к-фазы, и для учета этого явления была предложена аппроксимация в виде соотношения

$$F = (1 - \eta) \frac{(m')^2}{\rho},$$

где η — степень диспергирования. Отличный от $n = 2$ показатель получен и в [12], где для изменения скорости горения баллистических порохов и смесевых перхлоратных топлив использовалось излучение CO₂- и Nd:YAG-лазеров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из вышеприведенного анализа следует, что при использовании реактивной силы для регистрации нестационарной скорости горения наиболее оптимальным является метод экспериментальной градуировки. При этом необходимо снижать удельные теплотери из газовой фазы как за счет выбора максимально допустимого сечения образца, при котором можно обеспечить инициирование и распространение плоского фронта горения, так и за счет выбора материала несгорающей бронировки либо отказа от нее и использования в качестве защиты боковой поверхности образца материалов, выгорающих (газифицирующихся) вместе с поверхностью топлива. Заметим, что увеличение сечения образца приводит не только к снижению удельных теплотерей, но и к усреднению неоднородности горения по поверхности и повышению отношения сигнал/шум. Желательно контролировать оптически или иным методом качество поверхности горения с целью отбора результативных опытов. Для расширения частотного диапазона измерений необходимо обрабатывать регистрируемый сигнал с учетом характеристик измерительной системы (1) и нестационарного члена в (5). Необходимо принимать специальные меры для защиты датчика от вибрационного фона, а также теплового воздействия со стороны оборудования и продуктов горения топлив, поскольку эти факторы существенно влияют на качество регистрируемого сигнала. Перечисленные меры способствуют однозначности интерпретации сигнала реактивной силы. В заключение отметим, что для получения временных характеристик, таких как задержка зажигания, время горения, частота колебаний или сдвиг фазы, необходимость в градуировке отпадает. Таким образом, при выполнении вышеописанных мер по организации эксперимента метод регистрации реактивной силы может эффективно использоваться для измерения нестационарных характеристик скорости горения.

Авторы выражают благодарность В. Е. Зарко и Л. К. Гусаченко за участие в обсуждении материалов статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Похил П. Ф., Мальцев В. М., Зайцев В. М. Методы исследования процессов горения и детонации. М.: Наука, 1969.
2. **Experimental Diagnostics in Combustion of Solids** / T. L. Bogs and B. T. Zinn (Eds). Progress in Astronautics and Aeronautics; V. 63. New York: AIAA, 1978.
3. **Zarko V. E. and Kuo K. K.** Critical review of methods for regression rate measurements of condensed phase systems // *Non-Intrusive Combustion Diagnostics* / K. K. Kuo and T. P. Parr (Eds). New York: Begell House, 1994. P. 600–623.
4. **Абруков В. С., Мальцев В. М.** Новые возможности применения метода интерферометрии для исследования процесса зажигания и горения конденсированных систем // *Хим. физика*. 1983. № 5. С. 675–682.
5. **Пун S. V., Abrukov S. A., Abrukov V. S.** Tomographic reconstruction velocity and pressure fields of ignition and explosion gas flows based on interferometry measurements // *Non-Intrusive Combustion Diagnostics* / K. K. Kuo and T. P. Parr (Eds). New York: Begell House, 1994. P. 294–298.
6. **Mihlfeith C. M., Baer A. D., Ryan N. W.** Propellant combustion instability as measured by combustion recoil // *AIAA Journal*. 1972. V. 10, N 10. P. 1280–1285.
7. **Михеев В. Ф., Борин С. М.** Измерение массовой скорости твердых ВВ // *Физика горения и взрыва*. 1973. Т. 9, № 2. С. 327–329.
8. **Mikheev V. F., Zarko V. E., Borin S. M. et al.** Measurements of burning rates in transient combustion processes under the influence of external radiation // *Experimental Diagnostics in Combustion of Solids*. Progress in Astronautics and Aeronautics; V. 63. New York: AIAA, 1978. P. 173–187.
9. **Худяков А. В., Говард Г. В., Конев Е. В., Михеев В. Ф.** К вопросу об измерении массовой скорости горения твердых ВВ // *Физика горения и взрыва*. 1967. Т. 3, № 2. С. 462–464.
10. **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.
11. **Симоненко В. Н., Зарко В. Е.** Реактивная сила продуктов сгорания как мера нестационарной скорости горения пороха // *Физика горения и взрыва*. 1981. Т. 17, № 3. С. 129–132.
12. **Son S. F.** The unsteady combustion of radiant heat flux driven energetic solids: Ph. D. Thesis. Urbana, 1994.

Поступила в редакцию 2/VII 1999 г.