

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

**РЕАКТИВНАЯ СИЛА ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ
КАК МЕРА НЕСТАЦИОНАРНОЙ СКОРОСТИ
ГОРЕНИЯ ПОРОХА**

В. Н. Симоненко, В. Е. Зарко
(Новосибирск)

Большинство известных в настоящее время способов измерения нестационарной скорости горения основано на регистрации интегральных характеристик (текущей длины, веса, массы образца), временное дифференцирование которых дает значение скорости горения [1—5]. Для корректного дифференцирования электрического сигнала на коротких отрезках времени необходимо с высокой относительной точностью ($\sim 10^{-4}$ — 10^{-5}) измерять упомянутые величины, что представляет весьма сложную техническую проблему. Поэтому существующими методами до сих пор удавалось исследовать лишь сравнительно медленные переходные процессы ($\Delta t \sim 0,1$ с).

Методика измерения скорости горения с помощью регистрации реактивной силы продуктов сгорания позволяет значительно расширить временной диапазон изучаемых нестационарных явлений за счет исключения операции дифференцирования измеряемого сигнала, поскольку величина реактивной силы непосредственно связана со значением массовой скорости горения.

В работе [6] названным методом проведено изучение отклика скорости горения пороха на периодические возмущения внешнего потока излучения. При этом, однако, регистрировалась лишь переменная составляющая сигнала. Измерение полного сигнала реактивной силы несет более ценную информацию [7, 8] и дает возможность проследить за ходом изменения скорости горения во время нестационарных процессов при зажигании, переходе с одного режима на другой, погасании и т. п.

В настоящем сообщении дано описание экспериментальной процедуры измерения реактивной силы и обоснование нового метода регистрации нестационарной скорости горения.

Экспериментальное определение связи между скоростью горения и реактивной силой проводилось на образцах порохов II, Н с добавкой 1% сажи (Н+1% С) и Н с добавкой 1% окиси свинца (Н+кат.). Средняя скорость горения в стационарном режиме определялась по времени прожжения фронтом центральной части составного образца (длина вставки 4 мм). Время измерялось по показаниям термопар, наклеенных на торцы центральной вставки. Диаметр образцов варьировался от 8 до 16 мм. При этом величина реактивной силы, отнесенной к единице площади сечения образца, оставалась неизменной. Большинство измерений выполнено на образцах диаметром 10 мм.

Реактивная сила, действующая на поверхность горения, обусловлена переходом конденсированного вещества в газообразное состояние и последующим разогревом продуктов сгорания до максимальной температуры. Чтобы исключить влияние внешней среды и получить одномерную картину истечения продуктов сгорания, образцы бронировались тонкой оболочкой из слюды, первоначально выступающей за срез поверхности пороха на 2—3 мм. При таком снаряжении образца после выхода скорости горения на стационарный режим сразу достигался постоянный уровень сигнала реактивной силы, так как максимальная температура в газе при горении изученных составов реализуется на более близких расстояниях от поверхности пороха [9].

Величина реактивной силы F измерялась с помощью датчика силы [3] и усреднялась по данным нескольких экспериментов. Уровень скорости горения u задавался вариацией величины светового потока при постоянном (атмосферном) давлении либо вариацией внешнего давления.

На рис. 1 приведены экспериментальные данные для различных порохов и построена расчетная зависимость $F(u)$ по стационарному соотношению

$$F = RT/\rho M \cdot (\rho u)^2 S. \quad (4)$$

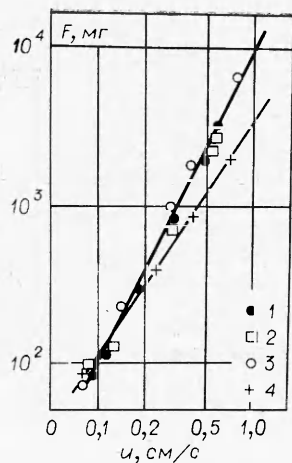


Рис. 1. Зависимость реактивной силы от скорости горения для порохов.

1 — Н; 2 — Н+1% С; 3 — Н+кат. при $p > 1$ атм; 4 — Н+1% С при $p = 1$ атм.

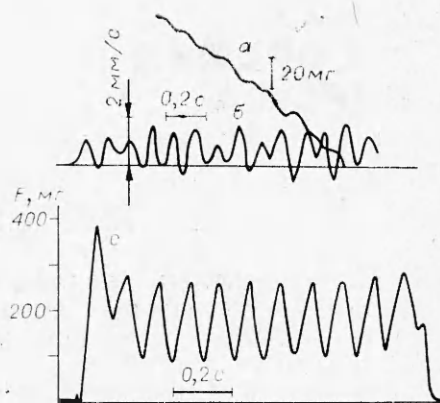


Рис. 2. Типичный вид осциллограммы при горении на воздухе пороха Н+кат. под воздействием внешнего периодически изменяющегося светового потока при $T_0 = 100^\circ\text{C}$.

а) сигнал убыви веса; б) производная сигнала убыви веса; в) сигнал реактивной силы.

Здесь R — универсальная газовая постоянная; T — максимальная температура газа; p — давление; M — средний молекулярный вес продуктов сгорания; ρ — плотность пороха; S — площадь поверхности горения.

Расчетная прямая на рис. 1 проведена для условного состава с параметрами $T = 1300$ К, $M = 25$ г/моль [10], давление равно атмосферному, $S = 0,78$ см². Пересчет экспериментальных значений реактивной силы, измеренных при повышенных давлениях, на значение силы при атмосферном давлении производится по уравнению (1) с использованием опытных данных по максимальным температурам и молекулярному весу продуктов сгорания.

Из рис. 1 видно, что данные для порохов Н и Н+1% С при повышенных давлениях и для пороха Н+кат. при атмосферном и повышенном давлениях хорошо согласуются с теоретической зависимостью для условного состава. Данные для непрозрачного пороха Н+1% С при $p = 1$ атм для случая, когда уровень скорости горения повышался за счет действия потока излучения, укладываются на зависимость $F \sim u^{1,6}$. Отличие показателя в степенной зависимости от теоретического значения может быть обусловлено совместным влиянием ряда неучтенных при выводе (1) факторов — увеличением степени диспергирования, которая в режиме самоподдерживающегося горения при $p = 1$ атм пренебрежимо мала по величине [11], изменением молекулярного веса газов за счет повышения относительного содержания летучих в продуктах сгорания.

Обоснование способа измерения нестационарной скорости горения с помощью регистрации реактивной силы продуктов сгорания следует из феноменологической теории горения Я. Б. Зельдовича [12] и дополнительных экспериментальных проверок. Известно [12], что при умеренных давлениях релаксационные процессы в газовой фазе происходят значительно быстрее (примерно на 2 порядка), чем в конденсированной. Следовательно, при некоторых характерных длительностях переходных процессов газовая фаза находится в квазистационарном состоянии по отношению к конденсированной, и динамическому изменению параметров на поверхности пороха будет соответствовать набор стационарных параметров по газовой фазе. Поскольку реактивная сила продуктов сгорания функционально связана со скоростью горения, текущие значения реактивной силы должны служить мерой нестационарной скорости горения. При проведении конкретных измерений необходимо, однако, потребовать, чтобы характерные времена изучаемых переходных процессов превосходили по величине времена релаксации газового пламени.

Прямым свидетельством корректности предлагаемого способа измерений могло бы стать сравнение экспериментальных данных по параллельным измерениям нестационарной скорости горения независимыми методами, однако недостаток технических средств не позволяет полностью выполнить эту задачу. На рис. 2 в качестве примера приведены записи сигналов убыви веса образца и реактивной силы при периодическом воздействии потока излучения на горящую поверхность. Можно отме-

тять, что при неплохом качественном соответствии кривых сигнала реактивной силы и производной сигнала убыли веса, последняя содержит также ложную информацию (например, участки с «отрицательной» скоростью горения), появление которой обусловлено совместным влиянием вибраций, шумов и отклонений вектора реактивной силы на первичный сигнал убыли веса образца. Более объективным будет сопоставление результатов измерений реактивной силы и текущей массы горящего образца, однако для его осуществления требуется проводить соответствующие методические разработки.

Ценную информацию в плане проверки основного положения феноменологической теории (квазистационарность газовой фазы) дают наблюдения за характером изменения максимальной температуры в газе при периодическом возмущении с частотой 5—50 Гц поверхности горения полупрозрачного пороха Н+кат. лучистым потоком интенсивностью 5—8 кал/(см²·с). Измерениями с помощью экранированных от излучения тонких термопар установлено, что температура в газе при этом колеблется в тех же самых пределах (2—3% от среднего уровня), как и при действии эквивалентных по мощности стационарных потоков излучения. Учитывая, что при заданном давлении среды молекулярный вес продуктов сгорания очень слабо изменяется при вариации скорости горения [13], имеющиеся экспериментальные данные можно рассматривать как доказательство правомерности использования стационарной градуировки реактивной силы для интерпретации данных по нестационарной скорости горения.

В заключение оценим возможные методические погрешности предложенного способа измерения нестационарной скорости горения. Согласно закону сохранения импульса количества движения, в нестационарном случае для реактивной силы имеет выражение [14]

$$F/S = RT/pM \cdot (\rho u)^2 + l \cdot d/dt \cdot (\rho u). \quad (2)$$

Второе слагаемое в правой части (2) характеризует нестационарную составляющую сигнала измеряемой силы, которая зависит от длины l колеблющегося столба газа и величины производной от массовой скорости горения по времени. В частном случае, когда ρu изменяется по закону $\rho u = (\rho u)_0(1 + L \sin 2\pi ft)$, относительная величина нестационарной добавки к уровню реактивной силы находится из выражения (в максимуме)

$$\beta_{\max} = l \frac{d}{dt} \frac{\rho u}{RT/pM} (\rho u)^2 = \frac{2\pi f L l p M}{(\rho u)_0 RT}.$$

При $f = 100$ Гц, $l = 0,5$ см, $(\rho u) = 0,16$ г/(см²·с), $p = 1$ атм, $M = 25$, $T = 1300$ К $\beta_{\max} = 0,4$ L. Следовательно, при 10% модуляции скорости горения с частотой 100 Гц нестационарная составляющая реактивной силы достигает 4% величины среднего уровня.

Потери кинетической энергии потока на трение в описанных условиях эксперимента (скорость потока газа не превышает 3—8 м/с, длина трубки 0,5 см, диаметр 1 см) составляют 1—2% и сопоставимы с точностью измерения величины реактивной силы. Пренебрежимо малы также тепловые потери из ядра газового потока.

Таким образом, можно заключить, что с помощью регистрации реактивной силы продуктов сгорания можно достаточно надежно, используя только стационарные градуировочные кривые, измерять скорость горения нитроглицериновых порохов в переходных процессах с характерными временами не менее 0,01 с. При изучении более коротких процессов для перевода значений реактивной силы в скорость горения необходимо учитывать нестационарную составляющую по соотношению (2).

Поступила в редакцию
17/VII 1979,
после доработки
23/X 1980

ЛИТЕРАТУРА

1. С. Е. Hermance, С. F. Yin. AIAA Paper, 1971, 173.
2. L. D. Strand, R. P. McNamara. Progress in Astronautics and Aeronautics. Vol. 63, N. Y., 1978, p. 155.
3. В. Ф. Михеев, С. М. Борин. ФГВ, 1973, 9, 2.
4. О. Я. Романов, В. С. Тархов, Г. Г. Шелухин. ФГВ, 1977, 13, 6.
5. В. Д. Кочаков, А. Э. Аверсон, С. А. Аbruков. ФГВ, 1978, 14, 1.
6. Милфис, Баер, Райан. РТК, 1972, 10, 10.
7. В. Е. Зарко, В. Н. Симоненко, К. П. Кученогий. ФГВ, 1975, 11, 4.
8. V. F. Mikhayev, V. E. Zarko et al. Progress in Astronautics and Aeronautics. Vol. 63, N. Y., 1978, p. 173.
9. К. К. Андреев. Термическое разложение и горение взрывчатых веществ. М., Наука, 1966.

10. А. И. Григорьев. Твердые ракетные топлива. М., Химия, 1969.
11. В. Е. Зарко, В. Я. Зырянов и др. Горение конденсированных систем. V симпозиум по горению, Черноголовка, 1977.
12. Я. Б. Зельдович. ЖЭТФ, 1942, 12, 11—12.
13. П. Ф. Похил. Докт. дис. М., ИХФ АН СССР, 1953.
14. Я. М. Шапиро, Г. О. Мазинг, Н. Е. Прудников. Основы проектирования ракет на твердом топливе. М., Машиностроение, 1968.

О ГОРЕНИИ КАЛЬЦИЯ В НЕКОТОРЫХ ПИРОТЕХНИЧЕСКИХ СМЕСЯХ

Г. В. Иванов, К. Ю. Мухамеджанов, В. М. Амосов,
Л. Р. Иванова

(Томск)

Закономерности горения кальция в пиросмесях до настоящего времени не изучались, хотя он широко используется в пиromеталлургическом производстве ряда цветных и редких металлов как восстановитель и в этом качестве часто незаменим [1]. Причина состоит, по-видимому, в том, что в промышленности всегда использовали его только в виде крупных кусков или стружки. Однако в настоящее время стали актуальными задачи изучения пиromеталлургических процессов с позиции горения и СВС.

В данной работе после многочисленных попыток получения порошка кальция различными методами (измельчение при температурах жидкого азота, плазменное распыление и др.) найден простой и производительный способ его получения в достаточных количествах, и стало возможным изучение закономерностей его горения в типичных пиросмесях. Суть способа — интенсивное виброистерание кусков кальция в модифицированной шаровой мельнице, заполненной аргоном. В качестве исходного материала брался кусковой кальций Черкасского завода химреактивов МРТУ-95-123-69. После отделения от шаров порошок рассевали обычным способом на нужные фракции в боксе, заполненном аргоном, в нем же проводили все последующие операции со смесями, в данных экспериментах использовались фракции 250 мкм.

Исследования горения кальция проводили со смесями KNO_3 , KClO_4 , как наиболее часто используемые в пиротехнике, и с Fe_2O_3 как окисла, реакция которого с алюминием и магнием наиболее хорошо изучена. Дисперсность всех окислителей — менее 50 мкм. Стехиометрические смеси запрессовывались в плексигласовые трубки с внутренним диаметром 7 мм до относительных плотностей 0,6—0,9. Сжигание производилось в бомбе постоянного давления Б-150, давление создавалось аргоном, скорость горения регистрировалась фоторегистратором ФР-11.

Полученные результаты представлены на рис. 1, из которого видно, что для всех изученных смесей характерны скорости, значительно более высокие, чем у аналогичных смесей с другими металлами. Так как теплоты и температуры горения кальция не выше, чем у алюминия и магния, то повышенная скорость горения объясняется, очевидно, высокими скоростями его реакции с кислородом и большим тепловыделением в единицу времени.

Действительно [2], химическая активность кальция уникальна: он реагирует с водородом при 150°C, с кислородом при 200°C и даже с азотом при 350°C. Насыпной порошок кальция при воспламенении на воздухе сгорает весьма интенсивно, практически с хлопком. С точки зрения пиротехники необычно и сгорание кальция в промышленных реакторах в виде крупных кусков. Определение температуры вспышки смесей кальция с указанными выше окислителями показало, что она четко определяется температурой разложения окислителей: при 350°C смесь кальция не вспыхивала ни с одним из окислителей, при 470°C задержка вспышки с KNO_3 составляла 90 с, с KClO_4 — 30 с, с Fe_2O_3 — вспышки нет, при 630°C смесь $4\text{Ca} + \text{KClO}_4$ вспыхивает мгновенно, смесь с KNO_3 — с задержкой 12 с, смесь с Fe_2O_3 не вспыхивает и до воспламенения ее можно довести при температуре около 800°C.

Вид зависимости $u = f(p)$ для всех трех смесей достаточно типичен.

Зависимость $u = f(p)$ для смеси с KClO_4 линейная (см. рис. 1). Поскольку кальций — легкоокисляющийся металл, а KClO_4 при разложении выше 600°C выделяет кислород, то ведущей стадией может быть сгорание паров кальция в кислороде, скорость которого прямо пропорциональна давлению. Обратная зависимость скорости горения от плотности (рис. 2) указывает на важную роль процессов, протекающих в порах образца.