

ЛИТЕРАТУРА

1. Денисюк А. П., Марголин А. Д., Токарев Н. П. и др. ФГВ, 1977, 13, 4, 576.
2. Серебряков М. Е. Внутренняя баллистика ствольных систем и пороховых ракет.— М.: Оборонгиз, 1962.
3. Патент 4072546 США. Применение графитовых элементов для увеличения скорости горения ТРТ.
4. Лосев С. А. Газодипламические лазеры.— М.: Наука, 1977.
5. Мальцев В. М., Мальцев М. И., Кашпоров Л. Я. Основные характеристики горения.— М.: Химия, 1977.
6. Зенин А. А. ПМТФ, 1963, 5, 125.
7. Конкин А. А. Углеродные и другие жаростойкие волокнистые материалы.— М.: Химия, 1974.
8. Лавров Н. В., Коробов В. В., Филиппова В. Н. Термодинамика реакций газификации и синтеза из газов.— М.: Изд-во АН СССР, 1960.
9. Уокер Ф., Русинко Ф., Остин Г. Реакции углерода с газами.— М.: ИЛ, 1963.
10. Зенин А. А. // Физические процессы при горении и взрыве.— М.: Атомиздат, 1980.
11. Хитрин Л. Н. Физика горения и взрыва.— М.: Изд-во МГУ, 1957.
12. Лавров Н. В. Физико-химические основы процесса горения топлива.— М.: Наука, 1971.
13. Fenimore C. P. J. Am. Chem. Soc., 1947, 69, 12, 3143.

Поступила в редакцию 14/IX 1987,
после доработки — 10/V 1988

УДК 536.46

О МЕХАНИЗМЕ ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ЭРОЗИИ ПРИ ГОРЕНИИ ТВЕРДЫХ ТОПЛИВ

В. К. Булгаков, А. М. Липанов, В. Н. Вилюнов, А. И. Карпов
(Хабаровск—Москва)

В работе [1] при экспериментальном исследовании влияния обдувающего потока на скорость горения баллистического пороха Н обнаружено явление отрицательной эрозии, т. е. уменьшение скорости горения при обдуве поверхности. В ответ на существовавшее мнение о том, что эффект отрицательной эрозии есть следствие систематической погрешности эксперимента, а не реальное физическое явление, в [2] решающим экспериментом непосредственно подтверждена отрицательная эрозия при горении порохов. К настоящему времени высказано несколько гипотез, объясняющих отрицательную эрозию [1, 3]. Ниже приводятся результаты численного эксперимента, теоретически подтверждающие механизм отрицательной эрозии, аналогичный предложенному в [3].

Физическая суть новой гипотезы состоит в следующем. Отрицательная эрозия не связана с турбулентностью. При обдуве поверхности горения пороха увеличивается поперечная составляющая скорость в волне горения газовой фазы, т. е. по отношению к нормальному горению повышается эффект конвекции в газовой фазе. Это приводит к оттеснению зоны реакций в газовой фазе от поверхности топлива, к растяжению температурного профиля и как результат — к уменьшению теплового потока в топливо, а следовательно, к снижению скорости горения.

Численный эксперимент, подтверждающий описанный механизм отрицательной эрозии, состоял в следующем. На базе полных уравнений Навье — Стокса рассчитывалось горение топлива в плоском канале, образованном поверхностями горения. Необходимость решения такой задачи (более сложной по сравнению с методикой расчета на базе уравнений пограничного слоя [4]) объясняется возможностью более корректно рассмотреть процессы, протекающие в окрестности входного сечения канала, где отрицательная эрозия проявляется наиболее сильно.

Постановка задачи использует следующие допущения: 1) химические реакции в газовой фазе описываются одной брутто-реакцией;

2) теплофизические характеристики исходного реагента и конечного продукта одинаковы; 3) рассматривается ламинарный режим течения. Математическая модель задачи имеет вид

$$\begin{aligned} \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{4}{3} \frac{\partial}{\partial x} \mu \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \mu \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x} \mu \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \mu \frac{\partial v}{\partial x}, \\ \rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{4}{3} \frac{\partial}{\partial y} \mu \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \mu \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial p}{\partial y} - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial y} \mu \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \mu \frac{\partial u}{\partial y}, \quad (1) \\ \rho u \frac{\partial T}{\partial x} + \rho v \frac{\partial T}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial x} \frac{\lambda}{c_p} \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \frac{\lambda}{c_p} \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{Q}{c_p} \rho W, \\ \rho u \frac{\partial a}{\partial x} + \rho v \frac{\partial a}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \frac{\text{Le} \lambda}{c_p} \frac{\partial a}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \frac{\text{Le} \lambda}{c_p} \frac{\partial a}{\partial y} - \rho W, \\ \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} = 0, \\ p = \rho RT. \end{aligned}$$

Здесь x, y — система координат, связанная с поверхностью горения; u, v — составляющие скорости в направлениях x, y ; T — температура; a — концентрация; μ, λ, c_p, ρ — динамическая вязкость, теплопроводность, теплоемкость, плотность газа; $W = a^n k_0 \exp(-E_a/R_0 T)$, Q — скорость и тепловой эффект химической реакции.

Граничные условия для течения в канале шириной $2h$, образованного двумя горящими поверхностями:

- 1) ось симметрии ($y = h$): $v = 0, \frac{\partial}{\partial y} = 0$ для u, T, a ;
- 2) входная граница ($x = 0$): $v = 0$;

$$u = \begin{cases} u_0 \left[1 - \left(\frac{\delta - y}{\delta} \right)^2 \right] & \text{при } 0 < y < \delta, \\ u_0 & \text{при } \delta \leq y \leq h: \end{cases}$$

профили $T(y), a(y)$ соответствуют распределению при нормальном горении, рассчитанные по методике [4];

- 3) выходная граница ($x = L$): $\frac{\partial}{\partial x} = 0$;
- 4) поверхность горения ($y = 0$): $u = 0, \rho v = \rho_K v_K$,

$$\begin{aligned} \rho u a - \frac{\text{Le} \lambda}{c_p} \frac{\partial a}{\partial y} = \rho_K v_K, \\ \lambda \frac{\partial T}{\partial y} = \rho_K v_K (c_p T_s - Q_K - c_K T_0). \end{aligned}$$

Отметим, что при постановке граничных условий во входном сечении предполагается нормальное горение с соответствующими распределениями $T(y), a(y), v(y)$, которые известны из решения задачи о нормальном горении. Для задания профиля поперечной скорости в сечении $x = 0$ можно использовать различные распределения $v(y)$ — либо профиль, соответствующий нормальному горению $\rho v = \rho_K v_K$, либо специально подобранный профиль, удовлетворяющий граничному условию $v = 0$ на оси симметрии канала. Численные исследования показали, что результаты расчета практически не зависят от вида задаваемого профиля $v(y)$. Поэтому одним из вариантов граничного условия на входе может быть рассмотренное выше распределение $v(y) = 0$. Линейная скорость горения топлива определялась по формуле

$$v_K = K_v \exp(-E_v/2R_0 T_s).$$

Здесь u_0 — скорость набегающего потока; δ — толщина пограничного слоя на входе в канал; T_0 — начальная температура топлива; T_s — температура поверхности горения.

Система уравнений (1) решалась численно, на базе алгоритма SIMPLE [5]. Коэффициент эрозии определялся следующим образом:

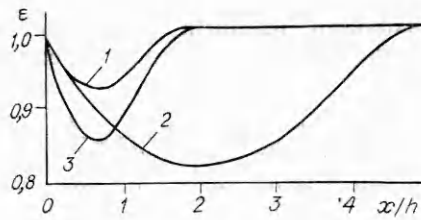


Рис. 1.

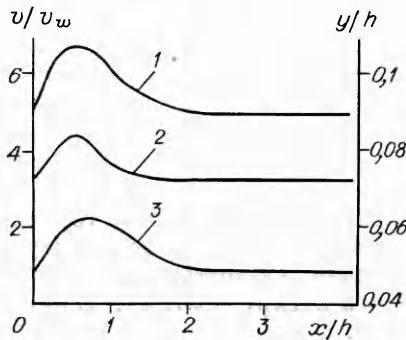


Рис. 3.

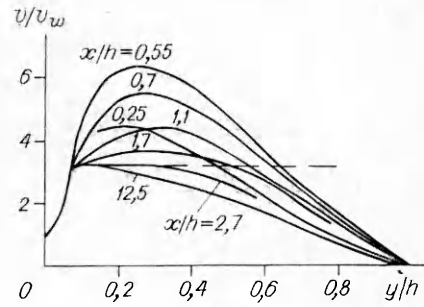


Рис. 2.

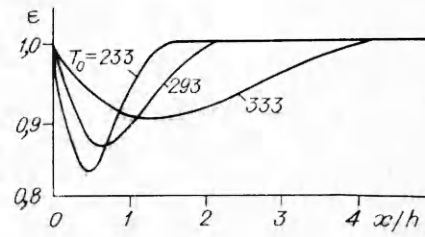


Рис. 4.

$\epsilon = v_{\kappa}/v_{\kappa}^0$, v_{κ} — скорость горения, полученная из решения системы (1); v_{κ}^0 — скорость горения в нормальных условиях (без обдува поверхности горения).

Расчеты проводились для баллиститного пороха Н, теплофизические характеристики которого имели следующие значения: газовая фаза — $c_p = 1466,5$ Дж/(кг·К); $\lambda = 0,9$ Вт/(м·К); $p = 10^7$ Н/м²; $Q = 2435300$ Дж/кг; $k_0 = 10^{10}$ с⁻¹; $E_a = 186107$ Дж/моль; конденсированная фаза — $c_{\kappa} = 1465$ Дж/(кг·К); $\rho_{\kappa} = 1600$ кг/м³; $Q_{\kappa} = 556800$ Дж/кг; $K_v = 8,46$ м/с; $E_{\kappa} = 79733$ Дж/моль.

Рассмотрим результаты расчетов. На рис. 1, 3 представлена зависимость коэффициента эрозии вдоль поверхности горения при толщине пограничного слоя на входе в канал $\delta/h = 0,25$, числе Рейнольдса на входе $Re_0 = \rho_0 h / \mu = 450$ и начальной температуре топлива $T_0 = 293$ К. Кривая 3 на участке стабилизации течения ($x/h \leq 2$) описывает отрицательную эрозию. Рассмотрим влияние параметров обдувающего потока на эрозионный эффект. Увеличение Re_0 (кривая 2 соответствует $Re_0 = 2200$) приводит к увеличению эрозионного эффекта и расстояния, на котором отрицательная эрозия имеет место ($x/h \leq 5$). Возрастание δ/h (для рис. 1, 3 $\delta/h = 0,5$) приводит к обратному эффекту — уменьшению отрицательной эрозии.

Представление об изменении профиля поперечной скорости (скорости оттока продуктов сгорания от поверхности горения) на участке стабилизации течения в канале ($0 \leq x/h \leq 12,5$) дает рис. 2, на котором показаны распределения поперечной скорости в различных сечениях. Здесь же для сравнения штриховой линией показано распределение скорости оттока при нормальном горении (без обдува).

Из анализа кривых следует, что на участке стабилизации течения развитие профиля поперечной скорости происходит немонотонно, вначале скорость оттока увеличивается, а затем уменьшается, выходя в волне горения ($y/h \geq 0,2$) на уровень скорости оттока при нормальном горении.

Эффект конвекции, заключающийся в уменьшении теплового потока в топливо за счет увеличения поперечной составляющей скорости, определяется величиной поперечной скорости в волне горения газовой фазы. На рис. 3, 2 представлена зависимость поперечной составляющей

скорости на внешней границе волны горения в газовой фазе вдоль координаты x . Видно, что на участке стабилизации течения ($x/h \leq 1,5$) поперечная скорость на границе волны горения проходит через максимум, который в 1,4 раза превышает установившееся стабилизированное значение. Кривые 1, 3, описывающие изменение координат начала и конца зоны химических реакций в газовой фазе вдоль поверхности горения, наглядно отражают факт отхода зоны реакций от поверхности топлива на участке стабилизации течения. Характер кривых рис. 3 полностью соответствует зависимости $\epsilon(x/h)$ (см. рис. 1, 3).

В работе [2] обсуждаются результаты экспериментального исследования влияния начальной температуры топлива на величину отрицательной эрозии. Эксперимент показал, что со снижением T_0 отрицательный эрозионный эффект уменьшается, и наоборот — при росте T_0 абсолютная величина ϵ увеличивается. Для сопоставления экспериментально полученного характера зависимости с расчетной рассмотрим рис. 4. Уменьшение T_0 приводит к увеличению эффекта отрицательной эрозии, но сокращает расстояние, на котором она проявляется. На первый взгляд, можно прийти к выводу, что результаты расчетов находятся в противоречии с экспериментом. Однако надо учесть, что в эксперименте [2] ϵ определялся по всему образцу топлива, т. е. являлся интегральной характеристикой. Поэтому корректное сравнение результатов расчетов с экспериментом предполагает сравнение интегрального расчетного

$$\text{коэффициента эрозии } \epsilon_x = \int_x (1 - \epsilon) dx.$$

Зависимость ϵ_x , найденная по рис. 4, такова, что рост T_0 приводит к увеличению ϵ_x , т. е. соответствует характеру экспериментальной зависимости.

Таким образом, анализ численных расчетов закономерностей горения пороха Н на базе полных уравнений Навье — Стокса показывает, что отрицательная эрозия в канале имеет место на участке стабилизации течения и обусловлена увеличением конвекции в волне горения газовой фазы, которая, оттесняя зону реакций в газовой фазе от поверхности горения, уменьшает тепловой поток в конденсированную фазу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вилюнов В. П., Дворяшин А. А. ФГВ, 1971, 7, 1, 45.
2. Вилюнов В. П., Дворяшин А. А. ФГВ, 1973, 9, 4, 602.
3. Булгаков В. К., Липанов А. М. ФГВ, 1983, 19, 3, 32.
4. Булгаков В. К., Липанов А. М., Камалетдинов А. Ш. Хим. физика, 1986, 5, 6, 831.
5. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. — М.: Энергоатомиздат, 1984.

Поступила в редакцию 17/XII 1987,
после доработки — 8/IV 1988

УДК 537.566

ИССЛЕДОВАНИЕ АКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ГОРЕНИЯ ПХА НА ВЫСОКИХ ЧАСТОТАХ

Ю. С. Иващенко, В. М. Зенченко, А. Л. Садырин

(Красноярск)

В [1] проведены исследования электропроводности поверхности горения ПХА низкочастотным (4 кГц) методом. Представляет интерес изучение активного сопротивления поверхности ПХА на высоких частотах, позволяющее получить дополнительную информацию о процессе горения.