

ЭРОЗИОННОЕ ГОРЕНИЕ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ

В. А. Архипов, Д. А. Зимин

НИИ прикладной математики и механики при ТГУ, 634050 Томск

Представлены результаты экспериментального исследования горения баллиститного твердого топлива (порох Н) в сверхзвуковом потоке. Установлено, что критериальная зависимость коэффициента эрозии от параметра Вилюнова, полученная по результатам опытов в до- и звуковом потоке, удовлетворительно описывает опытные данные и для сверхзвукового обдува в исследованном диапазоне чисел Маха $M = 1 \div 2,8$. Получена уточненная аппроксимационная формула для исследованного диапазона параметров. Проведен анализ особенностей обтекания горячей поверхности твердого топлива при $M > 1$, который выявил определенные трудности в интерпретации опытных данных.

Эрозионное горение твердых топлив является предметом интенсивных экспериментальных и теоретических исследований, начиная с открытия этого явления О. И. Лейпунским в 1942 г. [1]. Достаточно полный анализ работ по данной проблеме приведен в обзоре [2]. Однако лишь в единичных публикациях [3–5] представлены результаты исследований эрозионного горения твердого топлива в условиях звукового и сверхзвукового обдува. В то же время возникновение новых практических задач, в частности разработка бесспорных ракетных двигателей, требует знания закономерностей эрозионного горения при скоростях обдувающего потока, превышающих скорость звука. В настоящем сообщении представлены результаты экспериментального исследования горения баллиститного твердого топлива (порох Н) в сверхзвуковом потоке в диапазоне чисел Маха $M = 1 \div 2,8$.

Эксперименты проводили на установке, схема которой дана на рис. 1. Установка состоит из газогенераторной камеры диаметром 53 мм и измерительного блока. В газогенераторной камере размещен трубчато-канальный образец твердого топлива, бронированный по торцевой поверхности, что обеспечивает постоянную поверхность горения. Критическое сечение сопла — прямоугольник размером 4×14 мм. Измерительный блок представляет собой канал, образованный негорючими сменными вкладышами и исследуемым образцом твердого топлива шириной 10, высотой 20 и длиной 110 мм, вклеенным с помощью эпоксидного компаунда в специальную обойму.

Газогенератор запускали с помощью вос-

пламенителя. Через $0,6 \div 0,7$ с после выхода его на стационарный режим осуществлялось гашение зарядов вводом жидкости от гидрогенератора с пиропроводом. В процессе экспериментов с помощью тензометрических датчиков типа ЛХ-412 измеряли давление p_0 в камере сгорания и в двух точках измерительного блока (на расстоянии $x = 25$ и 90 мм). Толщину $\Delta \epsilon$ сгоревшего свода исследуемого образца после гашения измеряли штангенциркулем. Погрешность измерений давления составляла 2%, а $\Delta \epsilon$ — $5 \div 10\%$ (0,2 мм). Относительно большая погрешность определения толщины сгоревшего свода связана с тем, что поверхность образца после гашения покрыта характерной для эрозионного горения рябью [3, 5]. Значения среднего давления в газогенераторе (p_0), время горения (t_{comb}) и геометрия сменных вкладышей приведены в таблице.

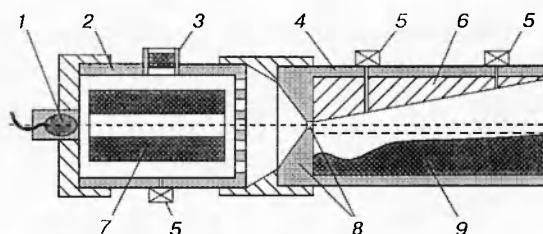


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 — воспламенитель, 2 — газогенераторная камера, 3 — ввод жидкости, 4 — измерительный блок, 5 — тензометрические датчики, 6 — вкладыш, 7 — трубчато-канальный образец твердого топлива, 8 — сопло, 9 — исследуемый образец твердого топлива.

Номер опыта	p_0 , МПа	t_{comb} , с	Геометрия вкладышей
1	6,35	0,84	$0 < x < 110, \alpha = 10^\circ$
2	6,74	0,84	
3	7,18	0,84	$x < 32 \text{ мм}, \alpha = 10^\circ$,
4	7,46	0,84	$x > 32 \text{ мм}, \alpha = 0$
5	7,14	0,86	$x < 6 \text{ мм}, \alpha = 10^\circ$,
6	7,24	0,88	$x > 6 \text{ мм}, \alpha = 0$

Для исследуемого состава была проведена серия экспериментов по определению стационарного закона горения. По их результатам установлена зависимость (с точностью 4%)

$$u_0 = 0,37 \left(\frac{p}{10^5 \text{ Па}} \right)^{0,82} \text{ мм/с}, \quad (1)$$

$$p = (3 \div 40) \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

Определение характеристик эрозийного горения основывалось на нахождении реальной скорости горения по измеренным значениям толщины сгоревшего свода ($u(x) = \Delta e(x)/t_{comb}$) и на вычислении коэффициента эрозии $\varepsilon = u/u_0$. Зависимость $u_0(x)$ определялась из (1) по расчетному распределению давления в измерительном блоке (канале).

При рассмотрении течения газа в канале с учетом притока массы приняты следующие допущения:

- 1) течение одномерное, адиабатическое, неизэнтропическое;
- 2) процессы зажигания и нестационарного горения не учитываются;
- 3) параметры потока предполагаются постоянными во времени, несмотря на выгорание заряда в канале.

Тогда осредненные по времени давление p , скорость потока v и плотность ρ определяются из системы уравнений

$$\frac{d}{dx}(\rho v A) = \rho_p b_{comb} u, \quad \frac{d}{dx}(pA + \rho v^2 A) = p \frac{dA}{dx},$$

$$\frac{\gamma}{\gamma - 1} p + \frac{\rho v^2}{2} = c_p T_0, \quad (2)$$

где b_{comb} — ширина горячей поверхности, ρ_p — плотность топлива, γ — показатель адиабаты продуктов сгорания, T_0 — температура торможения в газогенераторе, A — осредненная по времени горения площадь проходного сечения. Граничные условия задаются параметрами в критическом сечении сопла.

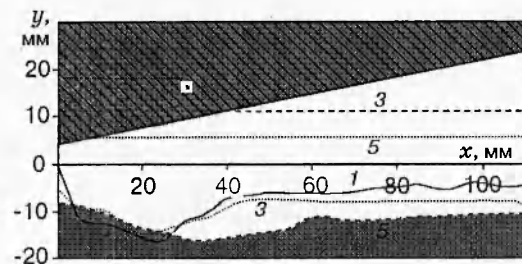


Рис. 2. Конфигурация канала после гашения: цифрами отмечены номера соответствующих экспериментов из таблицы

В процессе экспериментов давление в камере газогенератора оставалось практически постоянным, а в канале вследствие его разгорания уменьшалось в 1,5–2,5 раза в зависимости от геометрии вкладыша. Конфигурация канала после гашения показана на рис. 2. Поверхность исследуемого образца покрыта характерной рябью (высота выступов до 0,1 мм). У входа в канал наблюдается участок повышенного выгорания, максимум уноса находится на расстоянии 20 ÷ 25 мм от критического сечения. Уменьшение времени обдува приводит к смещению положения максимума к входной части канала. Рассчитанные по приведенной методике значения коэффициента эрозии и параметров потока представлены на рис. 3. Там же приведены средние значения измеренных в канале давлений, отличающиеся от расчетных на 5 ÷ 10% (кроме сечения $x = 2,5$ см в опытах 5, 6).

Аномальное поведение коэффициента эрозии при $x < 45 \div 45$ мм можно объяснить образованием в головной части канала у поверхности горения области дозвукового течения, где большая скорость горения обусловлена не сверхзвуковым обдувом, а высокими значениями давления. В этой области вычисление входящей в коэффициент стационарной скорости горения u_0 не может опираться на значения давления, рассчитанные в рамках принятых допущений. Кроме того, неоднородность течения, повышенная турбулизация потока и существенное изменение условий обдува у входа в канал могут существенно влиять на реальную скорость горения. Поэтому оценивались размеры (до 40% исследуемого образца) и интегральный вклад этой области в дальнейшее течение, а определенные здесь значения ε исключались из рассмотрения.

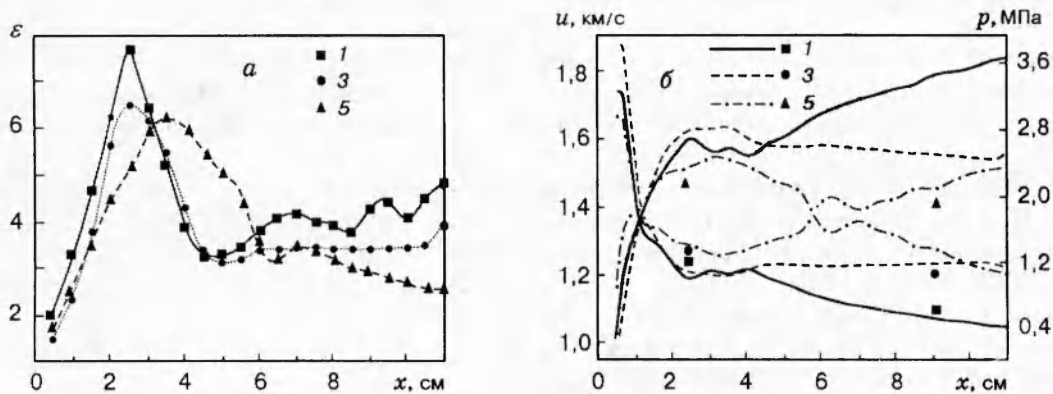


Рис. 3. Коэффициент эрозии (а) и параметры потока в канале (б): цифрами обозначены номера соответствующих экспериментов из таблицы, точками помечены осредненные значения измеренного давления

Результаты обработки опытных данных с использованием параметра Вилюнова [3, 6] $J = \rho v \sqrt{\lambda} / \rho_p u_0$ представлены на рис. 4. Использование для коэффициента сопротивления формулы Блазиуса $\lambda = 0,316 Re^{-0,25}$ дает качественное совпадение с результатами [3] (штриховые линии). Аппроксимационная формула для коэффициента эрозии, уточненная по полученным данным, имеет вид $\epsilon = 1 + 0,075 (J - 20,8)$ (сплошная линия).

Следует, однако, заметить, что наличие характерной для эрозионного горения ряби на поверхности может изменять гидродинамическую картину течения. В сверхзвуковом канале число Рейнольдса принимало значения от

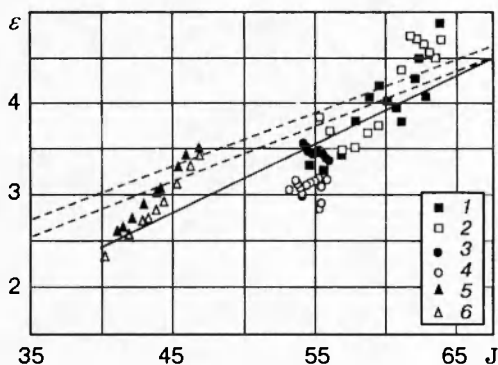


Рис. 4. Зависимость коэффициента эрозии ϵ от параметра Вилюнова J : цифрами обозначены номера соответствующих экспериментов из таблицы

$3 \cdot 10^6$ до $8 \cdot 10^6$. Граница использования формулы сопротивления для гладких труб определяется неравенством [7]

$$\frac{k}{a} < \frac{16,3}{Re \sqrt{0,0032 + 0,221 Re^{-0,237}}} = (1,8 \div 4,4) \cdot 10^{-4}.$$

Здесь k — высота бугорков, a — диаметр канала. Относительная шероховатость канала $k/a = (3 \div 7) \cdot 10^{-3}$, что существенно больше критического значения. С другой стороны, применение в (2) коэффициента сопротивления шероховатых труб также неоправданно, поскольку режим развитой шероховатости, определяемый условием

$$\frac{k}{a} > \frac{390}{Re \sqrt{0,0032 + 0,221 Re^{-0,237}}}$$

при $k/a = (4,0 \div 10,5) \cdot 10^{-3}$ для указанных значений Re , не реализуется для большинства экспериментальных точек. Течение сверхзвукового потока газа в канале происходит в промежуточном режиме [7], и построение критериальной зависимости в данном диапазоне скоростей требует привлечения адекватного выражения для закона сопротивления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лейпунский О. И. К вопросу о физических основах внутренней баллистики ракетных снарядов // Теория горения порохов и взрывчатых систем. М.: Наука, 1982.

2. **Rasdan M. K., Kuo K. K.** Erosive burning of solid propellants // *Fundamentals of Solid Propellant Combustion* / K. K. Kuo, M. Summerfield (Eds). Progress in Astronautics and Aeronautics; V. 90. 1994.
3. **Вилюнов В. Н., Дворяшин А. А., Марголин А. Д. и др.** Горение баллистического пороха Н в звуковом потоке // *Физика горения и взрыва*. 1972. Т. 8, № 4. С. 501-505.
4. **Traineau J. C., Kuentzmann P.** Ultrasonic measurements of solid propellant burning rates in nozzleless rocket motors // *J. Propul. and Power*. 1986. V. 2, N 3. P. 215-222.
5. **Вилюнов В. Н., Исаев Ю. М.** Эрозионное горение в сверхзвуковом потоке // *Химическая физика процессов горения и взрыва*. Горение конденсированных систем: Материалы IX Всесоюз. симпоз. по горению и взрыву. Черногловка, 1989. С. 12-15.
6. **Вилюнов В. Н.** К теории эрозионного горения порохов // *Докл. АН СССР*. 1961. Т. 136, вып. 2. С. 381-383.
7. **Лойцянский Л. Г.** *Механика жидкости и газа*. М.: Наука, 1970.

Поступила в редакцию 21/XI 1996 г.
