

20. Л. В. Альтшулер, К. К. Крупников, М. И. Бражник. ЖЭТФ, 1958, 34, 614.
21. А. Н. Дремин, С. Д. Савров и др. Дегонационные волны в конденсированных средах. М., «Наука», 1970.
22. А. Н. Дремин, О. К. Розанов и др. ФГВ, 1967, 3, 1.
23. А. Н. Дремин, Г. И. Канель, А. М. Молодец. ФГВ, 1972, 8, 2.
24. В. Жданов, Ю. Каган, А. Сазыкин. ЖЭТФ, 1962, 42, 857.
25. Г. А. Ададуров, Т. В. Бавина и др. ВИНТИ, № 328—68. Деп., 1969.
26. С. С. Бацанов, В. М. Нигматуллина, И. Г. Юзелевич. ФГВ, 1968, 4, 3.

УДК 662.311.1

ГОРЕНИЕ БАЛЛИСТИЧНОГО ПОРОХА Н В ЗВУКОВОМ ПОТОКЕ

*В. Н. Вилунов, А. А. Дворяшин, А. Д. Марголин,
С. К. Орджоникидзе, П. Ф. Похил
(Москва — Томск)*

Было установлено [1], что в области положительной эрозии опытные результаты с удовлетворительной точностью можно интерполировать линейной зависимостью от параметра эрозионного горения I , полученного в работе [2],

$$\varepsilon = \frac{v_u}{v_0} = \begin{cases} 1 & \text{при } I < I_{**}, \\ 1 + k(I - I_{**}) & \text{при } I \geq I_{**}. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь $I = \frac{u\rho}{v_0\rho_{\text{п}}} \sqrt{\xi}$; v_u — скорость горения в потоке; v_0 — нормальная скорость горения, определяемая в бомбе постоянного давления; u — скорость потока; ρ — плотность продуктов горения; $\rho_{\text{п}}$ — плотность пороха; ξ — коэффициент сопротивления

$$\xi = 0,316 \left(\frac{\mu}{u\rho d} \right)^{0,25};$$

μ — коэффициент вязкости; d — эквивалентный диаметр потока; k, I_{**} — экспериментальные безразмерные константы в соответствии с [2], слабо зависящие от сорта пороха.

Для пороха Н при скоростях потока газа от 12 до 140 м/сек было получено [1]: $k=0,04$, $I_{**}=5,6$. Дополнительные эксперименты, проведенные в более широком диапазоне скоростей потока от 12 до 300 м/сек и при давлениях $p=30-80$ бар ($1 \leq I \leq 16$), показали, что экспериментальные данные находятся в более близком согласии с прямой

$$\varepsilon = 1 + 0,06(I - 6,7). \quad (2)$$

Дальнейшее увеличение диапазона скоростей потока по методике [1] связано с большими техническими трудностями. Между тем для теоретического анализа процессов горения и практических расчетов необходимо знание закономерностей эрозионного горения и величины коэффициента эрозии при больших скоростях потока.

В настоящей работе изучалось горение пороха Н в звуковом потоке (рис. 1). Из исследуемого материала изготовлялось коническое

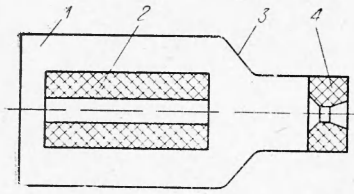


Рис. 1. Схема опыта по измерению коэффициента эрозии в звуковом потоке.

1 — камера сгорания (газогенератор);
2 — заряд ТТ; 3 — дозвуковое сопло;
4 — исследуемый образец.

сверхзвуковое сопло или сопло «очко» (диаметр критического сечения — 4÷8 мм, длина соплового канала — 4—12 мм). Для создания обдувающего потока использовались продукты сгорания пороха Н; требуемое начальное давление в газогенераторе задавалось согласованным выбором поверхности горения заряда и критического сечения сопла. Использовался метод прерывания горения; длительность процесса — 0,05—0,2 сек. В газогенераторе непрерывно регистрировалось давление.

Обработка результатов проводилась двумя способами.

Первый — расчетный — способ заключается в том, что величина скорости разгара сопла определяется только по обмеру кривой давления в камере. Из уравнения баланса массы следует формула, связывающая текущие значения радиуса критического сечения и давления,

$$r_* = \sqrt{\frac{1}{A\pi p} \left(\rho_n \sigma v - \frac{\omega}{RT_p} \frac{dp}{dt} \right)}, \quad (3)$$

где σ — поверхность горения заряда, генерирующего газовый поток; v — скорость горения заряда; $A = \Gamma / \sqrt{RT_p}$; Γ — коэффициент истечения; T_p — температура газов в газогенераторе; R — газовая постоянная; ω — свободный объем камеры.

Обозначая

$$c_1 = \sqrt{\frac{\rho_n \sigma}{\pi A}}, \quad c_2 = \sqrt{\frac{\omega}{\sigma RT_p \rho_n}}$$

(σ и ω в процессе опыта практически не менялись), формулу (3) можно переписать в виде

$$r_* = c_1 \sqrt{\frac{1}{p} \left(v - c_2 \frac{dp}{dt} \right)}. \quad (4)$$

Константа c_1 определяется экспериментально по величине максимального давления в газогенераторе, когда $dp/dt = 0$,

$$c_1 = r_{*0} \cdot \sqrt{\frac{\rho_n}{v}}$$

По измеренным значениям p , $\frac{\Delta p}{\Delta t}$ и известной скорости горения заряда $v(p)$ в условиях модельного двигателя находится закон изменения радиуса критического сечения сопла.

Скорость раздувания исследуемого образца определяется численным дифференцированием

$$v_n = \frac{\Delta r_*}{\Delta t}. \quad (5)$$

Давление в критическом сечении сопла

$$p_{кр} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \cdot p. \quad (6)$$

Из сопоставления кривых $v_n(t)$ и $p(t)$ с использованием формулы (6) получается зависимость скорости горения пороха от давления в условиях звукового обтекания.

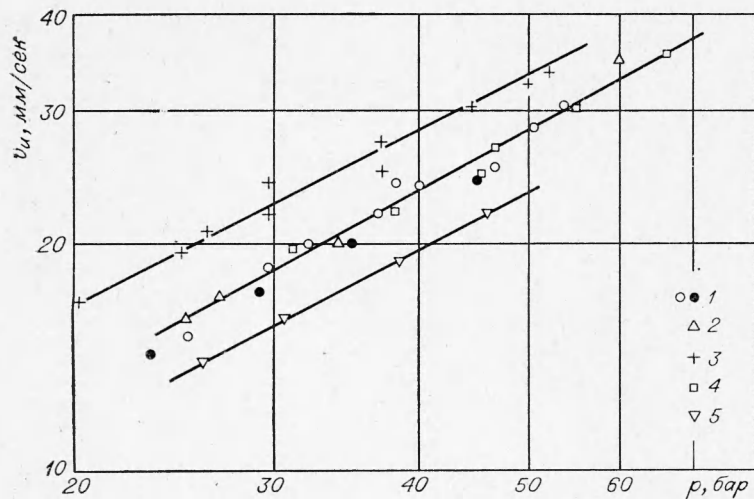


Рис. 2. Зависимость скорости горения баллиститных порохов в звуковом потоке от давления.
 1 — порох Н (нормальная скорость горения — v_{0H}); 2 — порох со скоростью горения $v_0=2v_{0H}$; 3 — $v_0=1,5v_{0H}$; 4 — $v_0=0,9v_{0H}$; 5 — $v_0=0,7v_{0H}$.

Второй непосредственный способ определения эрозионного отношения заключается в расчете среднего значения скорости разгара порохового сопла по данным обмера критического сечения до и после опыта

$$\langle v_u \rangle = \frac{d_* - d_{*0}}{2t},$$

где d_* — диаметр критического сечения погашенного сопла; d_{*0} — начальное значение d_* ; t — время горения сопла. Продолжительность опыта и среднее значение давления снимались с осциллограмм $p(t)$. Оба метода дают согласующиеся результаты.

Исследование эрозионного горения пороха Н проводилось при значениях давления в газогенераторе от 40 до 120 бар. Скорость потока в критическом сечении 950 м/сек. Результаты опытов в виде зависимости эрозионной скорости от давления показаны на рис. 2. Экспериментальные точки аппроксимируются степенной формулой с точностью 4%:

$$v_u = 1,19 p^{0,81} \text{ мм/сек.}$$

Зависимость нормальной скорости горения пороха Н от давления: $v_0 = 0,40 p^{0,7}$ мм/сек. Пересчет результатов в координаты I, ε (рис. 3) дает, что точки, полученные при звуковом обтекании, ложатся на продолжение прямой, соответствующей формуле (2). При звуковом потоке скорость горения превосходит нормальную в 4,5 раза ($p=50$ бар).

Таким образом, интерполяционная формула (2) дает правильную оценку горения и при больших скоростях потока (до 950 м/сек). Результат $v_u \sim p^{0,8}$ совпадает с опытами [3].

Для теоретической оценки зависимости горения пороха при больших скоро-

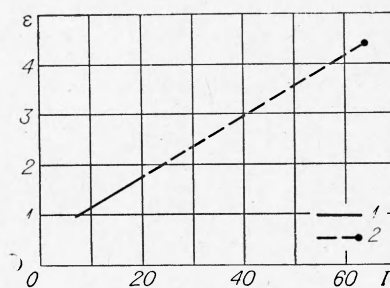


Рис. 3. Зависимость $\varepsilon(I)$ для пороха Н ($p=50$ бар).
 1 — опыт по схеме [1]; 2 — звуковое обтекание.

стях обдувающего потока воспользуемся простейшей T_s -моделью. Если задан тепловой поток из газовой фазы, то в соответствии с [4] имеем

$$\rho_n v_0 = \frac{\left[q_{so}^2 + 2\lambda Q \int_{T_0}^{T_s} \Phi(T) dT \right]^{1/2}}{c(T_s - T_0)}, \quad (7)$$

где q_{so} — поток тепла из газовой фазы, зависящий исключительно от химического тепловыделения и характера распределения температуры в газовой фазе; λ — коэффициент теплопроводности пороха; Q — тепловой эффект в конденсированной фазе; $\Phi(T)$ — суммарная скорость химических реакций в конденсированной фазе; c — теплоемкость; T_0 — начальная температура; T_s — температура на поверхности.

При горении в потоке к q_{so} следует присоединить добавку, вносимую усиленной теплопередачей в турбулентном потоке, т. е.

$$q_s = q_{so} + q_u.$$

Величина q_u определяется исключительно гидродинамикой течения.

Теперь нетрудно составить выражение для коэффициента эрозии

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{(q_{so} + q_u)^2 + 2\lambda Q \int_{T_0}^{T_s} \Phi(T) dT}{q_{so}^2 + 2\lambda Q \int_{T_0}^{T_s} \Phi(T) dT}}. \quad (8)$$

В частности, при $Q=0$ имеем очевидное равенство, вытекающее из баланса тепла

$$\rho_n v_u = \rho_n v_0 + \frac{q_u}{c(T_s - T_0)}.$$

При $Q \neq 0$, но при больших скоростях обдувающего потока, когда $q_u \gg q_{so}$, $q_u \gg 2\lambda Q \int_{T_0}^{T_s} \Phi(T) dT$, из (8) следует асимптотическое выражение

$$\rho_n v_u \sim \frac{q_u}{c(T_s - T_0)}.$$

В этом предельном случае скорость горения определяется гидродинамическим теплообменом и практически не зависит от тепловыделения как в конденсированной, так и в газовой фазах (в схеме опыта рис. 1 $q_{so} \rightarrow 0$, ибо реакции будут завершаться за сопловым срезом).

Такой режим, имеющий место при звуковом обтекании, естественно назвать вынужденным режимом горения. Привлекая результаты гидродинамической теории теплообмена, получим

$$\rho_n v_u = c_3 p^{0,8} \quad (9)$$

Параметр c_3 зависит от физико-химической природы обдувающих продуктов горения, геометрии образца и теплофизических характеристик исследуемого пороха (быстрогорящие нитроглицериновые пороха, испаряющиеся в данной работе, содержат большой процент нитроглицерина, термические параметры которого отличаются от нитроглицерина). С ростом температуры горения в газогенераторе c_3 увеличивается; зависимость c_3 от d степенная, $c_3 \sim d^{0,2}$. Из (9) ясно, что в пределе

больших скоростей все пороха горят по вынужденному механизму. Если различные сорта достаточно медленно горящего пороха обдувать фиксированными продуктами газогенератора, то скорость горения в звуковом (а также сверхзвуковом) потоке широкого класса порохов будет близкой. Этот вывод подтверждается экспериментами. На рис. 2, 1, 3, 5 представлены результаты исследования баллистических порохов, отличающихся по скорости горения в бомбе постоянного давления более чем в два раза. Обдувание производилось продуктами горения пороха Н. Скорости эрозионного горения всех порохов отличаются не более чем на 50%. Скорость эрозионного горения порохов значительно выше скорости абляции в звуковом потоке пластмасс с отрицательным кислородным балансом — эбонита, полиметилметакрилата, фторопласта.

На погашенной поверхности пороха наблюдалась характерная для эрозии рябь. Размер ряби для всех порохов около 0,6—1 мм. Аналогичная рябь наблюдается в наших опытах и на пластмассах.

В заключение авторы выражают признательность Ю. М. Исаеву за активное участие в проведении экспериментов.

Поступила в редакцию
26/VI 1972

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Н. Виллюнов, А. А. Дворяшин. ФГВ, 1971, 7, 1.
2. В. Н. Виллюнов. Докл. АН СССР, 1961, 136, 2.
3. А. Ф. Беляев, А. И. Коротков и др. ФГВ, 1969, 5, 1.
4. С. С. Новиков, Ю. С. Рязанцев. ПМТФ, 1965, 3.

УДК 541.128+662.612

ВЛИЯНИЕ ДИСПЕРСНОСТИ ОКИСЛИТЕЛЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ КАТАЛИЗАТОРОВ ГОРЕНИЯ

В. С. Никифоров, Н. Н. Бахман
(Москва)

В работе [1] было изучено действие окиси железа на скорость горения u мелкодисперсных смесей на основе перхлората аммония (ПХА) в функции давления p , начальной температуры T_0 и соотношения между горючим и окислителем α . Представляет существенный интерес исследовать эффективность катализаторов горения также в функции дисперсности компонентов, так как этот параметр сильно влияет на закономерности горения смесевых систем [2].

Эффективность катализатора, как обычно, будем характеризовать величиной $Z = u/u_0$, где u , u_0 — соответственно скорость горения смеси с катализатором и без катализатора. Величины, относящиеся к мелкодисперсным, крупнодисперсным и бидисперсным смесям, будем отмечать соответственно индексами «м», «кр», «бд».

В данной работе изучены смеси ПХА с полистиролом (ПС) или полиметилметакрилатом (ПММА) при различной дисперсности ПХА и ПС (см. таблицу). Катализатором служила окись железа (ч. д. а.; величина удельной поверхности, определенная методом тепловой десорб-