

приведены результаты эксперимента по исследованию горения самогорящих пиротехнических топлив на основе магния и алюминия с малым собственным содержанием окислителя (коэффициент избытка окислителя $\alpha_{вн} = 0,14$). В качестве окисляющего компонента, вводимого в камеру сгорания, использовался воздух. Согласно полученным данным, скорость выгорания твердого компонента существенно зависит от расхода окислителя и величины давления в камере сгорания. При малых плотностях тока окислителя и давлениях от 2 до 15 кг/см² скорости горения изменяются примерно по степенной зависимости от плотности тока (расхода) окислителя с показателем степени, равным 0,8.

Далее с увеличением расхода окислителя при соотношении компонентов, близком к стехиометрическому, зависимость скорости горения от расхода (особенно при малых давлениях) более слабая. С увеличением же давления при постоянном расходе окислителя скорость горения увеличивается. При этом в обоих случаях для плотности тока 15—20 г/см²·сек зависимость скорости от давления близка к линейной.

Таким образом, предложенная физическая модель горения в комбинированном ракетном двигателе, рассматривающая взаимодействие компонентов в зоне пламени как гомогенную реакцию не ниже второго порядка, протекающую в газовой фазе, и перенос массы в пограничном слое в соответствии с законами турбулентного движения, позволила получить математическое выражение для скорости горения твердого горючего, рационально учитывающее факторы газовой динамики и кинетики процесса. Проведен анализ полученного уравнения с целью определения характеристических зависимостей скорости горения горючего от основных параметров рабочего процесса. Определены пределы использования упрощенных выражений для скорости сгорания. Полученные уравнения хорошо согласуются с приведенными экспериментальными данными.

Поступила в редакцию
17/X 1970

ЛИТЕРАТУРА

1. Гетерогенное горение. Сб. статей. Перев. с англ. М., «Мир», 1967.
2. L. D. Smoot, C. F. Price. AIAAJ. 1965, 3.
3. L. D. Smoot, C. F. Price. The pressure dependence of hydrid fuel regression rates AIAA Preprint 66—III (January 1966).
4. E. Miller. AIAAJ, 1966, 4.

УДК 536.46 + 662.311.1

О ЗАКОНОМЕРНОСТЯХ ГОРЕНИЯ ПОРОХА Н В ПОТОКЕ ГАЗА

В. Н. Вилунов, А. А. Дворяшин
(Томск)

При исследовании горения было обнаружено [1—5], что поток, протекающий параллельно горячей поверхности пороха, изменяет его линейную скорость горения. Этот эффект обычно называют раздуванием или эрозионным горением. Возможно как увеличение скорости горения пороха в потоке — положительная эрозия, так и уменьшение скорости —

отрицательная эрозия. Положительная эрозия имеет хорошее физическое объяснение — рост скорости горения обусловлен увеличением эффективных коэффициентов теплопроводности и диффузии в развитом мелко-масштабном турбулентном потоке продуктов сгорания (эффект Дамкелера — Щелкина). Относительно уменьшения скорости горения — отрицательной эрозии — ниже будут высказаны две гипотезы.

Схема экспериментальной установки. Принципиальная схема лабораторной установки показана на рис. 1. Продукты горения, образующиеся в камере сгорания от основного заряда

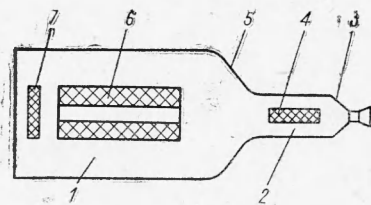


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

1 — камера сгорания; 2 — эрозионный насадок; 3 — сверхзвуковое сопло; 4 — исследуемый образец; 5 — дозвуковое сопло Витшинского; 6 — основной заряд; 7 — контрольный образец.

в камере сгорания от основного заряда и контрольного образца, горящего в условиях бомбы постоянного давления, т. е. при отсутствии направленного потока газов, ускоряются в профилированном дозвуковом сопле Витшинского. Далее поток газов воздействует на исследуемый образец. Изменением поверхности горения основного заряда, критического сечения сверхзвукового сопла и площади поперечного сечения эрозионного насадка обеспечиваются различные уровни давления и условия обдува исследуемого на эрозию образца. Контрольный и исследуемый образцы изготавливаются из топлив одного и того же состава.

Методика обработки опытных данных. Одним из авторов [1] было показано, что коэффициент эрозии $\varepsilon = \frac{v_u}{v}$ является функцией безразмерного параметра

$$I = \frac{u \rho}{m} \sqrt{\xi}.$$

Здесь v_u — линейная скорость горения пороха в потоке газа; v — скорость горения в бомбе постоянного давления; u — скорость газового потока; ρ — плотность газа; m — массовая скорость горения в нормальных условиях (при отсутствии потока газов); ξ — коэффициент сопротивления, который в первом приближении можно определить по формуле Блазиуса

$$\xi = 0,316 \operatorname{Re}^{-0,25} \quad (1)$$

или по формуле Никурадзе

$$\xi = 0,0032 + 0,221 \operatorname{Re}^{-0,237} \quad (2)$$

Коэффициент эрозии ε и параметр I при обработке опытных данных рассчитывались соответственно по формулам (3) и (4):

$$\varepsilon = \left(\frac{p}{p_u} \right)^v \frac{\sqrt{\omega_{uo}} - \sqrt{\omega_{uk}}}{\sqrt{\omega_o} - \sqrt{\omega_k}}, \quad (3)$$

где p — давление в камере сгорания; p_u — давление в эрозионном насадке; v — показатель степени в законе горения; ω_{uo} и ω_{uk} — вес исследуемого образца до и после опыта; ω_o и ω_k — вес до и после опыта контрольного образца.

$$\bar{I} = I_1 \sqrt{\xi}; \quad I_1 = \left(\frac{p}{p_u} \right)^v \frac{\sigma_3 + \frac{3}{2} \sigma}{s}, \quad (4)$$

где σ_3 — поверхность горения основного заряда; σ — поверхность горения исследуемого образца; s — площадь проходного сечения (кольцевой зазор).

Перепад давления определяется зависимостью

$$\frac{p_u}{p} = \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2\right)^{\frac{k}{k-1}}.$$

Здесь k — показатель адиабаты; $\lambda = \frac{u}{c_*}$ — коэффициент скорости газового потока; c_* — критическая скорость звука. Число Рейнольдса, входящее в выражения (1), (2), находится по формуле

$$Re = \frac{4s I_1 \rho_n v}{\pi \mu d_u},$$

где μ — коэффициент вязкости продуктов сгорания; d_u — диаметр исследуемого образца, ρ_n — плотность пороха.

Результаты опытов. Изучалось эрозионное горение баллиститного пороха Н, в опытах использовались цилиндрические забронированные с торцов образцы диаметром 8 мм, длиной 45 мм. Опыты проводились при двух уровнях давления: 50 и 80 кг/см². Величина параметра I изменялась в пределах $1 < I < 10$ (при $p = 50$ кг/см² соответствует изменению скорости потока от 12 до 140 м/сек).

Результаты опытов представлены на рис. 2 в виде зависимости ϵ от I . Как видно из графика, величина коэффициента эрозии, представленного в функции от безразмерного параметра I , практически не зависит от давления, что находится в соответствии с теорией [1], где высказывалось предположение об универсальности кривых $\epsilon(I)$.

На экспериментальной кривой $\epsilon(I)$ можно выделить три режима эрозионного горения пороха. В диапазоне $0 \leq I \leq I_*$, где $I_* = 1,6$ — первое пороговое значение параметра I , коэффициент эрозии равен единице. В этой области изменения I поток газа, протекающий над горящей поверхностью, не меняет линейной скорости горения пороха. В области $I_* < I < I_{**}$, где $I_{**} = 5,6$ — второе пороговое значение параметра I , коэффициент эрозии меньше единицы, наличие направленного потока газа ведет к уменьшению скорости горения — эффект отрицательной эрозии. И, наконец, при $I > I_{**}$ имеет место классическая положительная эрозия. Наблюдаемые три режима объясняются структурой турбулентного потока и его влиянием на коэффициенты переноса и скорость химической реакции.

Зависимость коэффициента эрозии от параметра I можно представить в виде эмпирических формул:

$$\epsilon = \begin{cases} 1 & \text{при } 0 \leq I \leq I_*, \\ 0,0125 I^2 - 0,09 I + 1,11 & \text{при } I_* < I \leq I_{**}, \\ 1 + 0,04 (I - I_{**}) & \text{при } I > I_{**}, \end{cases} \quad (5)$$

$$I_* = 1,6; \quad I_{**} = 5,6.$$

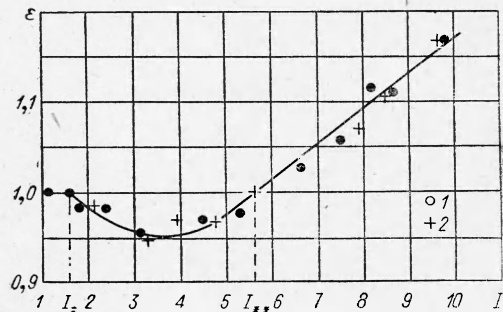


Рис. 2. Зависимость коэффициента эрозии пороха Н от параметра I .
1 — 50 ат; 2 — 80 ат.

При использовании формул (5) в практических расчетах необходимо учитывать, что коэффициент эрозии в них выражен через локальные значения параметра I (мгновенную скорость потока). В баллистических же расчетах, как правило, используются осредненные вдоль заряда параметры, например, среднее давление, средняя скорость газового потока и т. д. В этом случае необходимо ввести осредненное значение коэффициента эрозии, определив его, например, как интеграл

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{1}{L} \int_0^L \varepsilon dx, \quad (6)$$

где L — длина заряда, вдоль которого производится осреднение. Полагая в первом приближении, что локальный параметр I изменяется по линейному закону вдоль заряда, будем иметь:

$$I = \frac{x}{L} I_L, \quad (7)$$

где I_L — значение параметра I на сопловом торце заряда.

Подставим в (6) выражение $\varepsilon(I)$ из (5) при $I > I_{*}$, тогда, используя (7), получим

$$\langle \varepsilon \rangle = 1 + \frac{0,02}{I_L} (I_L - 5,6)^2. \quad (8)$$

Формулы (5) и (8) с использованием определения параметра I позволяют в случае необходимости выразить коэффициент эрозии явно через давление и скорость потока.

Гипотезы, объясняющие эффект отрицательной эрозии

Первая гипотеза объясняет отрицательную эрозию как следствие уменьшения скорости химической реакции в потоке крупномасштабной турбулентности.

Представим скорость химической реакции $\Phi(T)$ в виде функции от безразмерной температуры Франк-Каменецкого $\theta = \frac{E}{R T_1^2} (T_1 - T)$:

$$\langle \Phi(\theta) \rangle = \langle A \theta^n e^{-\theta} \rangle, \quad (9)$$

где E — энергия активации; R — газовая постоянная; T_1 — температура газов в потоке; T — температура реагирующего вещества; n — порядок реакции; A — постоянный коэффициент. Скобки $\langle \rangle$ означают операцию рейнольдсова осреднения, или осредненную величину.

Актуальное значение безразмерной температуры запишем в виде осредненной и пульсационной суммы

$$\theta = \langle \theta \rangle + \theta_1$$

и подставим это выражение в формулу (9)

$$\langle \Phi(\theta) \rangle = A \langle (\langle \theta \rangle + \theta_1)^n e^{-(\langle \theta \rangle + \theta_1)} \rangle.$$

Рассмотрим справа реакцию нулевого порядка. Разлагая правую часть в степенной ряд по θ_1 , получим

$$\langle \Phi_0(\theta) \rangle = A e^{-\langle \theta \rangle} \left(1 - \langle \theta_1 \rangle + \frac{\langle \theta_1 \rangle^2}{2!} - \frac{\langle \theta_1 \rangle^3}{3!} + \dots \right).$$

Положительные и отрицательные пульсации температуры равновероятны, поэтому все члены ряда с нечетными степенями выпадают. Ограничимся четырьмя членами разложения:

$$\langle \Phi_0(\theta) \rangle = A e^{-\langle \theta \rangle} \left(1 + \frac{\langle \theta_1 \rangle^2}{2} \right). \quad (10)$$

Из формулы (10) следует, что осредненная скорость химической реакции в турбулентном потоке зависит не только от температуры по закону Аррениуса, но и от ее пульсаций. В частности, осредненная скорость реакции нулевого порядка в потоке крупномасштабной турбулентности выше, чем соответствующая скорость реакции в ламинарном потоке.

Для реакции первого порядка аналогичные преобразования приводят к зависимости

$$\langle \Phi_1(\theta) \rangle = \langle \theta \rangle e^{-\langle \theta \rangle} \left[1 + \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{\langle \theta \rangle} \right) \langle \theta_1 \rangle^2 \right].$$

Для обычных пороховых пламен в зоне, где существенна реакция, $\langle \theta \rangle \approx 1$, поэтому осредненная скорость химической реакции в этом случае меньше, чем в ламинарном потоке.

Предположим, что во фронте пламени масштаб пульсаций температуры постоянен. Коэффициент эрозии можно представить в виде произведения двух коэффициентов:

$$\varepsilon = \varepsilon_m \cdot \varepsilon_k.$$

Коэффициент ε_m всегда больше единицы, он связан с мелкомасштабной турбулентностью и дает вклад в увеличение скорости горения в результате интенсификации процессов диффузии и теплопередачи в турбулентном потоке. Для реакции первого порядка

$$\varepsilon_k = \sqrt{1 + \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{\langle \theta \rangle} \right) \langle \theta_1 \rangle^2}$$

— коэффициент притухания, его происхождение связано с влиянием крупномасштабных пульсаций на скорость химической реакции, он, как правило, меньше единицы. Наличие этого коэффициента позволяет объяснить эффект отрицательной эрозии.

Теория и эксперимент показывают, что в практически интересных случаях $1 < \varepsilon_m < 1,5$, а поскольку $0 < \varepsilon_k < 1$, то не исключены такие условия, когда их произведение становится меньше единицы — $\varepsilon < 1$. Наиболее благоприятные условия возникновения отрицательной эрозии создаются в момент потери устойчивости ламинарного движения, когда начинает зарождаться турбулентность, ибо в окрестности потери устойчивости потока сначала появляются крупномасштабные пульсации и лишь при очень больших числах Re возникает мелкомасштабная турбулентность [6]. Таким образом, в окрестности перехода от ламинарного движения к турбулентному $\varepsilon_m \approx 1$, а $\varepsilon_k < 1$, что и приводит к отрицательной эрозии. Этот вывод находится в качественном согласии с нашими экспериментальными результатами.

Во второй гипотезе отрицательная эрозия объясняется с точки зрения мелкомасштабной турбулентности, как следствие неравенства коэффициентов переноса. Принимается во внимание неравенство коэффициентов диффузии и температуропроводности (как ламинарных значений, так и их турбулентных аналогов).

В случае ламинарного распределения пламени линейная скорость горения может быть выражена следующим образом [7]:

$$v \sim \sqrt{a} \left(\frac{a}{D} \right)^{n/2},$$

где a — коэффициент температуропроводности; D — коэффициент диффузии. Для турбулентного распространения пламени имеем аналогичное выражение

$$v_T \sim \sqrt{a + a_T} \left(\frac{a + a_T}{D + D_T} \right)^{n/2},$$

а следовательно,

$$\varepsilon = \sqrt{1 + \frac{a_T}{a}} \left(\frac{1 + \frac{a_T}{a}}{1 + \frac{D_T}{D}} \right)^{n/2}. \quad (11)$$

Заменим в формуле (11) отношения коэффициентов температуропроводности и диффузии отношением коэффициентов вязкости

$$\varepsilon = \left(1 + \alpha \frac{\nu_T}{\nu} \right)^{\frac{n+1}{2}} \left(1 + \beta \frac{\nu_T}{\nu} \right)^{-\frac{n}{2}},$$

где

$$\alpha = \frac{a_T}{\nu_T} \cdot \frac{\nu}{a} \neq 1; \quad \beta = \frac{D_T}{\nu_T} \cdot \frac{\nu}{D} \neq 1.$$

В общем случае $\alpha \neq \beta$.

Можно показать, что отношение коэффициентов турбулентной и ламинарной вязкости пропорционально квадрату параметра I , поэтому

$$\varepsilon = (1 + A I^2)^{\frac{n+1}{2}} (1 + B \cdot I^2)^{-\frac{n}{2}}. \quad (12)$$

Эта зависимость допускает возможность возникновения отрицательной эрозии. Исследуем формулу (12); обозначим $I^2 = x$, примем $n=1$. Тогда

$$\varepsilon = \frac{1 + A x}{\sqrt{1 + B x}}, \quad \text{функция } \varepsilon(x) \text{ для } x > 0 \text{ дважды проходит через линию } \varepsilon = 1:$$

$$x_1 = 0; \quad x_2 = \frac{B - 2A}{A^2}.$$

При $x_1 < x < x_2$ $\varepsilon < 1$, т. е. имеет место отрицательная эрозия, а при $x > x_2$ $\varepsilon > 1$ — положительная эрозия. Минимум функции $\varepsilon(x)$ соответствует максимальной величине отрицательной эрозии. Если учесть пороговый эффект эрозионного горения, то кривая будет сдвинута вправо на величину, соответствующую I_* . Характер изменения теоретической функции $\varepsilon(x)$ такой же, как у экспериментальной кривой на рис. 2.

Таким образом, в результате исследований эрозионного горения баллистического пороха Н подтверждена правомерность обработки экспериментальных данных в виде функции безразмерного параметра I . Получена простая практическая зависимость коэффициента эрозии от параметра I , которая может быть использована при баллистических расчетах. Обнаружена отрицательная эрозия, предложено теоретическое объяснение этого явления.

В заключение авторы выражают признательность С. И. Спицыну за помощь в проведении эксперимента и А. Д. Колмакову за предоставление экспериментальной установки.

Поступила в редакцию
19/V 1970

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Н. Виллюнов. Докл. АН СССР, 1961, 136, 2.
2. Л. Грин. Вопросы ракетной техники, 1954, 6.
3. Ж. Ванденкеркхове. Вопросы ракетной техники. 1959, 3.
4. Р. Герон. Вопросы ракетной техники, 1963, 6.
5. Зукроу, Осборн, Мэрфи. Ракетная техника и космонавтика, 1965, 3.
6. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. Механика сплошных сред. ГИТЛ, 1954.
7. Я. Б. Зельдович. ЖФХ, 1948, 22, вып. 1.

УДК 536.46 + 662.222.4

ГОРЕНИЕ ЧАСТИЦ АЛЮМИНИЯ В ФАКЕЛЕ ПЛАМЕНИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СИСТЕМ

*П. Ф. Похил, В. М. Мальцев,
В. С. Логачев, В. А. Селезнев
(Москва)*

В настоящей работе изучался процесс горения частиц алюминия в факеле пламени баллиститного пороха Н и модельной смеси перхлората аммония с органическим горючим. Исследование процесса горения частиц металла проводилось в бомбе постоянного давления с кварцевыми окнами, где в зависимости от требуемых условий создавался вакуум или необходимое давление инертного газа (азот, аргон). Частицы металла вводились в состав топлив в процессе изготовления. Для исследования процессов, протекающих на поверхности горения, использовался фотографический метод [1], а изучение размеров частиц металла по высоте факела пламени производилось методом отбора частиц. Излучение продуктов горения частиц металла и их температура горения исследовались с помощью спектрально-оптических методов [2]. Для этого использовалась спектрально-сканирующая установка, позволяющая регистрировать излучение продуктов горения частиц металла в видимой и ультрафиолетовой областях спектра со скоростью от 1 до 100 спектров в секунду [4]. Температура измерялась по распределению энергии излучения в видимой области спектра, по резонансным линиям алюминия и фотометрическим методом. Применение скоростной киносъемки позволяло измерять скорость движения частиц в факеле пламени, расстояние от поверхности горения топлив до места воспламенения.

Процессы, протекающие на поверхности горения топлива

Определенный интерес представляет исследование процессов, протекающих на поверхности горения топлив с добавкой металла, а также оценка влияния таких факторов, как давление, процент содержания и исходный размер частиц металла, на конечные размеры частиц в продуктах горения.

Для изучения структуры поверхности горения топлив был разработан кинематографический метод, обеспечивающий возможность съемки отдельных фаз быстротечных явлений и процессов. Сжигание образца проводилось в условиях бомбы постоянного давления (диапазон давлений от 10 мм рт. ст. до 40 атм). Поверхность горения фотографировалась кинокамерами «Конвас» и СКС под различными углами (до 45°С). Такое расположение камеры позволяет повысить контраст изображения, что