

где

$$\gamma_1 = \nu_1 k_{t1} (T_k - T_0)_1 \frac{\tau_{n1}}{\tau_k}; \quad \gamma_2 = \nu_2 k_{t2} (T_k - T_0)_2 \frac{\tau_{n2}}{\tau_k}.$$

Таким образом, если учитывать нестационарность зоны горения, то условие устойчивости (18) требует, чтобы числитель и знаменатель имели разные знаки. При положительном знаменателе условие устойчивости полностью совпадает с ранее полученным условием (12), в чем легко убедиться.

Для известных топлив ν_1 и ν_2 обычно меньше единицы, так что условие (12) выполняется. При этом устойчивость работы двигателя к малым возмущениям определяется неравенством

$$1 - \gamma_1 + R(1 - \gamma_2) > 0 \quad (19)$$

и в сильной степени оказывается зависящей от соотношения между временами релаксации топлив и камеры. По мере выгорания топлива τ_k растет и неравенство (19) только усиливается. Повышение рабочего давления в камере сгорания и начальной температуры топлив способствует улучшению устойчивости.

*Поступила в редакцию
20/VI 1970*

ЛИТЕРАТУРА

1. Я. Б. Зельдович. ПМТФ, 1963, 1.

УДК 536.46 + 662.62

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА В КОМБИНИРОВАННОМ РАКЕТНОМ ДВИГАТЕЛЕ

*В. В. Воробей
(Москва)*

Обзор современных исследований процесса горения комбинированных систем показывает, что при использовании аналогии Рейнольдса между массопереносом, теплопереносом и переносом количества движения, параметра массообмена Сполдинга и эмпирических данных по пограничному слою можно получить математическую модель для скорости горения твердого компонента топлива, которая удовлетворительно согласуется с имеющимися данными для простых «гибридных» систем в области малых расходов окислителя [1—4].

Однако лимитируемое диффузией сгорание в турбулентном пограничном слое требует некоторой модификации классической модели диффузионного пламени. Наблюдения структуры пламени и тот факт, что скорости реакций конечны, приводят к заключению, что химические реакции происходят в тонкой зоне, где температура и концентрация компонентов претерпевают резкие изменения. В связи с этим исследование кинетики зоны горения в турбулентном пограничном слое приобретает

исключительное значение. Очевидно, что только рациональное использование факторов газовой динамики и кинетики позволит получить математическую модель, отвечающую экспериментальным результатам в широком диапазоне изменения параметров рабочего процесса. Такое теоретическое исследование, проведенное автором, дает хорошее совпадение с результатами эксперимента. В работе рассматривалась плоская двухмерная задача течения в канале комбинированного ракетного двигателя с горением.

Теоретическое исследование

Физическая модель процесса. В турбулентном пограничном слое (рис. 1) над поверхностью твердого топлива образуется растянутая зона диффузионного горения, в которой происходит сгорание продуктов газификации с дополнительным окислителем, вводимым в камеру сгорания. Интенсивность тепловыделения в ней и передача тепла, определяющие скорость уноса массы с поверхности заряда твердого топлива, полностью лимитируются процессами, протекающими в газовой фазе зоны горения. Поток окислителя на входе равномерный, подвод его в зону реакции осуществляется за счет турбулентной диффузии. Продукты разложения твердого топлива попадают в зону горения за счет диффузии и конвекции, двигаясь почти нормально к пламени.

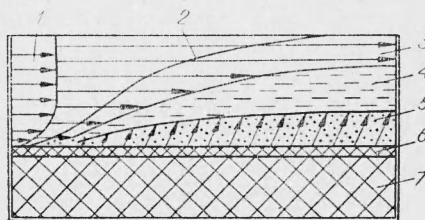


Рис. 1. Модель процесса горения в пограничном слое.

1 — поток окислителя; 2 — граница пограничного слоя; 3 — зона диффузии окислителя; 4 — зона горения; 5 — зона газификации горючего; 6 — зона прогрева горючего; 7 — твердое горючее.

Взаимодействие реагирующих веществ в зоне горения описывается уравнениями реакции второго порядка. Толщина диффузионного пламени внутри зоны горения определяется одновременно диффузией и скоростью химических реакций.

Математическое выражение для скорости горения твердого компонента топлива. При выводе математической модели для скорости горения использованы решения интегральных уравнений движения, энергии и расхода для определения параметров турбулентного пограничного слоя, уравнение сохранения вещества для определения толщины зоны реакции и решение для суммарной скорости образования компонента в зоне пламени. Считается, что при стационарном процессе горения массовые скорости процессов образования продуктов сгорания, газификации и продуктов подготовительной зоны равны. При выводе использованы эмпирические данные по пограничному слою со вдувом вещества.

Уравнение для массовой скорости горения твердого компонента получено в виде

$$m_r = \frac{P_0^0}{\frac{\alpha L_0}{K_g} + \frac{r^*}{K_{пл}}}, \quad (1)$$

где коэффициент переноса K_g выражается через динамические параметры пограничного слоя

$$K_g = \frac{\alpha L_0 B_0 \rho_T u_0 St_0}{P_0^0 - P_0^*}, \quad (2)$$

а величина $K_{пл}$, связывающая скорость горения с давлением (аналогично зависимости, полученной в работе [4]), выражается через осредненные параметры зоны пламени

$$K_{пл} = K_2^{-0.5} C_0^{*4/3} C_r^{*4/3} \mu_r. \quad (3)$$

Величина $u_0 St_0$ в (2) при показателе степени в законе изменения энгалпии в пограничном слое $n_{T_0} = 7$ принимается

$$u_0 St_0 = 0,332 \left(\frac{\nu_{r_0}}{\nu_0} \right)^{0,2} \frac{u_{00} \xi^{0,2} (1 + \xi \bar{x})}{Pr_T^{0,6} Re_{y_0}^{0,2} (1 + \psi_{l_0})^{0,2} [(1 + \xi \bar{x})^2 - 1]^{0,2}}, \quad (4)$$

где $Re_{y_0} = u_{00} y_0 / \nu_0$. В результате окончательное выражение для массовой скорости горения твердого компонента, представляющее собой сложную зависимость последней от целого ряда газодинамических и кинетических факторов, имеет вид

$$m_r = \frac{0,332 r_0^0 P_n \rho_T \left(\frac{\nu_{T_0}}{\nu_0} \right)^{0,2} \frac{\xi^{0,2} (1 + \xi \bar{x}) B_0 u_{00}}{Pr_T^{0,6} Re_{y_0}^{0,2} (1 + \psi_{l_0})^{0,2} [(1 + \xi \bar{x})^2 - 1]^{0,2}}}{(r_0^0 - r_0^*) P_n + \frac{0,332 r_0^* \nu_{T_0}^{0,2} \xi^{1,2} (1 + \xi \bar{x}) \rho_T B_0 u_{00}}{K_{пл} \nu_0^{0,2} Pr_T^{0,6} Re_{y_0}^{0,2} (1 + \psi_{l_0})^{0,2} [(1 + \xi \bar{x})^2 - 1]^{0,2}}}. \quad (5)$$

При исследовании выражения (5) для скорости горения как функции ряда зависимых переменных, рассматривая некоторые малоизменяющиеся переменные как не вполне определенные постоянные, можно получить характеристические уравнения, показывающие зависимости скорости горения от основных параметров рабочего процесса, при этом точность последних может быть увеличена методом последовательных приближений.

Характеристическая зависимость скорости горения от расхода окислителя и давления в камере сгорания комбинированного двигателя в обобщенных параметрах может быть представлена как

$$m_r = f \bar{G}^{0,8} + \bar{G} - f \bar{G}^{1,8} \bar{P}^{-1}, \quad (6)$$

где $\bar{G} = \eta G_0$; $\bar{P} = P_n / \beta_2$ — обобщенные параметры по расходу и давлению; $f = \beta_1 / \eta^{0,8}$ — приведенный коэффициент; η_1 , β_1 , β_2 — численные коэффициенты, определенные для конкретной комбинации окислитель—горючее.

Численные коэффициенты определяются такими химико-физическими характеристиками топливной композиции, как молекулярный вес, вязкость, стехиометрическое соотношение компонентов, геометрические характеристики течения и т. д.

Исследование уравнения (6) показывает, что зависимость $m_r = F(\bar{G})$ при $\bar{P} = \text{const}$ вначале возрастающая, при $\bar{G} = 0$ и некотором значении $\bar{G}_{пред} m_r = 0$.

Величина \bar{G}_m , соответствующая максимуму функции $m_r(\bar{G})$, определяется уравнением пятой степени

$$0,8f + \bar{G}_m^{0,2} - 1,8f \bar{G}_m \bar{P}^{-1} = 0, \quad (7)$$

а величина $\bar{G}_{пред}$ — аналогичным уравнением

$$f + \bar{G}_{пред}^{0,2} - f \bar{G}_{пред} \bar{P}^{-1} = 0. \quad (8)$$

На рис. 2 в логарифмических координатах представлена графическая зависимость величины m_r от приведенных расхода и давления. Видно, что ввод дополнительного окислителя при некотором увеличении его расхода первоначально вызывает рост скорости горения твердого компонента топлива. Дальнейшее увеличение расхода приводит к уменьшению скорости горения, при этом при достаточно большом m_r расходе последняя может быть сведена к нулю. Максимум $m_r = F(\bar{G})$ при $P = \text{const}$ соответствует наибольшему тепловому потоку в стенку твердого горючего при оптимальном соотношении окислитель—горючее. Снижение скорости выгорания объясняется увеличением теплоотвода в непрореагировавший окислитель. Увеличение же давления при $\bar{G} = \text{const}$ вызывает рост скорости горения.

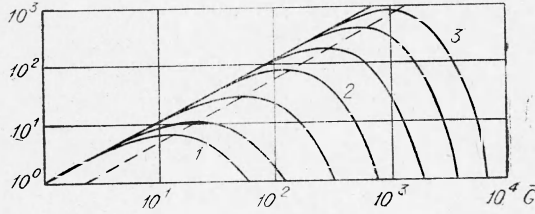


Рис. 2. Зависимость скорости горения твердого компонента топлива от приведенного расхода и давления; $m_r = \chi \bar{G}^{0,8} + \bar{G} - \chi \bar{G}^{1,8} P^{-1}$ ($\chi = 0,1$).

1 - $\bar{P} = 1$; 2 - $\bar{P} = 10$; 3 - $\bar{P} = 10^2$.

Следует отметить, что анализ основной формулы позволяет сделать вывод о том, что в определенных диапазонах изменения давления и расхода выражение для скорости горения с достаточной степенью точности можно заменить весьма простыми выражениями, аналогичными получаемым опытным путем. Такими уравнениями, коэффициент в которых учитывает, в частности, и форму канала, удобно пользоваться при расчете характеристик двигателя. Из анализа уравнения (6) для возрастающей части кривой $m_r(\bar{G})$ в диапазоне от $\bar{G} = 0$ до $\bar{G} = \left(\frac{\bar{P}}{f}\right)^{1,25}$ при условии $f \gg 1$ возможна аппроксимация зависимости

$$m_r = f \bar{G}^{0,8}. \quad (9)$$

При этом максимальная относительная ошибка замены формулы (6) формулой (9) в указанных пределах будет равна

$$\delta_{\max} = \frac{4}{9} \frac{1}{f^{1,25}} \left(\frac{\bar{P}}{1,8}\right)^{0,25} \cdot 100\%.$$

В случае $f \ll 1$ возможна аппроксимация

$$m_r \approx \bar{G} \quad (10)$$

в указанных пределах, а для f , близкого к единице:

$$m_r = f \bar{G}^{0,8} + \bar{G}. \quad (11)$$

Расчетами показано, что в большинстве случаев оказывается $f \gg 1$.

В диапазоне от $\bar{G} = \bar{P}$ до $\bar{G} = \left(\frac{\bar{P}}{f}\right)^{1,25}$ при максимальной относительной ошибке $\delta_{\max} = \left(\frac{f \bar{G}^{0,8} + \bar{G} - f \bar{G}^{1,8} \bar{P}^{-1}}{\bar{P}} - 1\right) \cdot 100\%$ возможна аппроксимация

$$m_r = \varphi \bar{P}. \quad (12)$$

Анализ выражения (5) позволяет определить характер изменения скорости выгорания по длине заряда. Из него следует, что характер функции $m_r = F(\bar{x})$ вначале убывающий с точкой минимума и затем возрастающий. Минимальной скорости сгорания соответствует

$$\bar{x}_{m_{r\min}} = \frac{0,29}{\xi}.$$

В соответствии с принятой физической моделью точка минимума скорости выгорания соответствует максимальному удалению диффузионного фронта пламени от поверхности горючего, т. е. полному затоплению поперечного сечения канала пограничным слоем.

Некоторые результаты экспериментального исследования

Экспериментальная проверка результатов теории была проведена в двухкамерной камере сгорания прямоугольного сечения с системой автоматической подачи твердого горючего в зону горения. На рис. 3, а, б

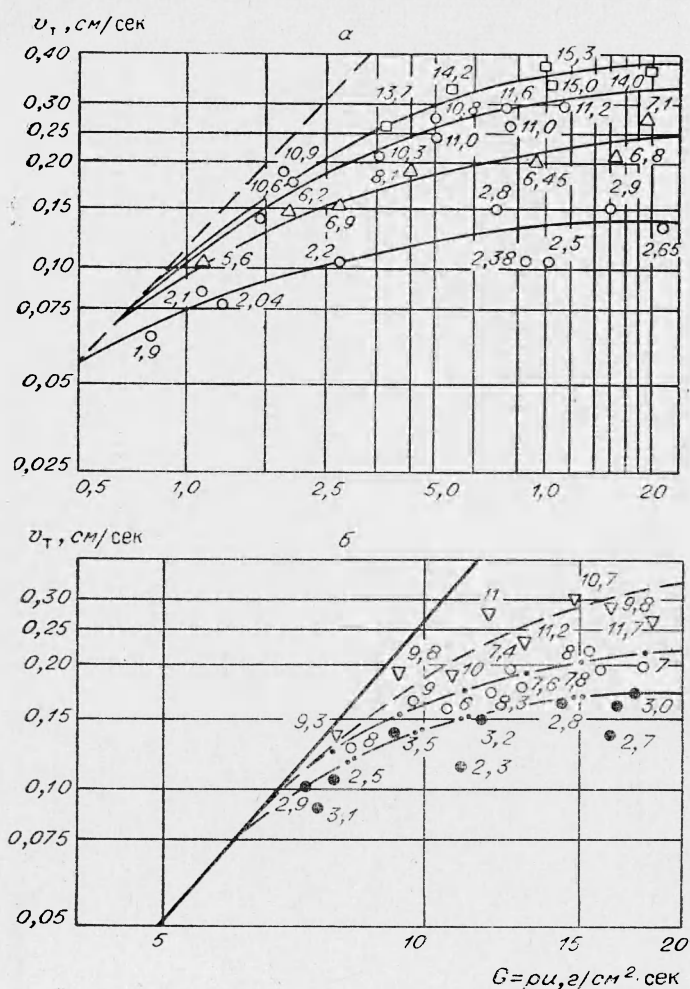


Рис. 3. Влияние расхода окислителя (воздух) и давления в камере сгорания на скорость горения 35% Al-Mg (а) и 75% Mg (б). Цифры у точек — давление в кг/см².

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. S moot, C. F. Price. AIAAJ. 1965, 3.
3. L. D. S moot, 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 —