

УДК 536.3+621.438

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА СТАБИЛИЗАЦИИ ПЛАМЕНИ В ПОТОКЕ АЛЮМИНИЕВО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ

©2013 А. Г. Егоров, А. С. Тизилов

Тольяттинский государственный университет

На основе контактной модели представлены результаты исследования механизма стабилизации пламени в потоке алюминийно-воздушной смеси.

Стабилизация, контактная модель, зона рециркуляции, воспламенение, скорость потока.

Введение

Для большинства горелочных устройств, где имеет место турбулентное течение горючего и окислителя, скорость на входе в камеру сгорания значительно больше, чем скорость распространения пламени. В связи с этим для поддержания стационарного распространения пламени необходимо наличие постоянного источника поджигания. Чаще всего практикуется стабилизация пламени аэродинамической стабилизацией, основанной на создании за телом плохообтекаемой формы или в канале с внезапным расширением зоны рециркуляции (ЗР), которая является источником постоянного подвода тепла для свежей горючей смеси [1].

В общем случае, стабилизация пламени осуществляется за счёт взаимодействия основного потока горючей смеси с ЗР, при котором поддерживается баланс между количеством теплоты, необходимым для зажигания основного потока горючего, и количеством теплоты, передаваемым из ЗР. Аэродинамическая стабилизация пламени подразумевает зажигание свежей смеси от стационарного источника поджигания в области, где имеет место равенство скоростей набегающего потока свежей смеси и распространения пламени. На рис. 1 представлена схема аэродинамической стабилизации пламени в канале с внезапным расширением. При скорости набегающего потока ω

устойчивое распространение пламени будет происходить до тех пор, пока не нарушится условие равенства скоростей набегающего потока ω и распространения фронта пламени U_n . При $\omega < U_n$ будет наблюдаться проскок пламени, при $\omega > U_n$ будет происходить срыв пламени.

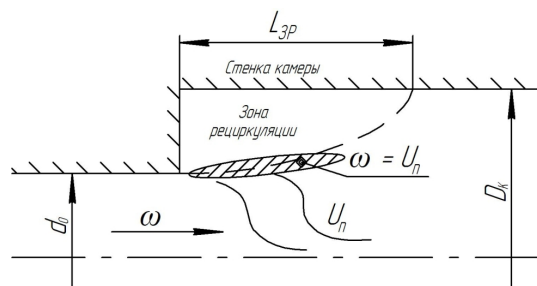


Рис. 1. Схема аэродинамической стабилизации пламени в канале с внезапным расширением

Теория стабилизации пламени, предложенная В.Ф. Дунским [2], основана на учёте соотношения между временем соприкосновения элементарных объёмов свежей смеси с продуктами сгорания ЗР, т.е. временем контакта τ_k свежей смеси с ЗР и временем задержки воспламенения $\tau_{вп}$, необходимым для нагрева смеси до температуры воспламенения. Стабильное распространение пламени будет наблюдаться при соотношении $\tau_k/\tau_{вп} \geq 1$.

Целью настоящей работы является исследование механизма стабилизации пламени в высокоскоростном потоке алюминийно-воздушной смеси на основе контактной модели.

Расчёт времени контакта частицы алюминия с зоной рециркуляции

Проведёнными исследованиями [3] установлены основные факторы, воздействующие на аэродинамику потока алюминиево-воздушной смеси, и выявлены закономерности влияния каждого фактора: диаметра частиц порошка алюминия; геометрических размеров канала с внезапным расширением D_K, d_0 ; скорости набегающего потока горючей смеси ω . Факторами, определяющими τ_K , являются: длина ЗР $L_{ЗР}$, диаметр частицы порошка d_{32} и скорость набегающего потока ω . Размер ЗР является функцией от геометрических параметров канала с внезапным расширением $L_{ЗР} = f(D_K; d_0)$ [4]. С ростом степени расширения канала D_K/d_0 осуществляется увеличение длины ЗР, что способствует повышению времени контакта. Увеличение диаметра частиц алюминия вследствие большей инерционности также приводит к повышению τ_K .

Поскольку τ_K зависит от скорости, с которой движется частица, и длины ЗР, следовательно с увеличением скорости набегающего потока горючей смеси τ_K пропорционально уменьшается. Изменение траектории движения частиц вследствие соударения друг с другом незначительно влияет на τ_K , поэтому влиянием концентрационного состава смеси на время контакта можно пренебречь.

Учитывая влияние каждого фактора на τ_K , была получена формула

$$\tau_K = \frac{d_{32}}{\omega \cdot K} \cdot \left(1 - \frac{d_0}{D_K}\right), \quad (1)$$

где $K = 3,3 \cdot 10^{-5}$ для порошка марки АСД-1; $K = 2,0 \cdot 10^{-5}$ для порошка марки АСД-4.

Воспламенение алюминиево-воздушной смеси

Согласно установленным представлениям за температуру воспламенения принимается та минимальная температура частиц или среды, при которой тепловыделение за счёт реакции окисления металла превышает теплотери в окружающее пространство, и температура частицы начинает возрастать с увеличивающейся скоростью [6]. Время прогрева частиц металла от начальной температуры, при которой начинает выполняться указанное условие, и определяет время задержки воспламенения. Основными параметрами, определяющими время задержки воспламенения одиночной частицы алюминия в продуктах сгорания гетерогенных конденсированных систем, является температура газового потока и гранулометрический состав порошка алюминия. Известно [6], что для одиночной частицы алюминия прогрев от начальной температуры T_0 до критической температуры $T_{п}^{кр}$ (близкой к точке плавления окиси алюминия) осуществляется теплопроводностью от среды с температурой $T_{п}$ в тонком пограничном слое, окружающем частицу. Выражение для времени задержки воспламенения

$$\tau_{ВП}^0 = 3,33 \cdot \frac{C_m \cdot \rho_m}{\lambda_g} \cdot \frac{R^2}{1+0,27 \cdot Re^{0,5}} \cdot \ln \left[\frac{T_{п}-T_0}{T_{п}-T_{п}^{кр}} \right], \quad (2)$$

где ρ_m – плотность частицы; C_m – удельная теплоёмкость частицы; R – радиус частицы; λ_g – теплопроводность газа; Re – число Рейнольдса; $T_{п}$ – температура среды.

Например, для частицы алюминия с $d_{32} = 17,4$ мкм при скорости потока $\omega = 70$ м/с время задержки воспламенения будет составлять 3,42 мс. С учётом того, что время воспламенения потока алюминиево-воздушной смеси $\tau_{ВП}$ зависит от физико-химического состава частиц алюминия и концентрации частиц

в зоне реакции, при этом $\tau_{\text{вп}}$ смеси будет меньше по отношению ко времени воспламенения одиночной частицы алюминия $\tau_{\text{вп}}^0$ за счёт диффузионного теплообмена между частицами. Тогда уравнение для $\tau_{\text{вп}}$ смеси запишется в виде

$$\tau_{\text{вп}} = \tau_{\text{вп}}^0 \cdot [(\alpha - 1.1)^2 + 1]. \quad (3)$$

По условию стабилизации время контакта частиц алюминия с ЗР $\tau_{\text{к}}$ должно быть больше времени задержки воспламенения алюминиево-воздушной смеси $\tau_{\text{вп}}$ при различных значениях скорости потока и состава смеси. Тогда для фиксированных значений параметров канала с внезапным расширением при однородном физико-химическом составе порошка алюминия $\tau_{\text{к}}$ будет являться функцией скорости потока ω ; а $\tau_{\text{вп}}$ – функцией скорости потока и состава смеси α . На основании вышеизложенного запишем граничное условие срыва пламени алюминиево-воздушной смеси

$$\tau_{\text{к}}(\omega) = \tau_{\text{вп}}(\alpha; \omega). \quad (4)$$

Экспериментальное определение времени контакта частиц алюминия с зоной рециркуляции

Схема экспериментальной установки подробно описывается в [7]. Определение длины ЗР проводилось методом холодных продувок в канале с внезапным расширением.

В [4] установлено, что длина ЗР при холодных продувках в 1,4 раза меньше, чем в случае с горением алюминиево-воздушной смеси при равных прочих условиях. Основываясь на данных работы [3] о зависимости скорости срыва пламени от состава смеси в диапазоне изменения $0,5 < \alpha < 2,5$, с использованием полученной длины ЗР методом холодных продувок были установлены пределы стабилизации высокоскоростного потока алюминиево-воздушной смеси в виде зависимости $\tau(\alpha)$, где τ – это граничное время, при котором $\tau_{\text{к}} = \tau_{\text{вп}} = \tau$.

Анализ результатов

На рис. 2 представлена расчётная и экспериментальная зависимости $\tau_{\text{к}}$ на границе устойчивого распространения пламени от состава смеси. Видно, что $\tau_{\text{к}}$, достаточное для надёжного воспламенения потока алюминиево-воздушной смеси, уменьшается при приближении к стехиометрическому составу. По мере отклонения состава смеси от стехиометрического ($\alpha \neq 1$) время воспламенения потока горючего увеличивается, вследствие чего условия стабилизации пламени ухудшаются.

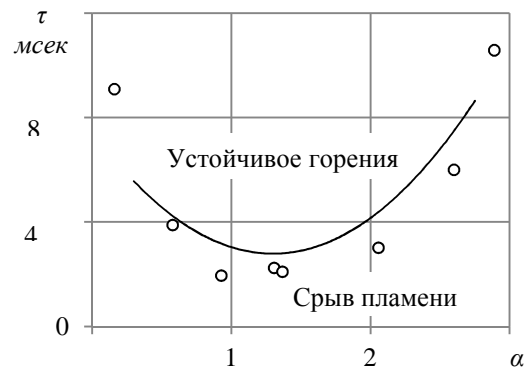


Рис. 2. Зависимость времени контакта частиц алюминия с ЗР от состава смеси:

○ - экспериментальные данные [4];
— - расчётные данные по формулам (1), (3)

Установлено [3], что для порошкообразного алюминия так же, как и для газообразных и жидких топлив, для стабилизаторов в виде плохо обтекаемых тел существуют оптимальные с точки зрения стабилизации значения затенения сечения. Затенение сечения $f_{\text{ст}}$ – отношение площади миделевого сечения стабилизатора к площади канала с внезапным расширением – позволяет рассчитывать оптимальные параметры плохо обтекаемого тела и подбирать смесь подходящего состава для надёжной стабилизации пламени в высокоскоростном потоке воздуха.

Для канала с внезапным расширением параметром затенения сечения является отношение площади характерного размера стабилизатора ($H = D_{\text{к}} - d_0$) к площади выходного отверстия канала (см. рис. 1):

$$f_{ст} = \frac{S_k - S_0}{S_k} = 1 - \frac{d_0^2}{D_k^2}, \quad (6)$$

где S_0 – площадь поперечного сечения входного отверстия канала диаметром d_0 ; S_k – площадь поперечного сечения выходного отверстия канала D_k .

Из формул (1), (3), (4) получена зависимость максимальной скорости набегающего потока смеси, при которой происходит срыв пламени от затенения сечения канала $\omega_{ср}(f_{ст})$.

На рис. 3 представлены расчётные и экспериментальные данные зависимости $\omega_{ср}(f_{ст})$. Видно, что увеличение размеров стабилизатора в значительной мере увеличивает устойчивость процесса распространения пламени алюминиево-воздушной смеси.

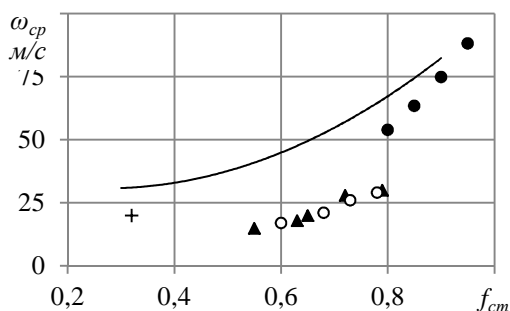


Рис. 3. Влияние $f_{ст}$ на скорость срыва пламени:
 ● – канал с внезапным расширением [3];
 ▲ – пластина с центральным отверстием диаметром 33 мм в канале 62 × 62 мм;
 ○ – перфорированная пластина: сотовое расположение отверстий диаметром 7,3 мм [9];
 + – плохообтекаемое тело (конус) [10];
 — – расчётная кривая

При исследовании контактной модели стабилизации алюминиево-воздушного пламени диапазон состава смеси $\alpha < 0,3$ не рассматривался, так как в этом случае протекает экзотермическая реакция азотирования, требующая проведения дополнительных исследований для описания механизма стабилизации.

Библиографический список

1. Талантов, А.В. Основы теории горения [Текст] / А.В. Талантов – Казань. – 1975. – 253 с.
2. Дунский В.Ф. Исследование

стабилизации пламени в следе за плохообтекаемым телом [Текст] / М.: ЦИАМ. – № 208. – 1951. – 9 с.

3. Егоров, А.Г. Процессы горения порошкообразного алюминия в прямоточных камерах реактивных двигательных установок [Текст] / А.Г. Егоров – Самара. – 2004. – 376 с.

4. Егоров, А.Г. Время пребывания частиц алюминия в камерах сгорания с внезапным расширением [Текст] / А.Г. Егоров // Химическая физика. – 2003. – Т. 22. – № 11. – С. 54–63.

5. Горение порошкообразных металлов в активных средах [Текст] / П.Ф. Похил, А.Ф. Беляев, Ю.В. Фролов [и др.]. – М.: Наука, 1972. – 294 с.

6. Малинин, В.И. Воспламенение и горение аэрозвеси алюминия в реакторе высокотемпературного синтеза порошкообразного оксида алюминия [Текст] / В.И. Малинин, Е.И. Коломин, И.С. Антипин // Физика горения и взрыва. – 2002. – Т. 38. – № 5. – С. 41–51.

7. Егоров, А.Г. Определение времени пребывания гетерогенного топлива в зоне обратных токов [Текст]/А.Г. Егоров, М.М. Русаков, А.П. Шайкин // Изв. вузов. Авиационная техника. – 1999. – №2. – С. 69–71.

8. Ягодников, Д.А. Распространение пламени по аэрозвеси алюминия при пониженных давлениях [Текст] / Д.А. Ягодников, А.В. Воронежский, В.И. Лапицкий // Физика горения и взрыва. – 1995. – Т. 31. – № 5. – С. 23–31.

9. Ягодников, Д.А. Организация процессов воспламенения и горения порошкообразных металлов в камерах сгорания реактивных двигательных установок [Текст]: автореф. дис. д-ра техн. наук / Д.А. Ягодников. – М.: МГТУ. 1998. – 32 с.

10. Ягодников, Д.А. Влияние внешнего электрического поля на горение аэрозвеси частиц алюминия [Текст] / Д.А. Ягодников, А.В. Воронежский // Физика горения и взрыва. – 1998. – Т. 34. – № 6. – С. 23–28.

STUDY OF THE MECHANISM OF FLAME STABILIZATION IN ALUMINUM-AIR MIXTURE

© 2013 A. G. Egorov, A. S. Tizilov

Togliatti State University

This paper presents a study of the mechanism of stabilization of aluminum-air plume model based on the contact.

Stabilization, contact model, recirculation zone, the ignition, the flow rate.

Информация об авторах

Егоров Александр Григорьевич, доктор технических наук, профессор, Тольяттинский государственный университет. E-mail: eag@tltsu.ru. Область научных интересов: горение порошкообразных металлических горючих в потоке активного газа.

Тизиллов Андрей Сергеевич, аспирант, Тольяттинский государственный университет. E-mail: andrewtizilov@mail.ru. Область научных интересов: внутрикамерные процессы реактивных двигателей летательных аппаратов.

Yegorov Alexander G., Ph.D., Professor of Togliatti State University. E-mail: eag@tltsu.ru. Area of research: powdered metal fuel combustion in the flow of active gas.

Tizilov Andrew S., a graduate student of Togliatti State University. E-mail: andrewtizilov@mail.ru. Area of research: intrachamber processes in aircraft jet engines.