

ВЛИЯНИЕ НАЧАЛЬНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ПОТОКА АЛЮМИНИЕВО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ НА ПРОЦЕССЫ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ И СТАБИЛИЗАЦИИ ПЛАМЕНИ

© 2002 А. Г. Егоров, Э. Э. Маркаров, Д. А. Павлов, А. П. Шайкин

Тольяттинский государственный университет

Исследовано влияние начальной турбулентности потока алюминиево-воздушной смеси на процессы воспламенения и стабилизации пламени в прямооточной камере сгорания с внезапным расширением. Получены экспериментальные данные и определено влияние начальной турбулентности набегающего на стабилизатор потока алюминиево-воздушной смеси на воспламенение, температуру и границы срыва пламени в зависимости от размера частиц алюминия.

Если вопрос о влиянии начальной турбулентности набегающего потока ε_0 на пределы срыва гомогенной горючей смеси решается однозначно, то вопрос влияния ε_0 на устойчивость горения гетерогенных смесей остается открытым. Это обусловлено, во-первых, сложной гидродинамикой двухфазного турбулентного потока и, во-вторых, различием механизмов срыва пламени гомогенных и гетерогенных топливовоздушных смесей [1].

Воспламенение и горение частиц металлов в потоке газообразного окислителя происходит в условиях динамического и теплового взаимодействия реагентов, интенсивного массопереноса при фазовых превращениях, а также характеризуется зависимостью параметров процесса как от кинетических характеристик горючего, так и от гидродина-

мических характеристик газодисперсного потока. Изменение характеристик потока газозвеси (концентрации, дисперсности, скорости, турбулентности и др.), а также условий зажигания будут существенно влиять на развитие процесса горения.

В настоящей статье представлены результаты исследования влияния начальной турбулентности алюминиево-воздушной смеси на процессы воспламенения и стабилизации фронта пламени в прямооточной камере сгорания с внезапным расширением.

Схема модели прямооточной камеры сгорания и гидродинамика течений в ней показана на рис. 1.

В качестве горючего использовались порошки алюминия и алюминиево-магневых сплавов, выпускаемые отечественной промышленностью и соответствующие от-

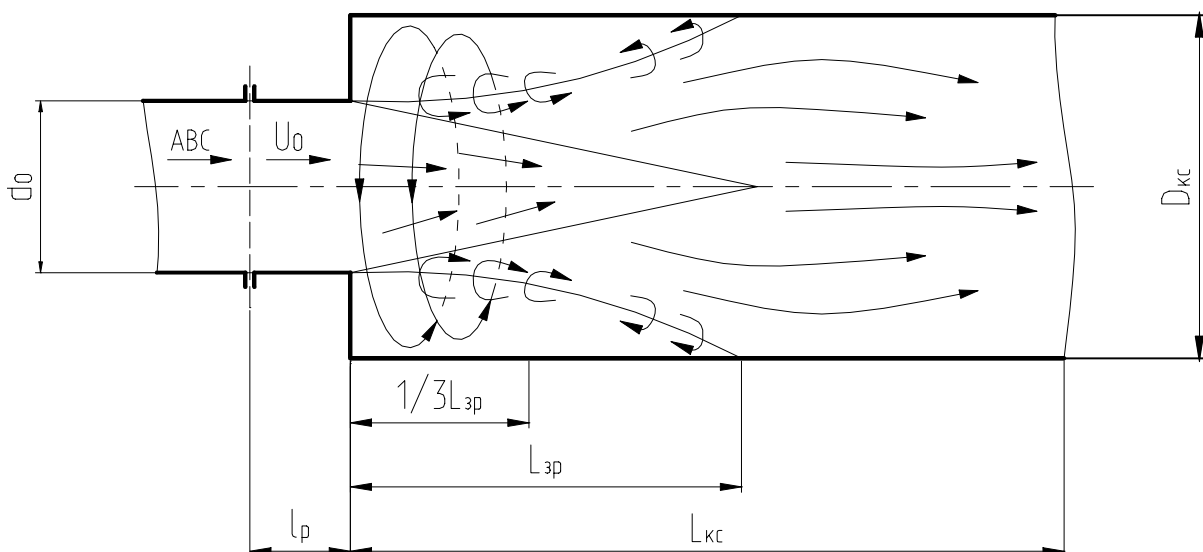


Рис. 1. Схема гидродинамики течений в камере сгорания

раслевному стандарту и техническим условиям на их дисперсный состав.

Характеристики стабилизации пламени определялись посредством проведения серии испытаний с достижением срыва пламени при атмосферном давлении и температуре воздуха $T_b = 293 \text{ К}$.

Поведение твердых частиц в турбулентных потоках является сложным физическим процессом, механизм реализации которого зависит как от концентрации частиц в потоке, так и от их размера [2, 3]. В [4] отмечено, что нет единого мнения о влиянии взвешенных частиц на турбулентные характеристики потока. В общем случае движение несущей среды и твердых частиц невозможно рассматривать независимо друг от друга. Поэтому были проведены исследования структуры течения алюминиево-воздушного потока в модели прямоочной камеры сгорания.

Полученные результаты показали, что при установке решетки на $l_p = 0,057 \text{ м}$ длина зоны рециркуляции увеличивается по сравнению с вариантом без решетки и уменьшается с установкой ее на $l_p = 0,02 \text{ м}$. Это объясняется тем, что в турбулентных двухфазных течениях природа влияния массы твердых частиц на газообразный поток сложна и частицы могут выступать как своеобразные дискретные детурбулизаторы и как дестабилизаторы [4].

Локальные времена пребывания реагентов псевдожидкого топлива в объеме камеры сгорания являются определяющими для процессов воспламенения и стабилизации фронта пламени. Так, например, через соотношение времени пребывания порошкообразного металлического горючего в зоне рециркуляции $\tau_{пр}$ и времени его сгорания τ_r будет определяться тепловое состояние зоны рециркуляции.

С помощью скоростной кино съемки были определены средние значения скорости на оси камеры сгорания для частиц Al марки АСД-1 со средним размером $d_{32} = 17,5 \text{ мкм}$ и АСД-4 с $d_{32} = 7,5 \text{ мкм}$. Полученные значения скорости частиц на оси позволили рассчитать время контакта τ_k ча-

стиц Al с зоной рециркуляции при их движении по линиям тока «определяющей поверхности» по формуле

$$\tau_k = L_{зр} / U_{Al}, \quad (1)$$

где $L_{зр}$ – длина зоны рециркуляции; U_{Al} – средняя скорость частиц Al на линиях тока «определяющей поверхности».

За «определяющую поверхность» была принята цилиндрическая поверхность, диаметр которой равен входному диаметру камеры сгорания d_0 . На рис. 2 показана зависимость $\tau_k = f(l_p)$ для частиц Al горючего марок АСД-1 и АСД-4, полученная в испытаниях на модели камеры с $D_{кк} = 0,042 \text{ м}$. Как видно из рисунка, увеличение ϵ_0 , т. е. установка решетки на расстояние $0,02 \text{ м}$ и $0,057 \text{ м}$ от плоскости внезапного расширения, оказывает неоднозначное влияние на τ_k частиц Al с $d_{32} = 7,5 \text{ мкм}$ и $d_{32} = 17,5 \text{ мкм}$.

С помощью методики, разработанной в [5], и эмпирических значений $\tau_{пр}$, $L_{зр}$, H , U_0 , полученных в опытах, было рассчитано безразмерное время пребывания частиц Al в зоне рециркуляции. Получено, что в холодном потоке при трубной турбулентности $\tau_{пр}$ частиц Al горючего АСД-4 и АСД-1 в зоне рециркуляции прямоочной камеры сгорания с внезапным расширением, так же как и для $\tau_{пр}$ газа, можно определить по формуле

$$\tau_{пр} = K \cdot \frac{H}{U_0}, \quad (2)$$

где H – характерный размер стабилизатора; U_0 – скорость набегающего потока алюминиево-воздушной смеси; K – безразмерное время пребывания ($K = 15,4$ для АСД-4; $K = 29,5$ для АСД-1).

Средний коэффициент турбулентной диффузии зоны рециркуляции с транзитным потоком алюминиево-воздушной смеси так же, как и однородной газовой смеси, можно рассчитать по формуле

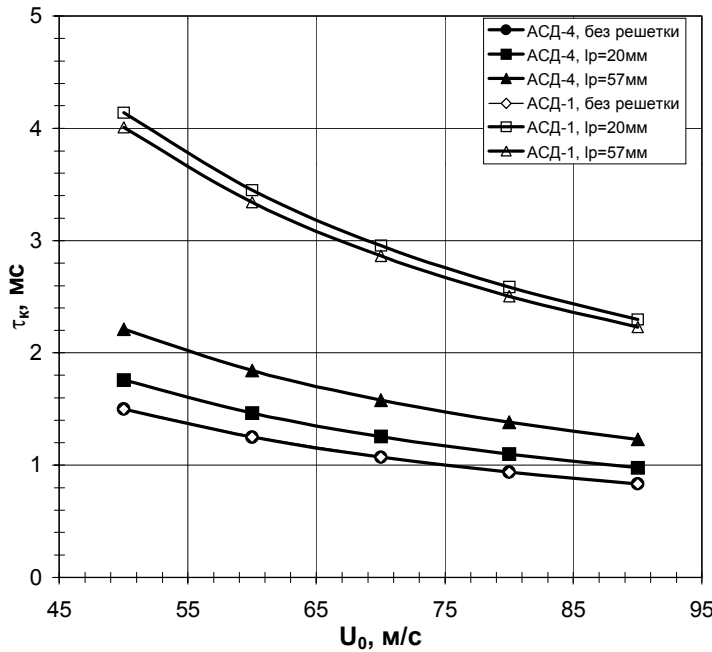


Рис. 2. Зависимость $\tau_{кр} = f(l_p)$
(диаметр камеры сгорания
 $D_{кс} = 0,042$ м)

$$D = \frac{V_{зр} \cdot U_0}{S_{зр} \cdot K}, \quad (3)$$

где $V_{зр}$ – объем зоны рециркуляции; $S_{зр}$ – поверхность зоны рециркуляции; U_0 – скорость алюминиево-воздушной смеси на входе в камеру сгорания; K – безразмерное время пребывания.

В [6] показано, что при горении значение безразмерного времени пребывания K для горючего АСД-1 по сравнению с холодным потоком увеличивается примерно в 2,2 раза. Эта величина для гомогенной топливно-воздушной смеси в двумерном канале с внезапным расширением составляет 2,1 [7]. Из этого следует вывод о том, что и в случае горения процессы тепломассообмена транзитного потока алюминиево-воздушной смеси с зоной рециркуляции также можно оценивать безразмерным временем пребывания K .

Анализ и обработка полученных скоростной киносъемкой экспериментальных данных показали, что для обеспечения воспламенения необходимо создать условия для возникновения начального очага около свечи, переброса пламени в зону рециркуляции и воспламенение алюминиево-воздушной смеси в зоне рециркуляции. Возникновение начального очага будет зависеть от двух конкурирующих процессов: разогрева очага за счет химической реакции и его охлаждения за счет

теплопроводности. Поэтому в критических условиях должно выполняться равенство

$$t_{хр} = t_{охл} = t_{пр} + t_{инд}, \quad (4)$$

где $t_{хр}$ – время химической реакции, $t_{охл}$ – время охлаждения очага теплопроводностью, $t_{пр}$ – время прогрева частицы Al в очаге, $t_{инд}$ – период индукции теплового взрыва.

Условие переброса пламени для псевдожидкого топлива в зоне рециркуляции, так же как и в бензовоздушной смеси [8], может быть описано выражением

$$U_{св}/U_n \leq L_{зр} \cdot (1 - \bar{L}_{св}) / R_{кс} \cdot (1 - \sqrt{B_r}), \quad (5)$$

которое определяется нормальной скоростью распространения пламени (U_n), скоростью потока у свечи ($U_{св}$), размерами зоны рециркуляции ($L_{зр}$), координатой свечи зажигания ($\bar{L}_{св}$) и геометрическими параметрами модели ($R_{кс}$, $B_r = H^2/D_{кс}^2$).

Воспламенение алюминиево-воздушной смеси в зоне рециркуляции, так же как и для гомогенной смеси, может быть обеспечено при выполнении условия

$$\tau_{пр}/\tau_r \geq H \cdot U_n^2 / U_{зр} \cdot a = Mi^{восп}, \quad (6)$$

где τ_r – время горения; $Mi^{восп}$ – критерий Михельсона на границе воспламенения; a – коэффициент температуропроводности.

В ходе испытаний проводились измерения температуры при трубной и повышенной турбулентности как по всему объему камеры, так и локальные измерения температуры в зоне рециркуляции на устойчивых и прерывных режимах. По результатам проведенных измерений были построены профили температур в поперечных сечениях камеры сгорания.

На рис. 3 показано распределение изотерм и профили температур в поперечных сечениях камеры сгорания при трубной и повышенной турбулентности. Из рисунков видно, что максимальная температура в обоих случаях зафиксирована в зоне рециркуляции. Увеличение начальной турбулентности с 5 до 22 % приводит к росту температуры и заметному увеличению объема камеры сгорания с температурой, превышающей 1 300 К, которая необходима для воспламенения частиц алюминия. С увеличением начальной турбулентности также уменьшается неравномерность температурного поля.

Несмотря на отсутствие единой точки зрения относительно механизма влияния турбулентности, совершенно очевидно, что

турбулентность, безусловно, является важным фактором, определяющим стабилизацию фронта пламени, и любая теория независимо от принятой модели должна ее учитывать. Существует несколько предположений относительно механизма влияния турбулентности на стабилизацию пламени. Одни авторы объясняют это влияние увеличением максимальных значений мгновенной скорости потока, обтекающего стабилизатор, другие – уменьшением длины зоны рециркуляции, третьи – увеличением отвода тепла из зоны рециркуляции в активный поток вследствие различного характера зоны контактирования продуктов сгорания и свежей смеси.

На рис. 4 показано влияние роста интенсивности турбулентности ϵ_0 и масштаба турбулентности l_0 на диапазон устойчивого горения псевдожидкого топлива. Из рисунка видно, что для порошкообразного металлического горючего марки АСД-1 с размером частиц $Al d_{32} = 17,5$ мкм увеличение ϵ_0 с 12 до 22 % и l_0 с 0,01 до 0,07 мм приводит к расширению диапазона устойчивого горения как по скорости потока, так и по составу смеси.

Было выявлено, что для одной и той же марки горючего неоднозначное влияние на

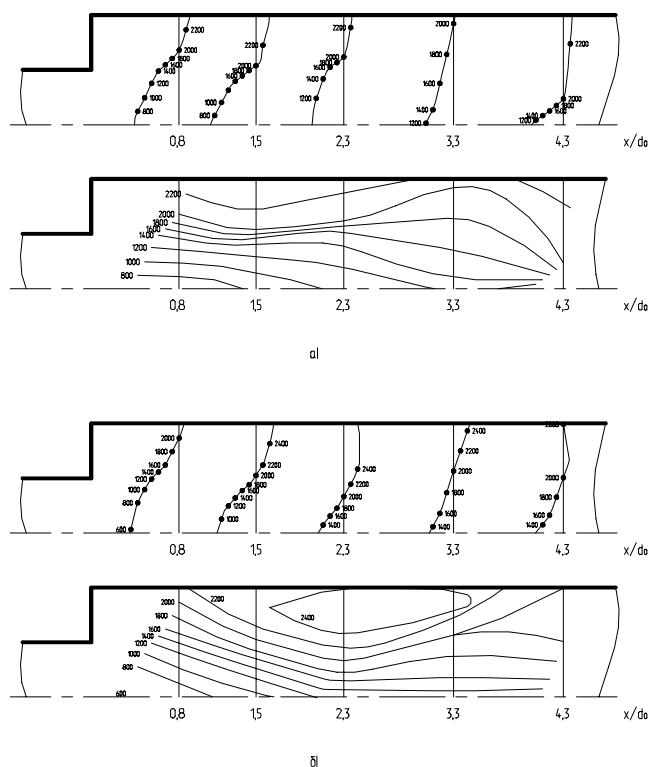


Рис. 3. Температурные поля и профили температур в поперечных сечениях камеры сгорания.

Камера сгорания $D_{кс} = 0,08$ м ; горючее

АМД-50; $\alpha = 0,6$; $U_0 = 70$ м/с ;

а) без решетки ($\epsilon_0 = 5\%$);

б) $l_p = 0,057$ м ($\epsilon_0 = 22\%$)

устойчивость горения оказывает расстояние установки решетки от плоскости внезапного расширения – l_p . При установке решетки в зависимости от l_p происходит как расширение границ устойчивого горения, так и их сужение по сравнению с трубной турбулентностью (рис. 5).

На сегодняшний день не существует единого, четкого мнения относительно тех изменений в параметрах турбулентного следа, которые должны произойти при горении даже гомогенных топливовоздушных смесей, поэтому гидродинамические параметры потока, полученные при наличии пламени, позволили бы более объективно провести анализ основных характеристик горения алюминиево-воздушной смеси. Результаты проведенных исследований позволяют сделать следующие выводы:

1. Увеличение интенсивности турбулентности набегающего на стабилизатор алюминиево-воздушного потока с помощью установки турбулизирующих решеток приводит к изменению локального времени пребывания частиц алюминия в камере сгорания. С ростом начальной турбулентности среднее время пребывания частиц алюминия в транзитном потоке увеличивается как для горю-

чего АСД-4, так и для АСД-1. Время пребывания частиц алюминия в зоне рециркуляции для АСД-1 с $d_{32} = 17,5$ мкм с ростом начальной турбулентности увеличивается. Для АСД-4 с $d_{32} = 7,5$ мкм время пребывания частиц алюминия в зоне рециркуляции увеличивается при установке решетки на расстояние 57 мм от плоскости внезапного расширения и уменьшается при установке ее на расстояние 20 мм.

2. Увеличение начальной турбулентности затрудняет процесс воспламенения горючего марки АСД-4. Горючее АСД-1 при повышенной турбулентности воспламеняется в камерах сгорания диаметром более 0,05 м.

3. С ростом начальной турбулентности набегающего потока псевдожидкого топлива интенсифицируется процесс горения и увеличивается температура в камере сгорания. При увеличении турбулентности локальная температура в зоне рециркуляции для горючего АСД-1 увеличивается и уменьшается для АСД-4.

4. В зависимости от размера частиц алюминия увеличение начальной турбулентности при установке решетки на различные расстояния от плоскости внезапного расширения оказывает неоднозначное влияние на границы срыва пламени.

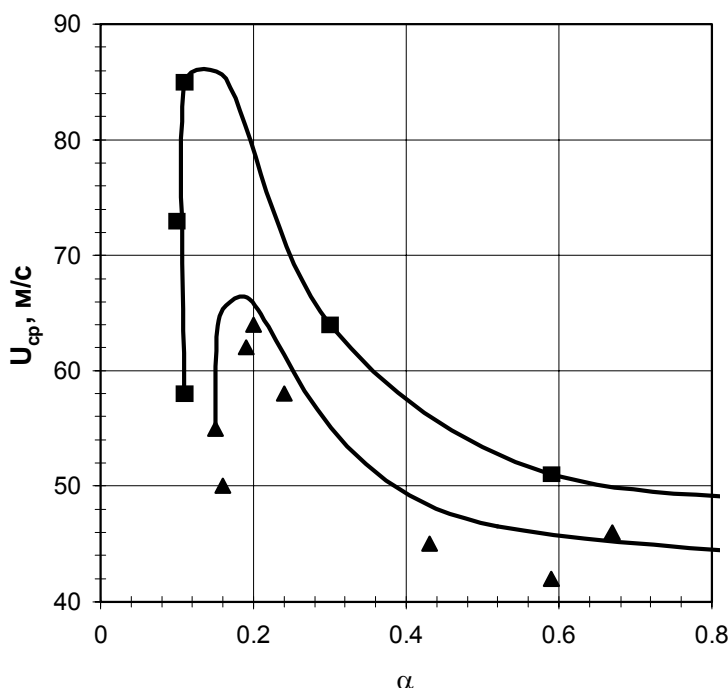


Рис. 4. Влияние интенсивности и масштаба турбулентности на диапазон устойчивого горения.

Камера сгорания $D_{\text{КС}} = 0,06$ м;
горючее АСД-1;

1 – $\varepsilon_0 = 22\%$, $l_0 = 0,07$ мм;

2 – $\varepsilon_0 = 12\%$, $l_0 = 0,01$ мм

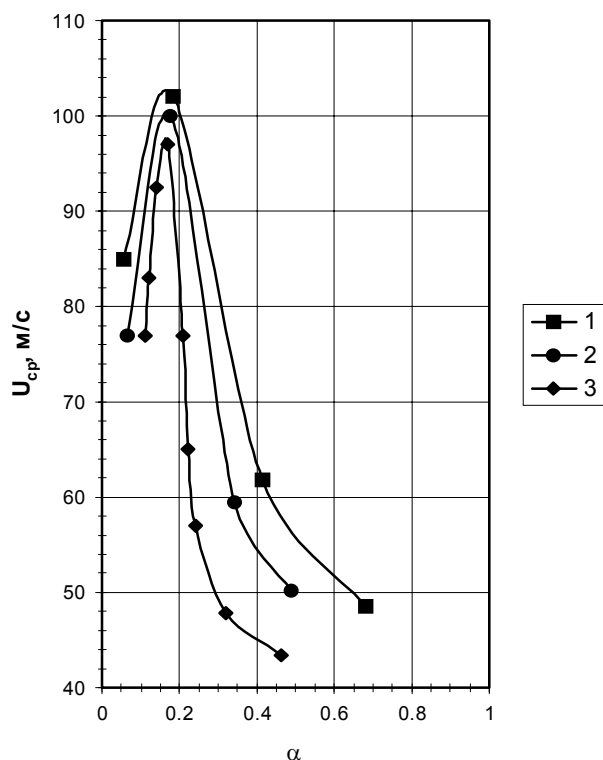


Рис. 5. Влияние параметра l_p на диапазон устойчивого горения.

Камера сгорания $D_{kc} = 0,07$ м; горючее АСД-1;

1 – $l_p = 0,02$ м; 2 – без решетки; 3 – $l_p = 0,057$ м

Список литературы

1. Токарев В. В., Шайкин А. П. О влиянии турбулентности на процесс стабилизации диффузионного пламени. // Изв. вузов. Авиационная техника. 1978, № 2. С. 124-125.

2. Медников Е. П. Турбулентный перенос и осаждение аэрозолей. М.: Наука, 1980. 176 с.

3. Теверовский Е. Н., Дмитриев Е. С. Перенос аэрозольных частиц турбулентными потоками. М.: Энергоатомиздат, 1988. 160 с.

4. Горбис З. Р. Теплообмен и гидромеханика дисперсных сквозных потоков. М.: Энергия, 1970. 424 с.

5. Егоров А. Г. Стабилизация пламени псевдожидкого топлива в камере сгорания с

внезапным расширением.: Дис. канд. техн. наук. – Казань, 1993.

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

7. Левин А. М. Принципы рационального сжигания газа. Л.: Недра. 1977. 247 с.

8. Лукачев В. П., Ланский А. М., Абрашкин В. Ю. и др. Рабочий процесс камер сгорания малоразмерных ГТД, проблемы и некоторые пути повышения его эффективности. // Вест. СГАУ. Сер.: Процессы горения, теплообмена и экология тепловых двигателей. Самара: СГАУ, 1998. С. 11-39.

INFLUENCE OF INITIAL TURBULENCE OF ALUMINUM-AIR MIXTURE FLOW ON IGNITION AND FLAME STABILIZATION PROCESSES

© 2002 A. G. Yegorov, E. E. Markarov, D. A. Pavlov, A. P. Shaikin

Togliatti State University

The influence of initial turbulence of aluminum-air mixture flow on ignition and flame stabilization processes in a ramjet combustion chamber with an abrupt expansion has been investigated. Experimental data have been received and the influence of initial turbulence of aluminum-air mixture flow on the stabilizer on the ignition, temperature and flame failure boundaries has been defined depending on the size of aluminum particles.