

УПРАВЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ГОРЕНИЯ АЛЮМИНИЕВО-ВОЗДУШНОГО ФАКЕЛА В СПУТНОМ ПОТОКЕ ВОЗДУХА

© 2007 А. Г. Егоров, А. Н. Попов

Тольяттинский государственный университет

Представлены результаты экспериментальных исследований характеристик горения алюминиево-воздушного факела и способ управления характеристиками горения факела в спутном потоке воздуха ($M = 0 \dots 0,6$).

Результаты проведенных исследований показали, что геометрическими параметрами и характеристиками горения алюминиево-воздушного факела можно эффективно управлять с помощью кольцевых лопаточных завихрителей с диффузорной насадкой ($S = 1,8 \dots 2,0$).

Скорость горения топлива и, в конечном счете, полнота его выгорания во многом зависят от условий воспламенения частиц и теплового уровня в начальной зоне горения. Одним из наиболее распространенных случаев повышения температуры среды в зоне воспламенения топлива служит рециркуляция части нагретых продуктов сгорания в начальную область зоны горения. Как правило, рециркуляция возникает в результате ввода воздуха закрученной струей, создающей подсос горячих газов в центральную часть зоны воспламенения.

Закрутка потока широко используется в камерах сгорания двигателей ЛА как средство управления размерами пламени, его формой, стабилизацией и интенсивностью горения.

С точки зрения организации процесса горения одно из наиболее существенных и полезных явлений в закрученных струйных течениях - образование приосевой рециркуляционной зоны, которая существенно укорачивает длину факела и расстояние от горелки, на котором происходит стабилизация пламени. Форма и размер рециркуляционной зоны и соответствующей области с повышенным уровнем турбулентности оказывает решающее влияние на устойчивость факела, интенсивность процесса горения и другие характеристики пламени [1].

Поэтому на начальном этапе были проведены исследования влияния геометрических параметров закручивающего устройства на размеры обратных токов за горелочным устройством в изотермических условиях. Было определено влияние формы насадки и количества лопаток завихрителя (параметра закрутки S) на размер и форму зоны обратных токов.

Так, результаты экспериментов при одинаковом параметре закрутке $S = 1,8$ без насадки и с цилиндрической насадкой показали, что длина зоны рециркуляции, полученная с завихрителем без насадки, была 166 мм, с цилиндрической насадкой (длиной 65 мм) - 190 мм.

Этот факт объясняется тем, что в потоке за кольцевым лопаточным завихрителем (с цилиндрической выходной частью) при малых значениях параметра закрутки S образуется длинная тонкая зона обратных токов (при $S \approx 0,7$, $L \approx 3,5d$). По мере роста интенсивности закрутки узкая зона обратных токов удлиняется и достигает максимальной протяженности приблизительно при $S = 1,5 \dots 2,0$, затем при $S > 2$ становится шире и короче [1].

В опытах при том же значении параметра закрутки S с диффузорной насадкой длиной 200 мм и углом раскрытия 60° длина зоны обратных токов составила ~ 350 мм. Следовательно, длина зоны обратных токов с диффузорной насадкой по сравнению с вариантом без насадки увеличилась вдвое. Наши результаты подтверждаются данными [2], где отмечено, что диффузорное сопло, установленное на выходе из закручивающего устройства, значительно увеличивает рециркуляци-

онную зону. Так, диффузор с полууглом раскрытия 35° при относительной длине $L_0/d_2 = 0,7$ увеличивает максимальный диаметр зоны обратных токов более чем в два раза, а при значении $L_0/d_2 = 3$ - более чем в три раза.

На горелочном устройстве с диффузорной насадкой определялось влияние параметра закрутки S на размеры зоны рециркуляции. Было получено, что с увеличением параметра закрутки S от 1,8 до 2,0 длина зоны рециркуляции увеличивается с 350 до 400 мм.

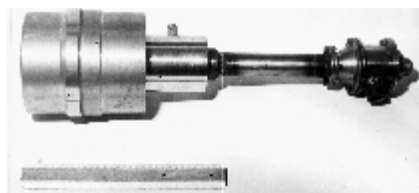
Таким образом, исследования аэродинамической картины течения за горелочным устройством с завихрителем и различными типами насадок показали возможность образования за ними ЦТРЗ, форму, размеры и интенсивность которой можно изменять в широком диапазоне конструкцией насадки и параметром закрутки S .

На рис. 1 показаны горелочные устройства с цилиндрической и диффузорной насад-

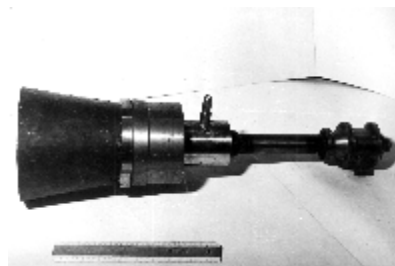
ками, а также конструкция лопаточного завихрителя с прямыми лопатками, расположенными под углом 45° к оси горелки.

Следующий этап исследования заключался в определении эффективности применения завихрительных устройств в условиях работы горелочного устройства в спутном потоке воздуха. Испытания проводились на открытом стенде в условиях окружающей среды, при атмосферном давлении $P_H = 447...450$ мм рт. ст. и температуре $T_H = 27...30$ °С в спутном потоке воздуха, скорость которого изменялась в диапазоне $M = 0...0,6$.

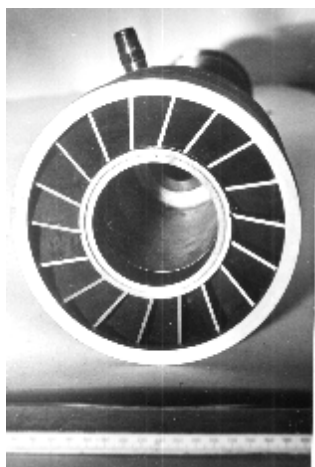
Замер температуры в факеле осуществлялся при помощи тепловизора АГА-680, состоящего из блока камеры, индикатора теплового изображения и индикатора выделенной строки. Экран индикатора выделенной строки фотографировался камерой АНФ с частотой 1 кадр/с. На экране индикатора теплового изображения визуализировалась кар-



а



б



в



г

Рис. 1. Общий вид горелочных устройств: а - горелка с цилиндрической насадкой; б - с диффузорной насадкой; в - вид со стороны среза камеры; г - конструкция завихрительного устройства с прямыми лопатками ($\alpha = 45^\circ$)

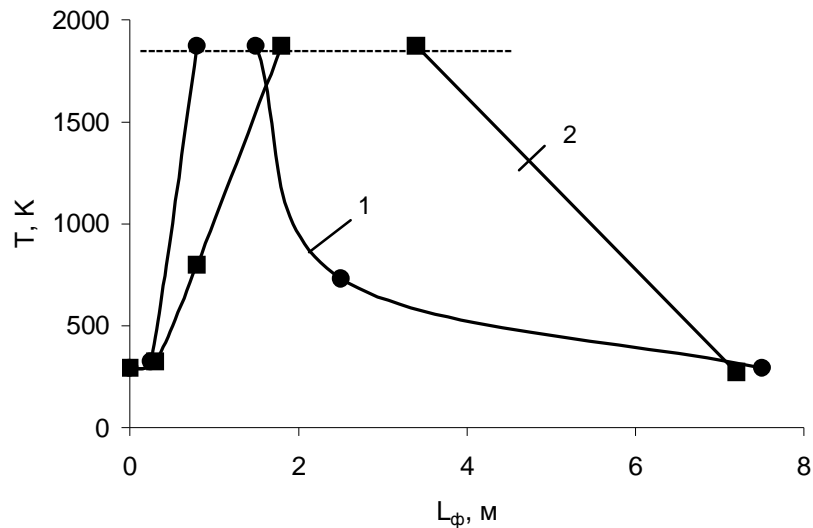


Рис. 2. Изменение температуры на оси факела в зависимости от a :
горючее - АСД-4 + АПС-1 + ПА-1 (в соотношении 10:5:4 по объему)
пунктирная линия - предельное значение температуры, измеряемое тепловизором АГА-680;
1 - $a = 0,7$; 2 - $a = 2,6$

тина относительного распределения температуры в струе (более интенсивный фон соответствовал более высокой температуре). Индикатор выделенной строки обеспечивал визуализацию распределения температуры по оси струи в реальном времени с частотой 16 строк/с.

Следует отметить, что верхний предел измерения температуры для тепловизора АГА-680 составлял 1873 К, тогда как температура пламени, зафиксированная нами методом прожигания вольфрамовых сеток и полученная в [3] пирометрическим способом, превышает 3000 К и соответствует температуре кипения окиси алюминия (3600...3850 К).

В процессе испытаний проводилась также и киносъемка факела.

Изменение температуры на оси затопленного алюминиево-воздушного факела в зависимости от значения a показано на рис. 2.

Из рисунка видно, что максимальные значения температуры на оси факела с ростом a смещаются от среза камеры. Так, при $a = 0,7$ значение температуры $T = 1873 \text{ К}$ зафиксировано на расстоянии 0,5...1,5 м, а при $a = 2,6$ - на расстоянии 1,8...3,8 м от среза камеры.

На рис. 3 показан прямоточный турбулентный алюминиево-воздушный факел в спутном потоке воздуха $M = 0,6$.



Рис. 3. Прямоточный алюминиево-воздушный факел в спутном потоке воздуха $M = 0,6$:
горючее - АСД-4 + АПС-1 + ПА-1 (в соотношении 10:5:4 по объему); $a = 1,2$

Из рисунка видно, что спутный высокоскоростной поток воздуха в нескольких местах «пережимает» факел, который имеет неопределенные очертания и сильно размыт.

Изменение температуры вдоль оси алюминиево-воздушного факела в спутном потоке воздуха с закруткой и без закрутки показано на рис. 4.

Из рисунка видно, что рост температуры в закрученном алюминиево-воздушном

факеле начинался раньше, чем в прямоточном, и длина факела сократилась в 2 раза.

Полученные результаты наших испытаний совпадают с данными [1], где отмечено, что в закрученном факеле смешение происходит быстрее, чем в незакрученном, несмотря на большой поток массы. Распределение температуры по радиусу в первом случае более равномерно, а вдоль оси температура нарастает до больших значений, причем рост

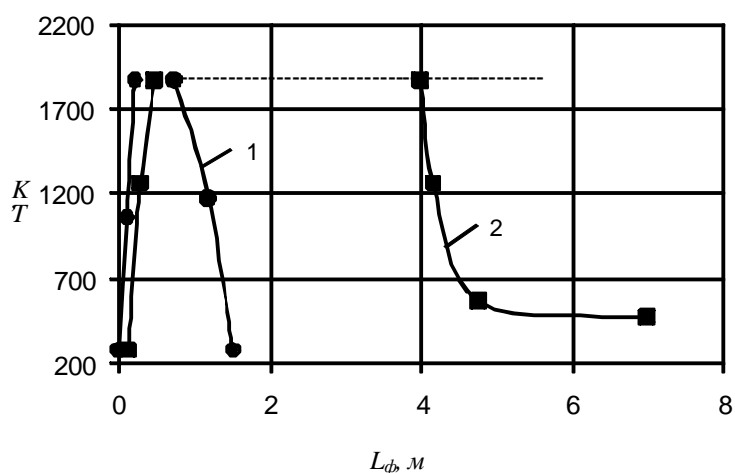


Рис. 4. Изменение температуры на оси факела: горючее - АСД-4 + АПС-1 + ПА-1 (в соотношении 10:5:4 по объему); $a = 2,4$; скорость спутного потока воздуха $M = 0,4$; 1 - закрученный факел $S = 2,0$ (диффузорная насадка); 2 - прямоточный факел

температуры в закрученном потоке начинается раньше, чем в незакрученном, - на расстоянии одного диаметра за срезом горелки.

К сожалению, значение $T = 1873$ К является предельным для тепловизора АГА-680, в силу чего отсутствовала возможность сравнить максимальные значения температур в закрученном и прямоточном алюминиево-воздушном факеле.

Влияние конструктивных параметров горелочного устройства (конструкция насадки) на алюминиево-воздушный факел в спутном потоке воздуха показано на рис. 5.

Из рисунка видно, что применение кольцевых лопаточных завихрителей с прямыми лопатками оказывает благоприятное воздействие на турбулентный алюминиево-воздушный факел в спутном потоке воздуха, поскольку факел существенно сократился по

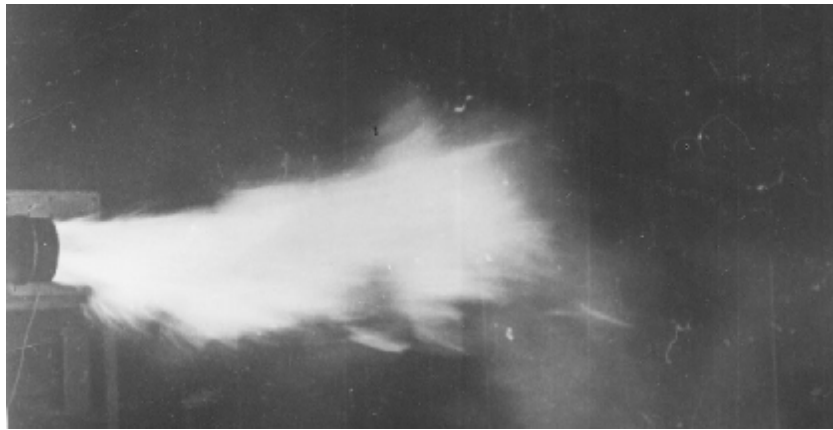
длине, отличается более четкими формами и устойчив к размыванию по сравнению с прямоточным (см. рис. 3).

Также видно, что конструкция насадки влияет на длину и форму факела.

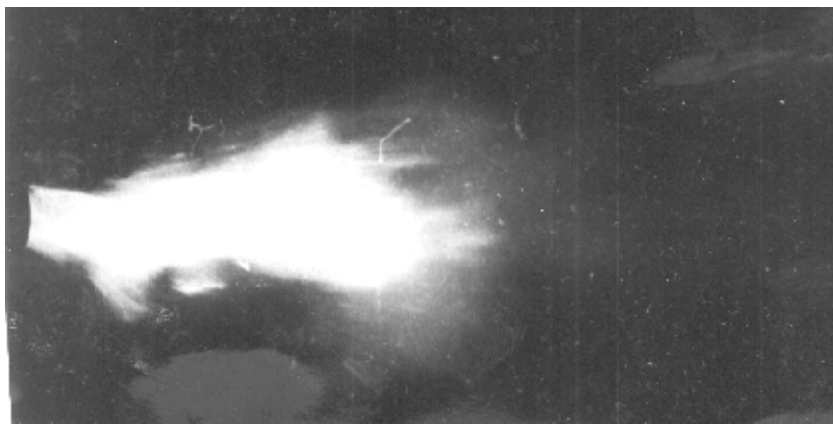
Изменение температуры вдоль оси алюминиево-воздушного факела в зависимости от конструкции насадки и параметра закрутки S показано на рис. 6.

Из рисунка видно, что длина факела в опытах с диффузорной насадкой в сравнении с цилиндрической уменьшается с 2,5 до 1,5 м и нарастание температуры происходит раньше.

Это объясняется тем, что диффузорное сопло значительно увеличивает рециркуляционную зону в диаметре. Поток массы в обратном течении также возрастает, и выгорание факела происходит на более коротком



а



б

Рис. 5. Алюминиево-воздушный факел в спутном потоке воздуха: горючее - АСД-4 + АПС-1 + ПА-1 (в 10:5:4 частях по объему); $M = 0,4$; $a = 2,4$; параметр закрутки $S = 2,0$; а - цилиндрическая насадка; б - диффузная насадка

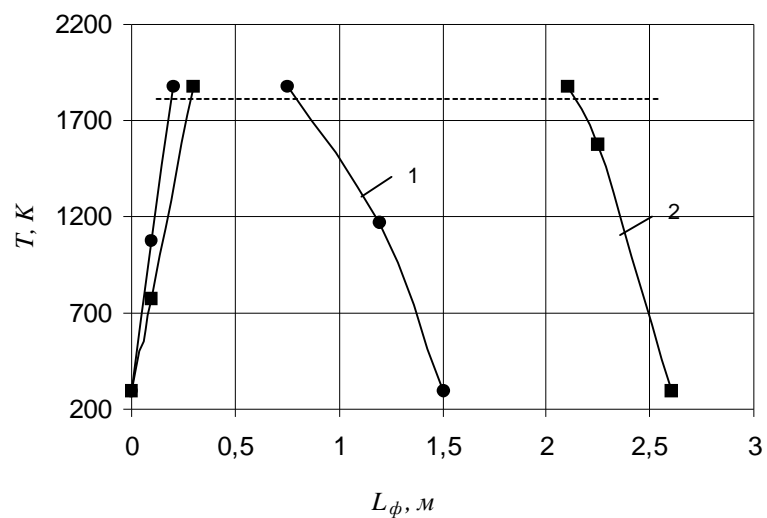


Рис. 6. Зависимость температуры на оси факела от параметра закрутки S и формы насадки: горючее - АСД-4 + АПС-1 + ПА-1 (в соотношении 10:5:4 по объему); $a = 2,4$; $M = 0,4$; 1 - диффузная насадка ($S = 2,0$); 2 - цилиндрическая насадка ($S = 1,8$)

расстоянии от среза горелки. Кроме того, установка диффузора на выходе из закручивающего устройства может приводить к уменьшению коэффициента гидравлического сопротивления на 20 - 30 % [2].

Таким образом, результаты проведенных исследований показали, что геометрическими параметрами и характеристиками сгорания в затопленном алюминиево-воздушном факеле можно управлять посредством изменения a , а в спутном высокоскоростном

потоке воздуха - с помощью кольцевых лопаточных завихрителей.

Список литературы

1. Гупта А.К., Лилли Д. Ж., Сайред Н. Закрученные потоки. - М., 1987. - 588 с.
2. Chigier N. A., Beer J. M., Trans. ASME 86D. J. Basic Eng. № 4. P. 788.
3. Похил П. Ф., Беляев А. Ф., Фролов Ю. В. и др. Горение порошкообразных металлов в активных средах. - М.: Наука, 1972. - 293 с.