

СТАБИЛИЗАЦИЯ ПЛАМЕНИ ПОРОШКООБРАЗНОГО МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ГОРЮЧЕГО В ТУРБУЛЕНТНОМ ПОТОКЕ ВОЗДУХА

А. Г. Егоров, Е. Д. Кальней, А. П. Шайкин

Тольяттинский политехнический институт, 445667 Тольятти

Исследован процесс стабилизации пламени порошкообразного металлического горючего в камере сгорания с внезапным расширением. Получены экспериментальные данные о влиянии основных факторов на границы устойчивого горения в турбулентном потоке алюминиево-воздушной смеси.

Реализация проектов по созданию новых высокоэффективных двигательных установок во многом зависит от решения проблемы организации устойчивого горения порошкообразных металлических горючих в турбулентном потоке газообразного окислителя. Одним из важных аспектов этой сложной проблемы является процесс стабилизации пламени, который к настоящему времени изучен недостаточно даже для гомогенных топливовоздушных смесей. Стабилизации пламени в потоке наиболее часто достигается с помощью зон рециркуляции. Среди устройств, в основе работы которых лежит принцип создания зоны рециркуляции, особое место занимают плохообтекаемые тела. Имеющиеся экспериментальные данные по устойчивости горения получены в основном на стабилизаторах данного типа.

Большой интерес представляют стабилизирующие устройства, в которых зона рециркуляции образуется при внезапном расширении канала, по которому движется горячая смесь. В литературе широко представлены теоретические и экспериментальные исследования влияния основных факторов на устойчивость горения гомогенных и гетерогенных углеводородовоздушных смесей. Подобной информации о топливовоздушных смесях (ТВС), содержащих порошкообразное металлическое горючее, практически нет.

Цель настоящей работы — исследовать процесс стабилизации пламени порошкообразного металлического горючего в камере с внезапным расширением и определить влияние основных факторов на границы устойчивого горения в турбулентном потоке алюминиево-воздушной смеси.

Исследования проводились как в изотермических, так и неизотермических условиях. Было разработано несколько экспериментальных установок. Схема установки проведения экспериментов в неизотермических условиях представлена на рис. 1. Использовалась эжекторная подача порошкообразного металлического горючего. Под действием разрежения, создаваемого активной струей воздуха, горючее из бункера через заборную трубку подается в эжектор, где смешивается с воздухом, образуя алюминиево-воздушный поток, который подается в камеру сгорания. В качестве ис-

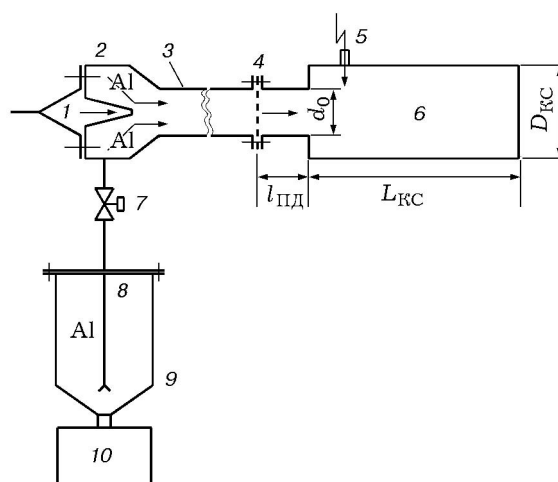


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 — подача воздуха из системы, 2 — приемная камера эжектора, 3 — камера смешения эжектора, 4 — перфорированный диск, 5 — свеча зажигания, 6 — камера сгорания, 7 — кран с электроприводом, 8 — трубка забора алюминия, 9 — бункер, 10 — система регистрации расхода порошка, основанная на измерении его массы во времени

точника зажигания использовалась электрическая свеча, установленная за плоскостью внезапного расширения, в пределах длины зоны рециркуляции. Расход воздуха измеряли шайбой. Погрешность измерения расхода воздуха составила $\approx 1,5\%$. Для измерения расхода порошка алюминия была разработана специальная система, которая позволяла измерять расход порошка алюминия с погрешностью $\approx 1\%$. Уровень и масштаб турбулентности газодисперсного потока на входе в камеру сгорания изменялся с помощью перфорированного диска с отверстиями диаметром 3,7 мм и коэффициентом живого сечения 0,65. Диск устанавливался в камере смещения на различных расстояниях от плоскости внезапного расширения ($l_{\text{ПД}}$). В экспериментальной установке использовались две камеры смещения: диаметром 0,02 м и длиной 0,25 м, а также диаметром 0,04 м и длиной 0,5 м. Модели камер сгорания представляли собой осесимметричные каналы длиной $L_{\text{КС}} = 0,1 \div 0,3$ м и диаметром $D_{\text{КС}} = 0,04 \div 0,09$ м, диаметр входного отверстия $d_0 = 0,02$ или 0,04 м. Относительная длина расширения канала $r^* = R_{\text{КС}}/r_0$ варьировалась в диапазоне $2,0 \div 4,5$ ($R_{\text{КС}}$ — радиус камеры сгорания, r_0 — радиус ее входного отверстия). Изотермические исследования проводили на моделях камер сгорания, изготовленных из оргстекла, неизотермические — на моделях из металла и тугоплавкого стекла «Пирекс».

Скорость и турбулентные характеристики однофазного воздушного потока измеряли с использованием комплекта термоанемометрической аппаратуры DISA-55M. Для исследования характеристик течения газодисперсного потока и определения локального времени пребывания частиц алюминия в камере сгорания применялся оптический метод с использованием кинокамеры СКС-1М со скоростью съемки до 5000 кадр/с.

Температуру продуктов сгорания в камере измеряли вольфрамиевой термопарой ИС-629 с рабочим диапазоном температур $573 \div 2773$ К. В качестве горючего использовали порошки марок АСД-4, АСД-1, ПА-4 и АМД-50.

Для получения характеристик стабилизации пламени была проведена серия испытаний с достижением срыва пламени при атмосферном давлении и температуре воздуха 293 К. Границы устойчивого горения определяли по

следующей методике. При произвольном расходе воздуха и горючего запускали камеру сгорания, затем отключали свечу зажигания и уменьшали расход алюминия до наступления срыва. После того как регистрировали расходы горючего и воздуха, соответствующие «бедному» срыву пламени, процесс в камере восстанавливали и при том же самом расходе воздуха увеличивали расход алюминия до достижения «богатого» срыва пламени. Затем эти циклы повторяли при других значениях расхода и скорости воздуха до тех пор, пока не определяли весь диапазон устойчивого горения. Таким образом получали область устойчивого горения, ограниченную двумя ветвями, которые постепенно сближались по мере увеличения скорости потока и замыкались при значениях коэффициента избытка воздуха $\alpha \approx 0,15 \div 0,2$. Естественно, в данном случае термины «бедный» и «богатый» срывы условны, поскольку диапазон устойчивого горения аэрозвесей алюминия лежит в области $\alpha < 1$. В данных испытаниях коэффициент α рассчитывали по отношению измеренных расходов горючего и окислителя с погрешностью $\leq 2\%$. Скорость потока алюминиево-воздушной смеси на входе, при которой происходит срыв пламени ($u_{\text{ср}}$), определяли как среднеобъемную скорость холодного потока воздуха в поперечном сечении камеры смещения эжектора (с учетом измеренной температуры потока в плоскости внезапного расширения). Экспериментальные данные по определению границ устойчивого горения представлены в виде зависимости $u_{\text{ср}}(\alpha)$. На приведенных в данной работе рисунках каждой точке соответствует как минимум пять измерений.

Эффективность процесса горения существенно зависит от структуры потока. Были проведены исследования течения в моделях камер сгорания при отсутствии горения. Особое внимание уделялось исследованию структуры течения в области отрыва до точки присоединения потока к стенке камеры сгорания. Были определены размеры зоны рециркуляции и характер изменения скорости возвратного течения в зоне обратных токов. С уменьшением r^* максимальное значение этой скорости увеличивается, а длина зоны рециркуляции ($L_{\text{ЗР}}$) сокращается. Влияние начальной степени турбулентности (ε_0) на протяженность зоны рециркуляции определяли сравнением ее длин при наличии перфорированного диска во входном канале и без него. С ростом ε_0 значения $L_{\text{ЗР}}$

уменьшались. Для условий трубной турбулентности в камере сгорания с внезапным расширением была получена формула $L_{3P} = 4,5H$, где $H = D_{КС} - d_0$. Также было установлено, что относительная длина зоны рециркуляции $\bar{L}_{3P} = L_{3P}/H$ не зависит от r^* .

Полученные результаты исследования течения в модели камеры сгорания с внезапным расширением согласуются с известными экспериментальными данными [1, 2]. Единственная отличительная особенность состоит в том, что вблизи торцевой стенки существовал вторичный вихрь, плоскость вращения которого перпендикулярна оси камеры и который занимал $1/3$ длины зоны рециркуляции. Вихрь в донной области зоны рециркуляции возникал в результате потери устойчивости исходного осесимметричного течения. В настоящее время дана математическая формулировка проблемы спонтанной закрутки, т. е. возникновения вращательного движения жидкости при отсутствии явных источников вращения [3].

В работе [4] отмечено, что нет единого мнения о влиянии взвешенных частиц на турбулентные характеристики потока. В общем случае движение несущей среды и движение твердых частиц невозможно рассматривать независимо друг от друга, поскольку в потоках газа с твердыми частицами наблюдается взаимное воздействие потока на поведение частиц и частиц на параметры несущего потока. Но так как средний размер частиц алюминия в данных опытах изменялся в диапазоне $\bar{d}_{32} = 7,5 \div 17,5$ мкм, такую алюминиево-воздушную смесь можно рассматривать как «квазигомогенную». Поэтому результаты исследования гидродинамики течения воздушного потока и его турбулентные характеристики можно считать отражающими действительную картину течения алюминиево-воздушного потока в камере сгорания с внезапным расширением.

Время пребывания реагентов в зоне рециркуляции является одним из основных параметров, определяющих стабилизацию пламени в потоке горючей смеси. В работе [5] представлены результаты измерений времени пребывания частиц алюминия в зоне рециркуляции камеры сгорания с внезапным расширением. С помощью скоростной киносъемки было выявлено, что газозвесь в зоне рециркуляции распределена неравномерно, а локальные времена пребывания частиц алюминия по длине зоны

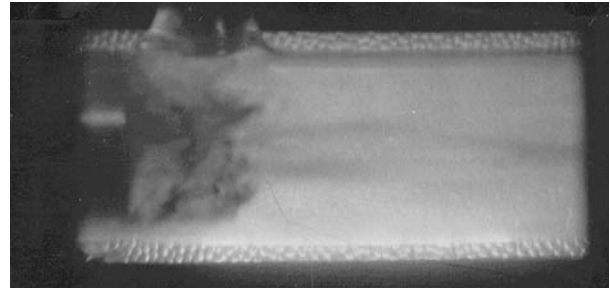


Рис. 2. Картина течения изотермического турбулентного потока алюминиево-воздушной смеси в модели камеры сгорания с внезапным расширением:

модель камеры сгорания диаметром 0,042 м и длиной 0,12 м, направление потока слева направо, турбулентность трубная, порошок алюминия марки АСД-1, $u_0 = 50$ м/с, $\alpha = 0,11$, скорость съемки 650 кадр/с

неодинаковы. Также было получено, что максимальное время пребывания частиц алюминия в зоне увеличивается с ростом r^* , \bar{d}_{32} и уменьшается с увеличением начальной скорости и начальной турбулентности набегающего потока алюминиево-воздушной смеси. В [6] показано, что турбулентный обмен зоны рециркуляции с основным потоком алюминиево-воздушной смеси так же, как и для гомогенной ТВС, можно оценивать безразмерным временем пребывания Z . На рис. 2 представлена фотография изотермического алюминиево-воздушного потока с АСД-1 в модели камеры сгорания с внезапным расширением диаметром $D_{КС} = 0,042$ м и степенью расширения $r^* = 2,1$. На ней хорошо видна неравномерная концентрация частиц алюминия по сечению. Такое распределение горючего в потоке является результатом влияния гравитационных и инерционных сил, которые приводят к осаждению частиц алюминия на стенки камеры смешения эжектора. В донной области зоны рециркуляции четко просматривается вихрь с неравномерной концентрацией частиц алюминия. В опытах с горением под действием гравитационных и инерционных сил продукты сгорания также осаждались на стенках камеры сгорания и только в донной области зоны в пределах вихря стенки оставались чистыми.

Скоростная киносъемка процесса показала, что пламя, инициированное электрическим разрядом свечи, в первую очередь распространяется в донной области зоны рециркуляции. Из-за локальной неоднородности газо-

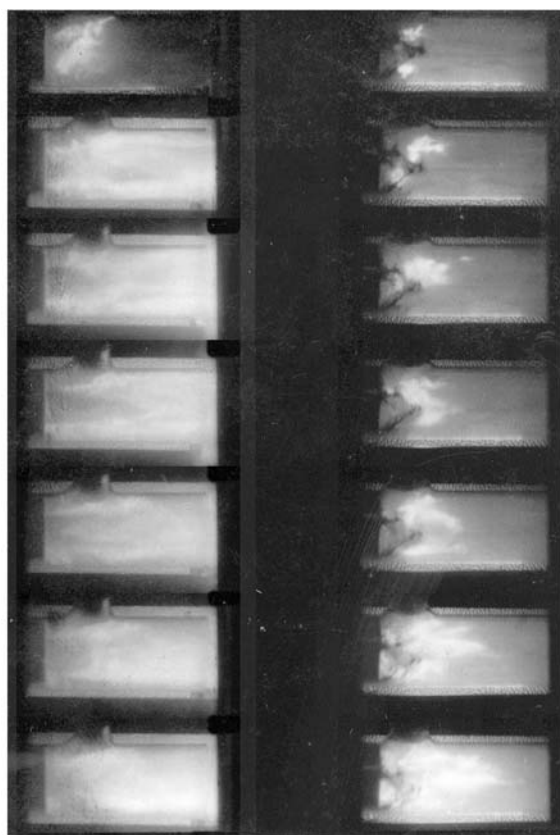


Рис. 3. Распространение пламени в модели камеры сгорания с внезапным расширением:

$D_{КС} = 0,042$ м, $L_{КС} = 0,12$ м, $u_0 = 50$ м/с, $\alpha = 0,11$, турбулентность трубная, скорость съемки 700 кадр/с, слева — АСД-4, справа — АСД-1

взвеси пламя первоначально возникает в очагах и от них распространяется по области обратных токов. Поскольку порошки полидисперсны, вначале выгорают мелкие фракции частиц алюминия. После того как пламя заполняет весь объем зоны рециркуляции, формируется фронт пламени, характер и форма которого определяются свойствами горючего. Индивидуальные особенности порошкообразного металлического горючего влияют на распространение пламени, и при прочих равных условиях увеличение реакционной способности горючего интенсифицирует этот процесс. На рис. 3 показано распространение пламени в модели камеры сгорания диаметром 0,042 м для порошков алюминия с различными диаметрами частиц. Если для порошка АСД-4 время распространения пламени от источника инициирования по зоне рециркуляции составляет 3,33 мс, то для АСД-1 оно равно 25 мс. Скорость пламени в потоке алюминиево-воздушной смеси,

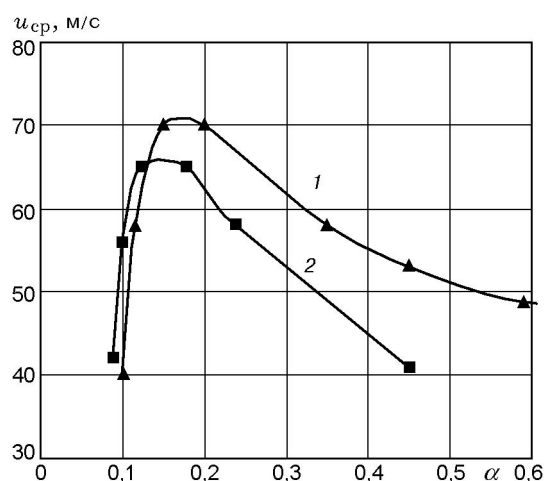


Рис. 4. Влияние высоты уступа на диапазон устойчивого горения:

1 — $D_{КС} = 0,06$ м, $H = 0,04$ м, 2 — $D_{КС} = 0,04$ м, $H = 0,02$ м; $L_{КС}/D_{КС} = 3,0$; горючее АСД-1; турбулентность трубная

определенная по расстоянию, пройденному волной горения от зоны рециркуляции до выходного сечения камеры сгорания, равна 37,5 м/с для АСД-4 и 9,3 м/с для АСД-1. Таким образом, видно, что при прочих равных условиях уменьшение среднего размера частиц горючего с 17,5 до 7,5 мкм интенсифицирует процесс распространения пламени.

Известно [7], что устойчивость горения в потоке горючей смеси зависит от многих переменных — размеров и геометрической формы стабилизатора, температуры, скорости, давления и интенсивности турбулентности потока, состава горючей смеси, химической природы топлива, условий горения (в свободном потоке или трубе) и т. д. В настоящей работе исследовано влияние на границы устойчивого горения как характеристик набегающего потока алюминиево-воздушной смеси, так и конструктивных параметров камеры сгорания.

Для сжигания гомогенных ТВС существуют оптимальные геометрические соотношения размеров камеры сгорания с внезапным расширением: $D_{КС}/d_0 = 2,5$ и $L_{КС}/d_0 = 12$ [8]. Для определения влияния параметра $L_{КС}$ на устойчивость горения потока алюминиево-воздушной смеси были выбраны две камеры сгорания диаметром 0,07 м, длиной 0,175 и 0,240 м. Полученные результаты испытаний показали, что с увеличением $L_{КС}$ при $\alpha > 0,2$ граница устойчивого сгорания расширяется.

Известно [7], что пределы устойчивого го-

рения гомогенных и гетерогенных углеводородовоздушных смесей при увеличении характерного размера стабилизатора расширяются. В данном случае за характерный размер стабилизатора принят параметр H . Для определения его влияния на диапазон устойчивого горения были выбраны две камеры диаметром 0,04 и 0,06 м при $L_{КС}/D_{КС} = \text{const}$. На рис. 4 показано влияние характерного размера H на диапазон устойчивого горения алюминиево-воздушной смеси, содержащей горючее марки АСД-1. Увеличение H приводит к смещению диапазона устойчивого горения в область больших значений α . Граница устойчивого горения лежит в области $\alpha < 1$, а максимальное значение скорости срыва пламени $u_{ср}$ соответствует $\alpha \approx 0,15 \div 0,2$, т. е. тому значению, при котором скорость пламени и тепловыделение максимальны [9]. С увеличением H растет скорость срыва пламени и расширяются пределы устойчивого горения по составу смеси при $\alpha > 0,2$. Расширение границы устойчивого горения с ростом H в области «бедного» срыва при $\alpha > 0,2$ происходит вследствие увеличения размеров зоны рециркуляции, среднего времени пребывания реагентов в ней, а также времени контакта частиц алюминия набегающего потока с высокотемпературными продуктами горения зоны рециркуляции. Сужение границы устойчивого горения с увеличением H в области «богатого» срыва при $\alpha < 0,2$ обусловлено уменьшением объемной концентрации частиц в зоне рециркуляции, а следовательно, снижением роли реакции азотирования, которая вносит существенный вклад в суммарное тепловыделение и поддерживает устойчивое воспламенение и горение обедненной кислородом смеси [9].

Если вопрос о влиянии турбулентности набегающего потока на пределы срыва гомогенной ТВС решается однозначно и авторы известных работ [7, 10] подтверждают отрицательное воздействие турбулентности на стабильность горения однородной смеси, то вопрос влияния начальной турбулентности ε_0 на устойчивость горения гетерогенных ТВС остается открытым. Это обусловлено, во-первых, сложной гидродинамикой двухфазного турбулентного потока, во-вторых, различием механизмов срыва пламени гомогенных и гетерогенных ТВС.

В результате многочисленных экспериментов было установлено, что с увеличением ε_0 в зависимости от диаметра частиц алюминия

границы устойчивого горения по скорости набегающего потока и по составу смеси могут как расширяться, так и сужаться. Для турбулентного потока алюминиево-воздушной смеси в области $\alpha > 0,2$ увеличение ε_0 с 5 до 22 % приводит к сужению границы устойчивого горения для горючего марки АСД-4 и к расширению — для горючего марки АСД-1. Это объясняется неоднозначным влиянием начальной турбулентности на температуру в зоне рециркуляции для горючих с различными значениями \bar{d}_{32} . Результаты измерения температуры в зоне рециркуляции в режимах, близких к срыву, показали, что с ростом ε_0 средняя температура зоны рециркуляции уменьшается с 1970 до 1700 К для АСД-4 и увеличивается с 1890 до 2030 К для АСД-1. Этот факт объясняется тем, что при горении распыленного порошкообразного металлического горючего в газообразном потоке окислителя основную роль играют гетерогенные реакции на поверхности частиц. Для горючего марки АСД-4 с $\bar{d}_{32} = 7,5$ мкм эти реакции определяются непосредственно скоростью химических реакций и рост турбулентности ведет только к уменьшению среднего времени пребывания частиц в зоне рециркуляции и соответственно к снижению температуры в ней. Для горючего АСД-1 с $\bar{d}_{32} = 17,5$ мкм рост турбулентности меньше влияет на время пребывания частиц в зоне рециркуляции, а гетерогенные реакции определяются массопереносом кислорода воздуха к реагирующей поверхности частицы, интенсивность которого увеличивается с ростом ε_0 , что и обуславливает рост температуры в зоне рециркуляции.

Было выявлено, что для одной и той же марки горючего неоднозначное влияние на устойчивость горения оказывает расстояние от плоскости внезапного расширения до перфорированного диска. На рис. 5 показано влияние параметров ε_0 и $l_{ПД}$ на область устойчивого горения потока алюминиево-воздушной смеси, содержащего горючее марки АСД-1. Из рисунка видно, что в зависимости от расстояния $l_{ПД}$ рост ε_0 ведет как к расширению области устойчивого горения, так и к ее сужению. С одной стороны, влияние начальной турбулентности ε_0 на устойчивость горения порошкообразного металлического горючего объясняется уменьшением размера зоны рециркуляции с ростом пульсаций скорости и, следовательно, уменьшением времени контакта частиц алюминия набегающего потока с высокотемпера-

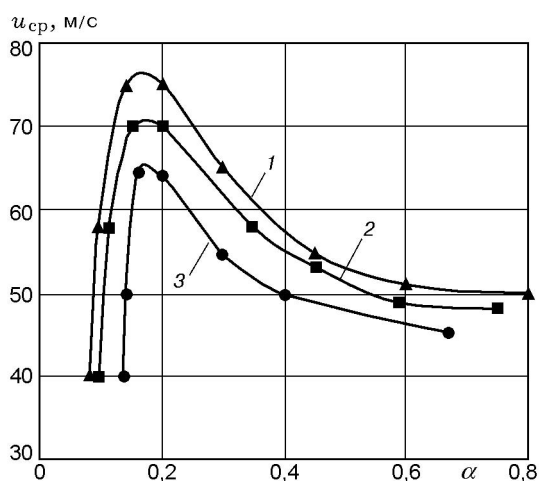


Рис. 5. Влияние параметров ε_0 и $l_{пд}$ на область устойчивого горения:

$D_{КС} = 0,06$ м, $L_{КС} = 0,18$ м; $H = 0,04$ м, горючее АСД-1; 1 — $l_{пд} = 0,02$ м ($\varepsilon_0 = 22\%$); 2 — без перфорированного диска ($\varepsilon_0 = 5\%$); 3 — $l_{пд} = 0,057$ м ($\varepsilon_0 = 12\%$)

турными продуктами горения зоны рециркуляции. С другой стороны, турбулентность интенсифицирует тепло- и массообменные процессы между набегающим потоком алюминиево-воздушной смеси и зоной рециркуляции и тем самым воздействует на локальное соотношение компонентов в зоне, от которого, в свою очередь, зависит скорость пламени. Для того чтобы получить ясность в данном вопросе и выявить, какой из этих процессов превалирует в том или ином конкретном случае, необходимы дополнительные эксперименты.

Известно [10], что скорость потока при срыве пламени увеличивается и пределы устойчивого горения по составу смеси расширяются при улучшении распыления топлива, т. е. при уменьшении среднего размера капель. Для определения влияния среднего размера частиц алюминия на устойчивость горения были выбраны порошки марки АСД-1 и АСД-4. При уменьшении d_{32} с 17,5 до 7,5 мкм граница срыва в области $\alpha > 0,2$ расширяется и растет скорость потока алюминиево-воздушной смеси, при которой происходит срыв пламени. Характер влияния размера частиц на границу срыва при $\alpha > 2$ не меняется при использовании в качестве горючего порошка марки ПА-4 с частицами в форме пластин.

В качестве порошкообразного металлического горючего, как правило, применяют металлы высокой чистоты. Однако при решении

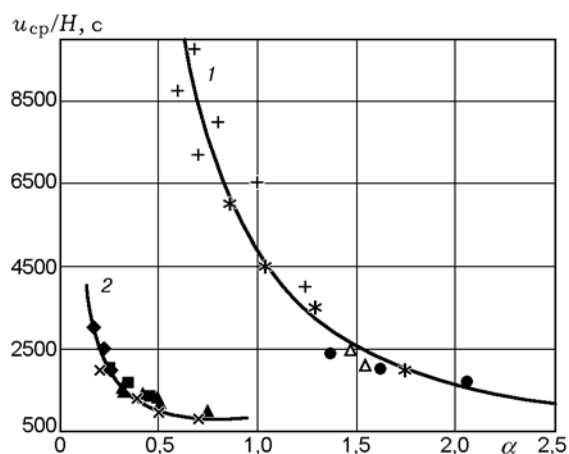


Рис. 6. Зависимость $u_{эп}/H = f(\alpha)$:

1 — горючее АСД-4: * — $D_{КС} = 0,04$ м, $H = 0,02$ м; • — $D_{КС} = 0,07$ м, $H = 0,05$ м; горючее АМД-50: + — $D_{КС} = 0,04$ м, $H = 0,02$ м; Δ — $D_{КС} = 0,08$ м, $H = 0,04$ м; 2 — горючее АСД-1: \blacktriangle — $D_{КС} = 0,07$ м, $H = 0,035$ м; \blacklozenge — $D_{КС} = 0,04$ м, $H = 0,02$ м; \times — $D_{КС} = 0,05$ м, $H = 0,03$ м; \blacksquare — $D_{КС} = 0,06$ м, $H = 0,04$ м

некоторых практических задач для получения рабочего тела с заданными параметрами в частицы основного горючего включают добавки, чаще всего магний. Влияние добавки Mg на границу устойчивого горения в области составов смеси $\alpha > 2$ было исследовано на горючем АМД-50, частицы которого представляют собой сплав 50% Al и 50% Mg.

Результаты испытаний показали, что при одинаковых средних размерах частиц граница срыва в области $\alpha > 2$ для АМД-50 шире, чем для АСД-4. Это объясняется тем, что время горения частиц алюминиево-магниевого сплава зависит от содержания Al и Mg в нем. По мере повышения доли Mg в сплаве время горения уменьшается, постепенно приближаясь к времени горения чистого Mg, которое при одинаковых условиях и размерах частиц меньше времени горения Al примерно в три раза [11].

При исследовании процесса стабилизации пламени порошкообразного металлического горючего в турбулентном потоке газообразного окислителя возникают трудности, связанные с особенностями воспламенения и горения металлов, которые существенно затрудняют строгий теоретический анализ. Для получения эмпирических зависимостей, пригодных для инженерного расчета размера стабилизатора, обеспечивающего надежную стабилизацию пламени при известных пара-

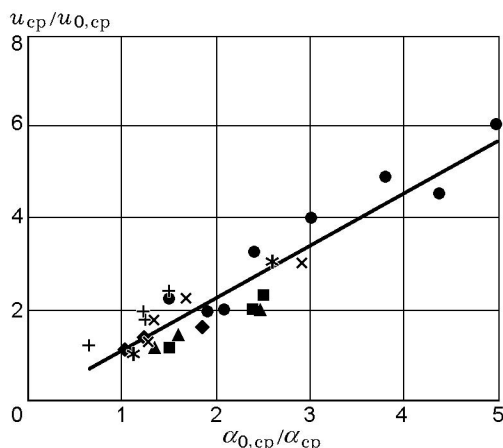


Рис. 7. Зависимость $u_{ср}/u_{0,ср} = f(\alpha_{0,ср}/\alpha_{ср})$:

горючее АСД-4: * — $D_{КС} = 0,07$ м, $H = 0,05$ м;
горючее АСД-1: \blacktriangle — $D_{КС} = 0,06$ м, $H = 0,04$ м;
 \blacklozenge — $D_{КС} = 0,04$ м, $H = 0,02$ м; \times — $D_{КС} = 0,07$ м,
 $H = 0,05$ м; \blacksquare — $D_{КС} = 0,05$ м, $H = 0,03$ м;
горючее АМД-50: \bullet — $D_{КС} = 0,04$ м, $H = 0,02$ м;
 $+$ — $D_{КС} = 0,08$ м, $H = 0,04$ м

метрах алюминиево-воздушной смеси, были обработаны экспериментальные данные в области $\alpha > 0,2$. Установлено, что при горении алюминиево-воздушной смеси в камере с внезапным расширением так же, как и для жидких гетерогенных топлив, за телами V-образной формы результаты измерений обобщаются зависимостью $u_{ср}/H = f(\alpha)$. Зависимость $u_{ср}/H = f(\alpha)$ при $\varepsilon_0 = 5\%$ для различных марок горючего представлена на рис. 6, из которого видно, что граница устойчивого горения по составу смеси расширяется с уменьшением среднего размера частиц алюминия.

На рис. 7 приведены характеристики срыва пламени при $\alpha > 0,2$, обработанные в безразмерных координатах $u_{ср}/u_{0,ср} = f(\alpha_{0,ср}/\alpha_{ср})$, для различных марок горючего и размеров стабилизаторов при атмосферном давлении и температуре. Для всех рассмотренных случаев экспериментальные точки удовлетворительно группируются вокруг одной прямой, аппроксимируемой зависимостью

$$\alpha_{0,ср}/\alpha_{ср} = 0,248 + 0,752u_{ср}/u_{0,ср},$$

где $u_{0,ср} = 40$ м/с — постоянное значение скорости потока алюминиево-воздушной смеси, при которой происходит срыв пламени при том или ином значении $\alpha_{0,ср}$, зависящем от размера H , температуры и т. д. В данной формуле $u_{0,ср} = 40$ м/с — минимальное значение, при

котором происходят надежное воспламенение и горение.

Полученное соотношение можно использовать для расчета стабилизации пламени в камерах сгорания с внезапным расширением в области $\alpha > 0,2$, если известна зависимость $\alpha_{0,ср}$ от различных факторов, определяющих срыв пламени, — характерного размера H , температуры и т. д.

Итак, в работе исследован процесс стабилизации пламени порошкообразного металлического горючего в камере сгорания с внезапным расширением и определено влияние основных факторов на границы устойчивого горения в турбулентном потоке алюминиево-воздушной смеси. Показано, что увеличение начальной турбулентности набегающего потока алюминиево-воздушной смеси расширяет границу устойчивого горения в области $\alpha > 0,2$ для частиц алюминия с $\bar{d}_{32} = 17,5$ мкм и сужает для частиц с $\bar{d}_{32} = 7,5$ мкм. Скорость потока при срыве пламени увеличивается, а пределы устойчивого горения по составу смеси в области $\alpha > 0,2$ расширяются при увеличении длины камеры сгорания и характерного размера H , при уменьшении размера частиц алюминия, а также при добавке магния в состав частицы горючего.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Малая Э. М.** Аэродинамика, процессы горения и теплообмена ограниченных струйных течений. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1987.
2. **Турбулентные** струйные течения в каналах / В. Е. Алемасов и др. Казань: Казан. филиал АН СССР, 1988.
3. **Губарев Ю. Г., Луговцов Б. А.** О спонтанной закрутке в осесимметричных течениях // Математические проблемы механики сплошной среды: Тез. докл. IX Междунар. конф. Новосибирск: Ин-т гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 1995. С. 69.
4. **Нуриев М. М., Груздев В. Н., Талантов А. В.** Скорость распространения пламени в гетерогенных керосино-воздушных смесях // Горение в потоке. Казань: Казан. авиационный ин-т им. А. Н. Туполева, 1980. С. 8–13.
5. **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. 69–71.
6. **Егоров А. Г. и др.** Экспериментальное определение срывных границ горения порошкообразного металла в потоке воздуха // Горение:

- Тез. X Симпоз. по горению и взрыву. Черногоровка: ОИХФ РАН, 1992. С. 94–95.
7. **Физические** основы рабочего процесса в камерах сгорания воздушно-реактивных двигателей / Б. В. Раушенбах и др. М.: Машиностроение, 1961.
 8. **Металлургическая** теплотехника / В. А. Кривандин и др. М.: Металлургия, 1986.
 9. **Ягодников Д. А. и др.** Роль реакции азотирования в распространении пламени по переобогащенным металловоздушным смесям // Вестн. МГТУ. Сер. Машиностроение. 1990. № 1. С. 121–124.
 10. **Левевр А.** Процессы в камерах сгорания ГТД. М.: Мир, 1986.
 11. **Горение** порошкообразных металлов в активных средах / П. Ф. Похил и др. М.: Наука, 1972.

*Поступила в редакцию 12/I 2000 г.,
в окончательном варианте — 15/XII 2000 г.*
