

## ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА В КАМЕРАХ СГОРАНИЯ ДВИГАТЕЛЬНЫХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

© 2006 А.Г. Егоров, С.В. Пивнева

Тольяттинский государственный университет

Рассмотрен способ организации рабочего процесса в ДУ на порошкообразном металлическом горючем на основе комплексного исследования процессов воспламенения, горения и стабилизации пламени алюминий-воздушной смеси в прямоточной камере с внезапным расширением.

Применение принципиально нового типа горючего – порошкообразного металлического – в прямоточных воздушно-реактивных двигателях (ПВРД) по существу открывает новое направление в реактивном двигателестроении. Обладая большой тепловой сгорания и высокой плотностью порошкообразное металлическое горючее (ПМГ) способно существенно увеличить удельный импульс тяги. ПМГ позволяют, с одной стороны, сохранить эксплуатационные достоинства твердых ракетных топлив, с другой – исключить их основной недостаток – отсутствие возможности регулирования в широком диапазоне тяги двигателя [1].

В качестве порошкообразного металлического горючего (ПМГ) одним из наиболее доступных металлов является алюминий (Al). Относительно высокие энергетические характеристики, большие запасы Al в природе и крупные масштабы промышленного производства позволяют использовать его в качестве ПМГ в большей мере, чем такие металлы как бор, бериллий, магний и др.

Перспективы применения порошкообразного Al в качестве основного горючего в реактивных двигательных и энергетических установках, основываются на организации эффективного рабочего процесса в прямоточных камерах сгорания.

Установление закономерностей процессов смешения, воспламенения, стабилизации горения и сгорания металло-воздушных смесей с учетом всех факторов, влияющих на эти процессы, многоплановая и, пожалуй, наиболее сложная задача в теории прямоточных и ракетно-прямоточных двигателей. Все это стимулирует постановку научных исследований, охватывающих целый комплекс проблем касающихся организации рабочего процесса в прямоточных ка-

мерах сгорания реактивных двигательных установок.

Для организации рабочего процесса сгорания алюминий-воздушной смеси в камере прямоточного типа необходимо решить следующие задачи:

- исследовать структуру и характеристики течения однофазных (воздушных) и двухфазных (алюминий-воздушных) потоков ограниченными стенками канала.

- определить локальное время пребывания частиц алюминия в камере сгорания и оценить интенсивность тепломассообменных процессов зоны рециркуляции с основным потоком алюминий-воздушной смеси.

- исследовать процесс воспламенения и определить пределы зажигания в зависимости от начальных параметров набегающего потока алюминий-воздушной смеси.

- детально исследовать механизм стабилизации пламени в потоке алюминий-воздушной смеси зоной рециркуляции.

Общеизвестно, что эффективность рабочего процесса существенным образом зависит от структуры течения в камере сгорания. Поэтому в настоящей работе на первом этапе была исследована структура и характеристики течения воздушных потоков в прямоточной камере с внезапным расширением.

Получены профили средней скорости потока  $\bar{U}$  и пульсаций скорости  $\varepsilon = \sqrt{\bar{U}'^2} / U_0$ , распределение пульсационных составляющих  $\bar{U}'^2$ ,  $\bar{V}'^2$ , касательных напряжений трения  $\tau = -\rho \bar{U}'V'$  и коэффициента давления  $c_p = p - p_0 / \rho U_0^2$  по длине канала;

Полученные характеристики течения в камере с внезапным расширением при вдуве в нее струи воздуха показали, что несмотря, на возникающий продольный градиент давления, поперечные профили скорости харак-

теризуются подобием и могут быть описаны универсальной функцией вида

$$(U - U_\delta)/(U_m - U_\delta) = f(y/\delta),$$

где  $U_m$  – скорость на оси струи,  $\delta$  – толщина слоя смешения,  $y_c$  – поперечная координата от оси струи, соответствующая значению скорости  $U_c = (U_m - U_\delta)/2$ .

Алюминиево-воздушные смеси используемые в качестве порошкообразного металлического топлива в двигательных и энергетических установках относятся к «флюидным потокам» с большой относительной концентрацией дисперсной фазы, у которых  $\mu > 50$ . И соответственно характеристики двухфазного, алюминиево-воздушного и однофазного воздушного потоков в камере сгорания с внезапным расширением будут существенно отличаться.

На рис. 1 представлена картина течения двухфазного, алюминиево-воздушного потока в модели камеры сгорания с внезапным расширением. Где хорошо виден основной поток алюминиево-воздушной смеси и границы кольцевого вихря в донной области зоны рециркуляции. Плоскость вихревого закрученного течения перпендикулярна оси камеры и занимала  $\sim 1/3$  длины зоны рециркуляции (см. рис. 3). В придонном вихревом течении с закруткой наблюдалась поперечная миграция частиц, которая приводила к повышенной концентрации наиболее крупных частиц в пристенной области. Вероятно, что закрученное вихревое течение в донной области зоны рециркуляции обусловлено силой Магнуса, которая зависит от скорости поступательного движения и угловой скорости частиц, последняя, определяется двумя факторами – начальной круткой, вызванной взаимодействием частиц с твердыми поверхностями при движении в подводящем канале, и градиентом средней скорости.

Видно также, что концентрация частиц Al в донной области зоны рециркуляции неравномерна, в нижней части она больше. Этот факт объясняется тем, что турбулентные моли проницаемы для высокодисперсных частиц Al, в результате чего при гравитационном оседании концентрация внизу больше чем сверху.

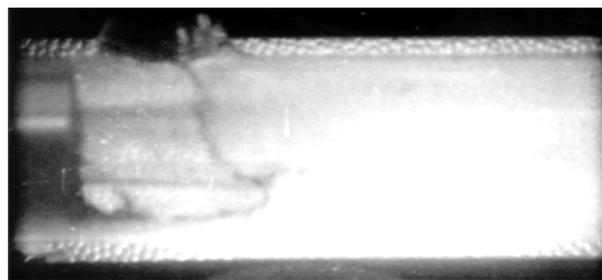


Рис.1. Картина течения в зоне рециркуляции алюминиево-воздушной смеси, содержащей частицы алюминия АСД-4 ( $d_{32} = 7,5 \mu\text{м}$ ).

Модель камеры сгорания диаметром 0,042 м; направление потока слева направо;  $U_0 = 50 \text{ м/с}$ ;  $\alpha = 0,11$ ; турбулентность трубная; скорость съемки 700 кадр./с

С увеличением среднего размера частиц  $d_{32}$  с 7,5 до 17,5 мкм их концентрация в донной области увеличивается.

Аэродинамикой течения алюминиево-воздушного потока будет определяться локальное время пребывания частиц Al в камере сгорания, от которого, в свою очередь, будут зависеть параметры рабочего процесса.

При определении среднего времени пребывания частиц Al в зоне рециркуляции ( $\tau_{zp}$ ) установлено, что при трубной турбулентности с увеличением характерного размера стабилизатора (Н),  $\tau_{zp}$  частиц Al обеих марок ПМГ увеличивается. С ростом  $U_0$  наблюдается уменьшение времени пребывания частиц Al, как в основном потоке  $\tau_0$ , так и в зоне рециркуляции  $\tau_{zp}$ .

Для алюминиево-воздушной смеси, содержащей частицы Al размером  $d_{32} = 7,5 \mu\text{м}$ , увеличение начальной турбулентности на входе в камеру (установка решетки на  $l_p = 0,02 \text{ м}$ ) приводит к уменьшению  $\tau_{zp}$  по сравнению с вариантом без решетки.

Для частиц Al с размером  $d_{32} = 17,5 \mu\text{м}$  наличие решетки увеличивает  $\tau_{zp}$  по сравнению с вариантом без решетки.

По эмпирическим значениям  $\tau_{zp}$ ,  $L_{zp}$ , Н,  $U_0$  было рассчитано безразмерное время пребывания частиц Al в зоне рециркуляции (К). При трубной турбулентности в потоке без горения значения К для частиц горючего марок АСД-4 и АСД-1 соответственно составили 13,97 и 22,5. В потоках алюминиево-

воздушной смеси с повышенной турбулентностью при установке решетки на  $l_p = 0,02$  м значение  $K$  для порошка марки АСД-4 было 7,49, а для горючего АСД-1 – 13,6. Уменьшение значения безразмерного времени пребывания  $K$  свидетельствует об интенсификации процессов тепло – и массообмена зоны рециркуляции с основным потоком алюминиево-воздушной смеси.

Испытания в потоке с горением показали, что длина зоны рециркуляции увеличивается в 1,4 раза по сравнению с холодным потоком. Значение безразмерного времени пребывания  $K$  в потоках алюминиево-воздушной смеси с горением увеличивается в 2,5 раза.

Таким образом следует, что как без горения, так и в случае горения процессы теплообмена основного потока алюминиево-воздушной смеси с зоной рециркуляции также как и газоздушных смесей можно оценивать безразмерным временем пребывания  $K$ .

Известно [2], что время горения частиц Al при атмосферном давлении подчиняется закону  $\tau_c \sim d^2$ , следовательно, время горения полидисперсной алюминиево-воздушной смеси в зоне рециркуляции будет определяться размером частиц самой крупной фракции,  $\tau_{зр}$  которых будет максимальным. В связи с этим, наряду со средним временем пребывания, определенный интерес представляет максимальное время пребывания частиц Al в зоне рециркуляции  $\tau_{max}$ .

Влияние начальной скорости  $U_0$  и турбулентности  $\epsilon_0$  основного потока на  $\tau_{max}$  частиц Al в донной области зоны рециркуляции показано на рис. 2.

Полученный характер расположения кривых зависимости  $f = (U_0, \epsilon_0)$  для алюминиево-воздушной смеси в камере с внезапным расширением, так же как и для газоздушной смеси, за плохообтекаемым телом [3], можно объяснить тем, что при постановке в поток турбулизирующей решетки коэффициент диффузии увеличивается. С ростом же расстояния от решетки интенсивность турбулентности  $\epsilon_0$  падает,  $D_{зр}$  будет при этом уменьшаться, а  $\tau_{зр}$  увеличиваться в том же соотношении.

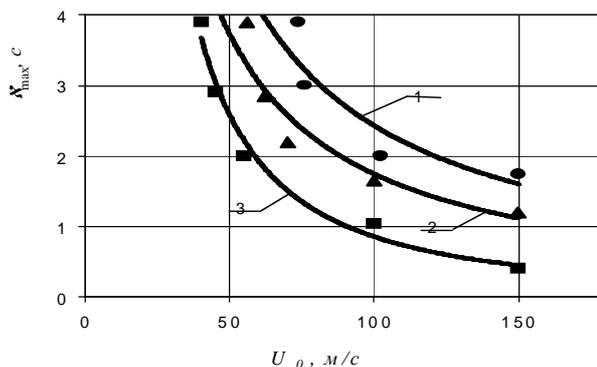


Рис. 2. Влияние  $U_0$  и  $\epsilon_0$  воздушного потока на  $\tau_{max}$   
 1 – без турбулизирующей решетки ( $\epsilon_0 = 5\%$ );  
 2 – с решеткой на  $l_p = 0,057$  м ( $\epsilon_0 = 12\%$ );  
 3 – с решеткой на  $l_p = 0,02$  м ( $\epsilon_0 = 22\%$ ); точки – эксперимент; линии – расчет по формуле.

На основе аппроксимации экспериментальных данных получена формула для расчета  $\tau_{max}$ :

$$\tau_{max} = \frac{20,2(\bar{d} + 12,3) \cdot (\bar{r} - 1)^{2,27} (1 - 0,67\epsilon_0 + 0,136\epsilon_0^2)}{u_0^{(0,05\epsilon_0^2 - 0,25\epsilon_0 + 1,17)}}$$

где  $\bar{d} = d/d_0$  – относительный размер частицы Al ( $d_0 = 7,5$  мкм);  $\bar{r}$  – степень внезапного расширения;  $\epsilon_0$  – интенсивность турбулентности воздуха на входе в камеру сгорания, в %;  $U_0$  – скорость потока алюминиево-воздушной смеси на входе в камеру сгорания.

Погрешность аппроксимации экспериментальных данных, полученных по данной формуле, составляет ~ 12 %.

Результаты исследований по определению локального времени пребывания ( $\tau_{пр}$ ) частиц алюминия в камере сгорания позволили выбрать оптимальное место установки свечи зажигания (СПН-4-3Т,  $W = 0,05$  Дж). Обнаруженная область зоны рециркуляции с максимальным временем пребывания частиц Al является оптимальным местом расположения свечи зажигания  $L_{св} = (0,5...1,2)H$ .

Известно [4], что процесс зажигания длится с момента начала искрового разряда до установления режима устойчивого распространения пламени. Здесь существуют, по крайней мере, две проблемы. Одна из них – формирование очага пламени при искровом разряде, а другая – неустойчивое распространение пламени этого очага.

При скоростной киносъемке процесса развития начального очага воспламенения в

зоне рециркуляции в различные моменты времени было обнаружено, что после проскока искры радиус начального очага сначала уменьшается, а потом начинает увеличиваться в случае успешного воспламенения. При неудачном воспламенении очаг полностью погасает.

На рис.3 представлены кривые изменения размеров начального очага по времени для угасающего (кривая 1) и распространяющегося пламени (кривая 2).

Для обоих случаев на начальном этапе процесса в течение  $\sim 1,6$  мс наблюдается увеличение размеров очага от 0 до 8 мм. Затем в интервале времени от 1,6 до 3,3 мс происходит уменьшение его размеров до  $\sim 3...4$  мм. При достижении значения времени  $\tau \approx 3,3$  мс уменьшение размеров начального очага в обоих случаях прекращается. В случае успешного развития (кривая 2) происходит резкое увеличение размеров очага  $\sim 10$  мм ( $\tau \approx 4,9$  мс), затем наступает стабилизации скорости роста ( $\tau = 4,9...12,8$  мс) с последующим его увеличением и распространением пламени по зоне рециркуляции ( $\tau \geq 12,8$  мс). В случае неудачного воспламенения после первоначального увеличения ( $\tau \sim 1,6$  мс), размеры начального очага воспламенения (кривая 1) практически не меняются и при значении  $\tau = 4,9$  мс происходит его угасание.

Известно [5], что для того чтобы осуществить искровое зажигание в гомогенной горючей смеси соответствующий ей эквивалентный радиус  $R_{\text{экв}}$  должен быть в несколько раз больше, чем характерная ширина зоны ламинарного пламени  $b_n$ .

Зельдовичем Я.Б. [6] было получено искомое условие воспламенения, в следующей простой форме  $R_{\text{экв}} \geq 3,7b_n$ .

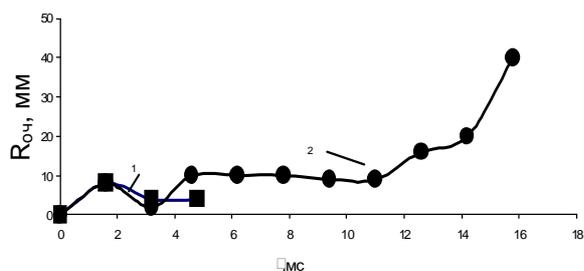


Рис. 3. Изменение размеров очага по времени для затухающего (1) и распространяющегося (2) пламени

Таким образом, для того, чтобы электрическая искра могла привести к воспламенению в зоне рециркуляции алюминиево-воздушной смеси с частицами АСД-1, соответствующий ей критический радиус должен быть  $\sim 4$  мм. При этом условии можно предположить, что ближайшие частицы алюминиево-воздушной смеси успеют воспламениться, прежде чем нагретый искрой начальный очаг остынет. Ясно также, что для признания воспламенения удачным или неудачным, необходим интервал времени  $\sim 4,9$  мс.

Установлено, что процесс развития начального очага зажигания проходит в две стадии. Увеличение турбулентности потока алюминиево-воздушной смеси оказывает положительное влияние на размеры начального очага воспламенения на первой стадии развития и отрицательно на второй. Первая стадия, когда скорость выделения тепла в процессе химической реакции превосходит скорость теплоотвода в окружающую среду, составляет  $\sim 1/3$  от общего времени развития очага.

Оценки характеристик воспламенения проводились по методике, представленной в [7]. Область зажигания потока аэрозвеси частиц алюминиево-магниевого сплава марки АМД-50 представлена на рис. 4. На оси абсцисс отложен расход воздуха ( $G_B$ ), а на оси ординат отношение расхода порошка алюминия к расходу воздуха ( $\chi = G_{Al} / G_B$ ). Форма кривой, ограничивающая область воспламенения потока аэрозвеси частиц Al, соответствует форме кривой ограничивающей типичную область такого рода для камер сгорания авиационных газотурбинных двигателей [6].

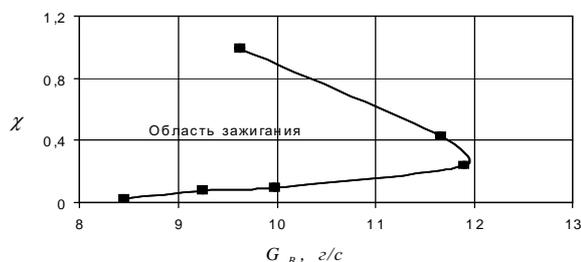


Рис. 4. Область зажигания в прямоточной камере сгорания  $D_{\text{кс}} = 0,05$  м аэрозвесь частиц АМД-50 (50% Al + 50% Mg)

Экспериментально установлено, что границы зажигания в потоке алюминиево-воздушной смеси расширяются при увеличении диаметра камеры сгорания, температуры воздуха, с уменьшением среднего размера частиц и сужаются при увеличении скорости потока. С ростом начальной турбулентности пределы зажигания в потоке алюминиево-воздушной смеси со средним диаметром частиц алюминия 7,5 мкм сужаются и расширяются с частицами диаметром 17,5 мкм.

Многообразие факторов, определяющих процесс стабилизации пламени неоднородной по составу и фазе смеси, обуславливает чрезвычайную трудность изучения механизма этого сложного явления. Поэтому процесс стабилизации пламени в потоке алюминиево-воздушной смеси представляет собой более сложный предмет для изучения и понимания, чем процесс стабилизации в потоке гомогенной смеси.

В связи с этим только детальное исследование влияния различных факторов на границы устойчивого горения в турбулентном высокоскоростном потоке алюминиево-воздушной смеси позволит определить качественные закономерности и получить количественные соотношения.

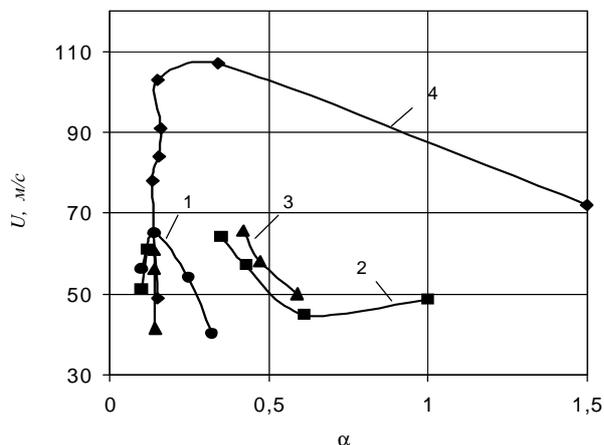


Рис. 5. Влияние характерного размера  $H$  на пределы устойчивого горения АСД-1  
 1 –  $H = 0,02$  м; 2 –  $H = 0,03$  м;  
 3 –  $H = 0,04$  м; 4 –  $H = 0,05$  м

Установлено, что для порошкообразного алюминия так же, как и для газообразных и жидких топлив с увеличением характерного размера  $H$  растет скорость набегающего потока алюминиево-воздушной смеси, при

которой наступает срыв пламени  $U_{ср}$ , и расширяются пределы устойчивого горения по составу смеси.

На рис. 5. представлены данные по стабилизации пламени в потоке алюминиево-воздушной смеси в камерах сгорания с различным, характерным размером  $H$ .

Проведенные исследования показали, что скорость потока алюминиево-воздушной смеси при которой наступает срыв пламени увеличивается и пределы устойчивого горения по составу смеси в «бедной» области ( $\alpha > 0,2$ ) расширяются: с уменьшением скорости набегающего потока алюминиево-воздушной смеси  $U_0$ ; при увеличении начальной температуры воздуха  $T_0$ ; с уменьшением размера частиц алюминия  $d_{32}$ ; с увеличением длины камеры сгорания  $L_{кс}$ ; при работающей свече зажигания и при увеличении температуры стенки камеры сгорания.

Увеличение начальной турбулентности набегающего потока  $\varepsilon_0$  расширяет границы срыва в области  $\alpha > 0,2$  для алюминиево-воздушной смеси содержащей частицы алюминия с  $d_{32} = 17,5$  мкм и сужает для частиц с  $d_{32} = 7,5$  мкм.

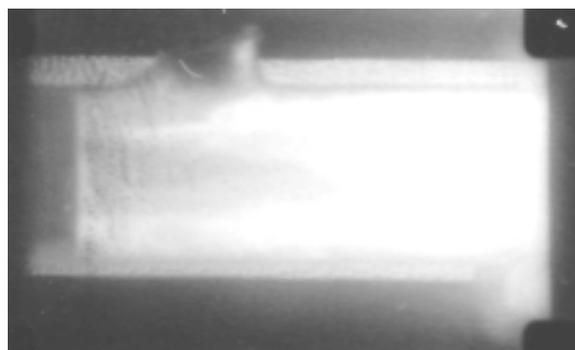


Рис. 6. Стабилизированный фронт пламени в прямоточной камере с внезапным расширением  
 $D_{кс} = 0,042$  м; горючее АСД-4;  $U_0 = 50$  м/с;  
 $\alpha = 0,11$ ;  $T = 293$  К

На рис. 6. представлен один из кадров скоростной киносъемки, на котором зафиксировано стабильное положение фронта пламени в потоке алюминиево-воздушной смеси содержащей частицы АСД-4 с  $d_{32} = 7,5$  мкм.

На рисунке четко просматривается начальный участок двухфазной, алюминиево-воздушной струи, а также фронт пламени, который начинается практически сразу же от плоскости внезапного расширения. Пламя, распространяющееся от стабилизатора и сносимое потоком, образует поверхности, расположенные под углом к направлению потока, как и в потоке однородной горючей смеси

Анализ срыва горения в потоке алюминиево-воздушной смеси в исследованном диапазоне размеров частиц ПМГ показал, что в основе физической модели стабилизации пламени зоной рециркуляции за внезапным расширением канала лежат теории стабилизации пламени за плохообтекаемым телом для гомогенных топливно-воздушных смесей.

#### Список литературы

1. Петренко В.И., Малинин В.И. ПВРД порошкообразных металлических горючих –

перспективное направление улучшения баллистических характеристик управляемых ракет. // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики. Материалы III- Всероссийской научной конференции.: Изд-во ТГУ. 2002. С. 94-98.

2. Похил П.Ф., Беляев А.Ф., Фролов Ю.В. и др. Горение порошкообразных металлов в активных средах. М.: Наука. 1972. С. 293.

3. Бовина Т.А. // Горение при пониженных давлениях и некоторые вопросы стабилизации пламени в однофазных и двухфазных системах. М.: Изд-во АН СССР. 1960. С. 58.

4. Кумагаи. Горение. – М: Химия, 1980. 256 с.

5. Щетинков Е.С. Физика горения газов. М.: Наука. 1965. 739 С.

6. Зельдович Я.Б. ЖЭТФ. 1941. № 11. С.159.

7. Лефевр А. Процессы в камерах сгорания ГТД. М.: Мир, 1986. С. 204.

## BURNING PROCESS IN COMBUSTION CHAMBERS OF NEW GENERATION POWERPLANTS

© 2006 A.G. Egorov, S.W. Pivnewa

Togliatti State University

This paper analyses combustion process in powerplants running on powdered metal fuels and is based on comprehensive study of air-aluminum mixture ignition, combustion and flame stabilization processes in a straight-flow combustion chamber with sudden expansion.

