

уменьшению теплопритоков к криопродукту за счет исключения фазовых переходов (обратной конденсации) в газовых прослойках между экранами.

Представленные здесь расчетно-аналитические данные дают основание считать универсальный газовый баллон перспективным для практического применения не только по снижению энергозатрат при заправке, но и по ресурсу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Топливный баллон./ Д о в г я л л о А.И., Л у к а ч е в С.В и др.// Патент № 2163699, Россия, МПК 7F17C9/02, 99114577/06 заявл. 02.07.1999, опубл. 27.02.2001. Бюл. № 6.
2. Криогенные системы: Учеб. для ВУЗов по курсу «Криогенная техника» / А р х а р о в А.М., Б е л я к о в В.П., М и к у л и н Е.И. и др. // М.: Машиностроение. 1987. – С. 475-526.
3. Загорученко В. А, Журавлев А.М. Теплофизические свойства газообразного и жидкого метана. – М.: Изд-во стандартов, 1969. – 236 с.
4. ГОСТ 949-73. Баллоны стальные малого и среднего объема для газов на $P \leq 16,6$ МПа (200 кгс/см²). Технические условия. -12 с.

УДК 536.46

ИСКРОВОЕ ЗАЖИГАНИЕ АЭРОВЗВЕСИ ЧАСТИЦ АЛЮМИНИЯ В ПОТОКЕ

Егоров А.Г.

Тольяттинский государственный университет, г. Тольятти

К настоящему времени проведено достаточно много теоретических и экспериментальных исследований по определению влияния электрических параметров системы зажигания и параметров потока на величину минимально необходимой энергии искрового разряда в движущейся смеси воздуха и капель топлива.

Они подтвердили зависимости, свидетельствующие о том, что воспламенение облегчается при повышении давления, температуры газа и энергии искрового разряда и затрудняются при увеличении скорости потока и интенсивности турбулентности [1]. Аналогичных систематических исследований в потоках аэрозвесей металлических частиц практически нет.

Известно [2], что если источником зажигания служит электрический разряд, то энергия необходимая для воспламенения аэрозвеси Al является функцией размера частиц: для меньших частиц требуются меньшие энергии, причем ее значение остается постоянным в широком диапазоне концентраций. При очень низких концентрациях воспламенение становится неустойчивым, так как оно происходит лишь в том случае, если частица попадет в разряд. Энергия воспламенения изменяется при изменении сопротивления, которое определяет продолжительность разряда. Вообще, существует оптимальное время разряда для воспламенения.

Факторов, влияющих на процесс воспламенения в потоке аэрозвеси частиц Al достаточно много. К ним относятся дисперсный состав, форма и состояние поверхности частиц, начальная температура, скорость, турбулентность, давление и др. Зная механизм искрового зажигания в потоке аэрозвесей и условия распространения пламени по ним, можно в большинстве случаев качественно, а иногда и количественно, оценить влияние каждого фактора на протекание процесса.

Настоящая работа посвящена исследованию влияния начальной турбулентности, формы и размера частиц на процесс искрового зажигания в потоке аэрозвеси частиц Al с целью организации надежного воспламенения алюминиево-воздушной смеси (АВС), в реальных условиях прямоточных камер сгорания двигательных и энергетических установок.

Экспериментальная установка, на которой проводились испытания, схема прямоточной камеры сгорания и гидродинамика течений в ней показаны в [3,4]. Известно [1], что для двигателей летательных аппаратов наиболее удобным и достаточно удовлетворительным источником зажигания является электрический разряд, который очень эффективно преобразует электрическую энергию в тепло, которое концентрируется в относительно малом объеме. Системы высокой энергии наиболее эффективны, когда используются в комбинации со свечами поверхностного разряда. Поэтому для воспламенения турбулентного потока аэрозвеси

частиц *Al* использовалась самолетная система зажигания и свеча поверхностного разряда *СПН-4-3Т* со стандартными техническими характеристиками.

Считается общепризнанным, что положение свечи имеет определяющее влияние, как на характеристики воспламенения, так и на ее срок службы. Очевидным соображением при выборе наилучшего расположения свечи является то, что она должна находиться в пределах зоны рециркуляции (ЗР), так чтобы очаг горения, инициированный искрой, переносился возвратным течением вверх, против направления основного потока. Это предполагает механизм воспламенения, при котором локальный очаг остается в ЗР, циркулируя в ней как можно дольше и одновременно распространяясь вовне ее, пока, наконец, вся первичная зона камеры не будет заполнена пламенем. Обнаруженная область ЗР с максимальным временем пребывания частиц *Al* в ней позволила определить оптимальное место расположения свечи зажигания: $L_{св} = (0,5...1,2) H$ [5].

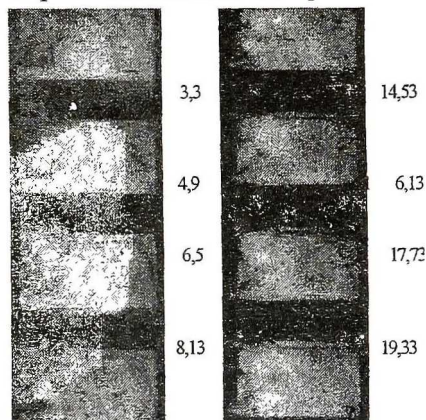
Место расположения свечи в указанных пределах также отвечало требованиям повторного запуска камеры в случае срыва пламени, так как электроды свечи оставались чистыми. Поскольку эта часть внутренней поверхности стенки камеры не покрывалась продуктами сгорания вследствие существующего вихря в донной области ЗР, плоскость вращения которого была перпендикулярна оси камеры.

Визуализация течения в камере сгорания методом скоростной киносъемки выявила большую пространственную неоднородность концентрации алюминия по длине ЗР. А также то, что пламя, инициированное электрическим разрядом свечи, в первую очередь распространяется в донной области зоны рециркуляции, где время пребывания частиц *Al* было максимальным.

Эксперименты по зажиганию турбулентного потока алюминиево-воздушной смеси в моделях прямоточных камер сгорания показали, что от свечи *СПН-4-3Т* надежно воспламеняются до самоподдерживающегося горения порошки: *ПАМ-4*, *АМД-50*, *АСД-1*, *АСД-4*, *ПА-4*, *ПА-2*,. Грубодисперсные порошки марки *ПА-1* и другие воспламенялись только в смеси с тонкодисперсными порошками, что обусловлено поджигающим действием мелких частиц. Воспламенение порошка *АСД-1* с $d_{32} = 17,5 \text{ мкм}$ в потоке с повышенной турбулентностью, с установкой перфорированного диска, наблюдалось только в моделях диаметром 0,05

м и более. Были определены минимальные значения характерного размера стабилизатора ($H = 0,007 \text{ м}$), скорости алюминиево-воздушного потока ($U_0 = 40 \text{ м/с}$) и расхода горючего ($G_{Al} = 3 \text{ г/с}$) меньше, величины которых, надежного зажигания основного потока АВС в камере сгорания не происходило.

Форма и состояние поверхности частиц металлов оказывает суще-



ственное влияние на процесс воспламенения и горения, т.к. реакция горения протекает и на поверхности частиц. Поэтому в данной работе исследовался процесс зажигания в потоках аэрозвесей как со сферическими частицами Al , так и с частицами в форме пластин.

На рис.1 показана динамика развития начального очага в потоке аэрозвесей содержащей частицы сферической формы.

Рис.1. Развитие начального очага воспламенения в зоне рециркуляции $D_{KC} = 0,04 \text{ м}$. Горючее – АСД-1 ($d_{32} = 17,5 \text{ мк}$). Направление потока аэрозвесей слева направо; параметры потока $U_0 = 50 \text{ м/с}$; $\alpha = 1,1$; $T_0 = 293 \text{ К}$. Цифры слева от снимков – время в мс, прошедшее от момента воспламенения

Из рис.1 видно, что для частиц Al с $d_{32} = 17,5 \text{ мм}$ наблюдается большая пространственная неоднородность концентрации алюминия в донной области ЗР, где в первую очередь распространяется пламя, инициированное электрическим разрядом свечи. Время

распространения пламени по ЗР с момента воспламенения составляет 25 мс. Видно, как пламя первоначально возникает в очаге и от него распространяется по ЗР. По причине полидисперсности порошка АСД-1, вначале происходит воспламенение и выгорание мелких фракций частиц Al . После того, как пламя заполняет весь объем ЗР, формируется фронт пламени, который имеет форму одного или нескольких языков вырывающихся из ЗР. Затем реагирующие объемы из ЗР переносятся в поток

свежей АВС и создают в ней очаги горения с последующим распространением пламени по всему потоку.

Результаты визуализации процесса развития начального очага и распространения пламени в ЗР для сферических частиц АСД-4 с $d_{32} = 7,5 \text{ мкм}$, показали, что с уменьшением диаметра частиц процесс развивается более динамично (Рис.2).

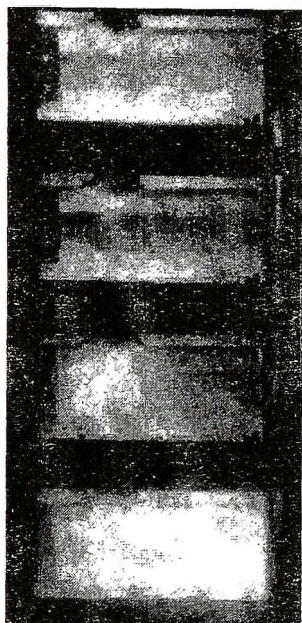


Рис.2. Развитие начального очага горения в зоне рециркуляции: $D_{KC} = 0,04 \text{ м}$; Горючее – АСД-4 ($d_{32} = 7,5 \text{ мкм}$); Направление потока аэровзвеси слева на право, параметры потока: $U_0 = 50 \text{ м/с}$; $\alpha = 1,1$; $T_0 = 293 \text{ К}$ Цифры слева от снимков – время в мсек, прошедшее от момента воспламенения

0
1,6
3,3

Возникший возле свечи зажигания, начальный очаг горения развивается и заполняет ЗР за 3,3 мс. Затем фронт пламени формируется вдоль «определяющей» цилиндрической поверхности (диаметр которой равен диаметру входного отверстия канала) и поджигает основной поток АВС.

4,9

Развитие процесса зажигания в потоке аэровзвеси содержащей, частицы А1 в форме пластин (средний размер частиц 100...140 мкм), несколько отличается от такового при наличии в потоке частиц сферической формы.

Воспламенившись от свечи зажигания, горячие частицы, минуя ЗР, попадают в основной поток. Это обусловлено, прежде всего, их размерами и характером движения плоских частиц в несущем воздушном потоке. Поскольку коэффициент сопротивления частиц неправильной формы зависит не только от числа Рейнольдса, но и от параметра формы, который принято называть коэффициентом сферичности [6].

Поскольку теплоотвод от начального очага осуществляется посредством турбулентной диффузии, и его интенсивность определяется величиной пульсационной скорости, то необходимо было выявить влияние турбулентности на процесс развития очага. Влияние начальной турбулентности ε_0 АВС на характер развития процесса зажигания исследовался в

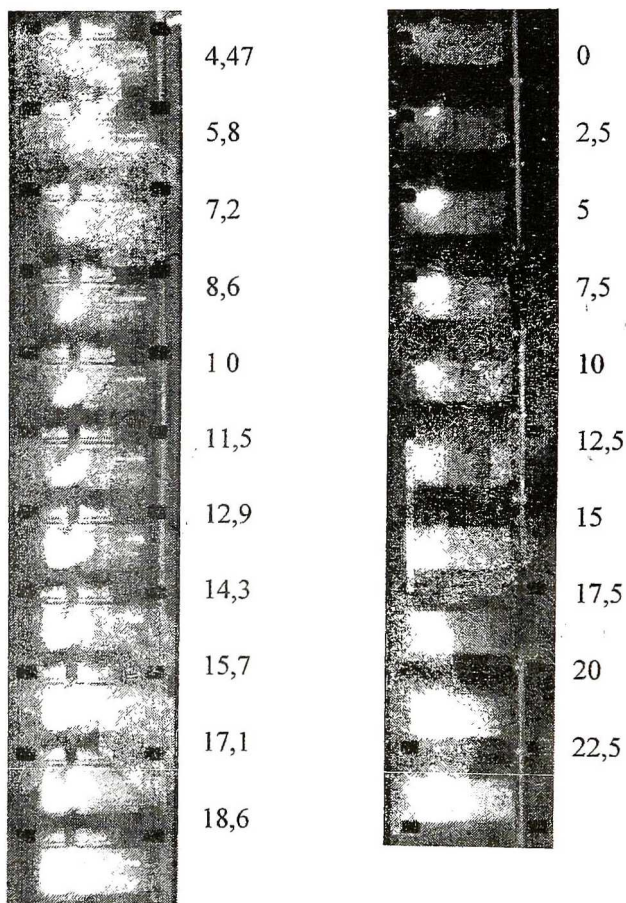
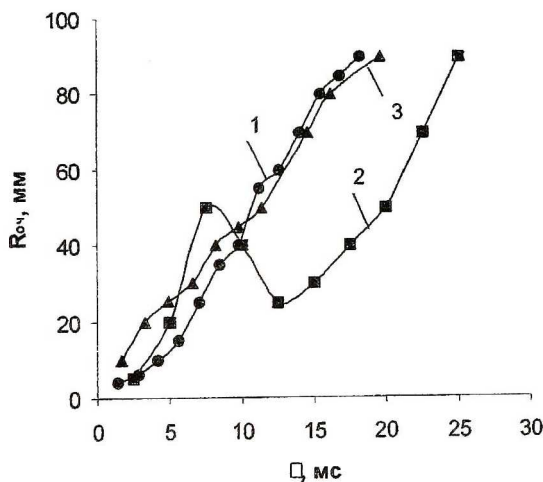


Рис.3. Влияние начальной турбулентности на развитие очага при раздельной подаче компонентов взрывзвеси в камеру. Направление потока слева направо; $D_{KC} = 0,09 м/с$; $U_0 = 90 м/с$; Горючее АСД-1; а – турбулентность трубная ($\varepsilon_0 = 5\%$); б - с решеткой на $l_p = 0,02 м$ ($\varepsilon_0 = 22\%$); камере диаметром $0,04 м$. При трубной турбулентности распространение пламени от свечи зажигания по всей ЗР происходит за 2 кадра, что со-

ставляет 3,3 мс. При повышенной турбулентности это время увеличивается до 4,9 мс. Время распространения пламени из ЗР в основной поток АВС в обоих случаях осуществляется за время экспонирования одного кадра, т. е. менее чем за 1,6 мс.

Если при трубной турбулентности пламя, вначале распространившись практически по всей ЗР, поджигает основной поток АВС, то при повышенной турбулентности очаги горения, не успевая распространиться в ЗР, вырывается в основной поток и там гаснут, тем самым затягивая процесс зажигания основного потока АВС. На последующих кадрах было видно, как пламя заполняет ЗР, распространяется в основной поток АВС и достигает среза камеры сгорания.

В работе также было выявлено влияние начальной турбулентности воздушного потока на развитие процесса зажигания при раздельной подаче



компонентов аэрозвеси в камеру сгорания. Когда воздух в камеру поступал через входное отверстие, а навеска порошка Al подавалась через специальный штуцер непосредственно в ЗР. Результаты киносъемки данного эксперимента представлены на рис.3. На рис. 4 показано влияние начальной турбулентности потока аэрозвеси ε_0 на динамику роста очага.

Из рис.4 видно, что процесс разви-

Рис.4. Влияние начальной турбулентности ε_0 на динамику роста очага $D_{КС} = 0,09 м$. Горючее – АСД-1 ($d_{32} = 17,5 мкм$); 1 – без решетки ($\varepsilon_0 = 5\%$), 2 – с решеткой на $l_p = 0,02 м$ ($\varepsilon_0 = 22\%$), 3 – с решеткой на $l_p = 0,057 м$ ($\varepsilon_0 = 12\%$),

тия начального очага носит нестационарный характер и его можно раз-

делить условно на две стадии. При трубной турбулентности на первой стадии развития темпы роста начального очага в течение первых ~ 10 мс меньше, чем таковые при повышенной турбулентности. Так как рост турбулентности приводит к увеличению скорости теплообменных процессов на поверхности частицы и скорость выделения тепла в процессе горения превосходит скорость теплоотвода. На второй стадии темпы роста очага при трубной турбулентности выше, чем при повышенной турбулентности. Это обусловлено тем, что на второй стадии развития очага скорость теплоотвода в окружающую среду вследствие излучения и турбулентной диффузии начинает превосходить скорость выделения тепла в процессе химической реакции.

Анализ и обработка полученных экспериментальных данных показали, что для обеспечения надежного воспламенения необходимо создать условия для возникновения начального очага около свечи, переброса пламени в зону рециркуляции и воспламенение алюминиево-воздушной смеси в зоне рециркуляции. Согласно [7], возникновение начального очага будет зависеть от двух конкурирующих процессов: разогрев очага за счет химической реакции и его охлаждение за счет теплопроводности. В критических условиях должно выполняться равенство:

$$t_{ch} = t_{cool} = t_h + t_{ind},$$

где t_{ch} – время химической реакции; t_{cool} – время охлаждения очага теплопроводностью; t_h – время прогрева частицы Al в очаге; t_{ind} – период индукции теплового взрыва. Для разработки модели искрового зажигания потока аэрозвеси частиц Al , также как и неподвижного облака аэрозвеси [8] (с учетом необходимых дополнений и упрощений) можно использовать тепловую модель зажигания горючей газовой смеси предложенной Я.Б. Зельдовичем [9].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Л е ф е в р А. Процессы в камерах сгорания ГТД. - М.: Мир, 1986. - 204 с.
2. B o y l e A.R., L l e w e l l y n F.R. J. Chem. Soc. Ind. – London: V. 69, 1950.

3. Егоров А.Г. Стабилизация пламени в турбулентном двухфазном потоке. - М.: Химическая физика, 2003. Т.22. №4. - С. 70-79.
4. Влияние начальной турбулентности потока алюминиево-воздушной смеси на процессы воспламенения и стабилизации пламени. / Егоров А.Г., Маркаров Э.Э., Павлов Д.А., Шайкин А.П. // Вестник СГАУ. Серия «Процессы горения, теплообмена и экология тепловых двигателей». Вып. 2. Часть 2. Самара 2002. - С.27-33.
5. Егоров А.Г. Время пребывания частиц алюминия в камерах сгорания с внезапным расширением. - М.: Химическая физика, 2003, Т.22, №11. - С. 54-63
6. Белоусов В.В. Теоретические основы процессов газоочистки. - М.: Металлургия, 1988. - 256 с.
7. Сеплярский Б.С., Ивлева Т.П. Изучение искрового зажигания твердых частиц с помощью очаговой модели воспламенения. // XII Симпозиум по горению и взрыву. Часть II. «Химическая физика процессов горения и взрыва». – Черноголовка. ИПХФ РАН, 2000. - С 47-48.
8. Губин Е.И., Дик И.Г. О зажигании пылевого облака искрой. ФГВ – 1986, №2. - С.10–17.
9. Зельдович Я.Б., Семенов Н.Н. К теории искрового воспламенения газовых взрывчатых смесей. Ж.Ф.Х. – 1949, Т.23. - С.11–64.

УДК 536.46

ПРЕДЕЛЫ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ АЭРОВЗВЕСИ ЧАСТИЦ АЛЮМИНИЯ В ПОТОКЕ

Егоров А.Г., Павлов Д.А., Русаков М.М., Шайкин А.П.

Тольяттинский государственный университет, г. Тольятти

Основными факторами, определяющими характеристики воспламенения смеси в камере сгорания являются система зажигания, параметры потока (давление, температура, скорость и турбулентность) и свойства топлива.

В отличие от пределов воспламенения концентрационные границы зажигания зависят еще и от ряда других, не постоянно присутствующих источников теплотерь, определяемых спецификой условий эксперимента (геометрией трубы, мощностью, геометрией и видом источника