

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАЧАЛЬНОГО ОЧАГА ПРИ ИСКРОВОМ ЗАЖИГАНИИ ТУРБУЛЕНТНОГО ПОТОКА АЛЮМИНИЕВО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ

2007 А. Г. Егоров

Тольяттинский государственный университет

Проведено экспериментальное исследование начального очага воспламенения в зоне рециркуляции при зажигании турбулентного потока алюминиево-воздушной смеси электрической искрой. Выявлено, что характер развития начального очага воспламенения в турбулентном потоке алюминиево-воздушной смеси соответствует характеру развития начального очага для однородной горючей смеси.

Известно [1], что воспламенение горючей смеси может производиться различными способами, например электрическим разрядом, нагретой поверхностью или любым другим внешним источником тепла. Зажигание горючей смеси искрой широко применяется в воздушно-реактивных двигателях.

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 затрудняется при увеличении скорости потока и интенсивности турбулентности [1, 2].

Аналогичных систематических исследований в потоках аэрозвесей металлических частиц пока нет, имеются только отдельные публикации, посвященные данной проблеме [3, 4]. Сложность явления заставляет исследователей обращаться к более простому случаю - воспламенению неподвижного облака взвеси частиц металлов в воздухе.

В статье представлены результаты исследования процесса развития начального очага воспламенения при искровом зажигании порошкообразного алюминия (Al) с целью организации надежного воспламенения алюминиево-воздушной смеси в реальных условиях прямооточных камер сгорания дви-

гательных установок летательных аппаратов (ЛА).

Экспериментальная установка, на которой проводились испытания, а также схема модели прямооточной камеры сгорания и гидродинамика течений в ней описаны в [5, 6].

Изотермические исследования проводились на моделях, изготовленных из органического стекла, неизотермические – из тугоплавкого стекла «Пирекс».

Уровень и масштаб турбулентности потока аэрозвеси изменялся с помощью решеток, которые представляли собой перфорированные диски с коэффициентом живого сечения $f = 0,65$ и устанавливались на различных расстояниях l_p от плоскости внезапного расширения.

В качестве горючего использовались порошки алюминия АСД-4 и АСД-1, выпускаемые отечественной промышленностью и соответствующие отраслевому стандарту и техническим условиям на их дисперсный состав. Несущим газом (окислителем) служил воздух с температурой 293 К.

Для визуализации процесса воспламенения применялся оптический метод с использованием кинокамеры СКС-1М, которая позволяла производить съемку со скоростью до 5000 кадров в секунду.

Известно [2], что для двигателей ЛА наиболее удобным и достаточно удовлетворительным источником зажигания является электрический разряд, который очень эффективно преобразует электрическую энергию в тепло, концентрирующееся 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 ($W = 0,05$ Дж).

Считается общепризнанным, что положение свечи имеет определяющее влияние как на характеристики воспламенения, так и на ее срок службы [2]. Поэтому необходимо было определить оптимальное место установки свечи в камере сгорания. Очевидным соображением при выборе наилучшего расположения свечи является то, что она должна находиться в пределах зоны рециркуляции так, чтобы очаг горения, инициированный искрой, переносился возвратным течением вверх, против направления основного потока. Это предполагает механизм воспламенения, при котором локальный очаг остается в зоне рециркуляции, циркулируя в ней как можно дольше и одновременно распространяясь вовне ее, пока, наконец, вся первичная зона камеры не будет заполнена пламенем.

Результаты исследований [7] по определению локального времени пребывания ($t_{пр}$) частиц алюминия в камере сгорания позволили выбрать оптимальное место установки свечи зажигания. Обнаруженная область зоны рециркуляции с максимальным временем пребывания частиц Al является оптимальным местом расположения свечи зажигания: $L_{св} = (0,5...1,2)H$.

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

Визуализация посредством скоростной киносъемки аэродинамики течения и процесса искрового зажигания в камере сгорания позволила выявить большую пространствен-

ную неоднородность концентрации алюминия по длине зоны рециркуляции. Выявлено также, что пламя, инициированное электрическим разрядом свечи, в первую очередь распространяется в донной области зоны рециркуляции, где время пребывания частиц Al было максимальным.

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

Известно [8], 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. 1 показаны два варианта развития начального очага воспламенения алюминиево-воздушной смеси в зоне рециркуляции прямоочной камеры сгорания с внезапным расширением диаметром $D_{КС} = 0,04$ м. На рисунке одновременно приведены примеры неудачного (рис. 1,а) и успешного (рис. 1,б-1,г) развития очага воспламенения.

В случае неудачного воспламенения зажигание и погасание начального очага происходило в течение экспозиции одного кадра, т. е. за 1,6 мс. На рис. 1,а был выбран наиболее продолжительный по времени случай неудачного воспламенения. В начальный период процесса зажигания (второй кадр сверху) первоначальное увеличение очага сменяется его уменьшением и последующим погасанием.

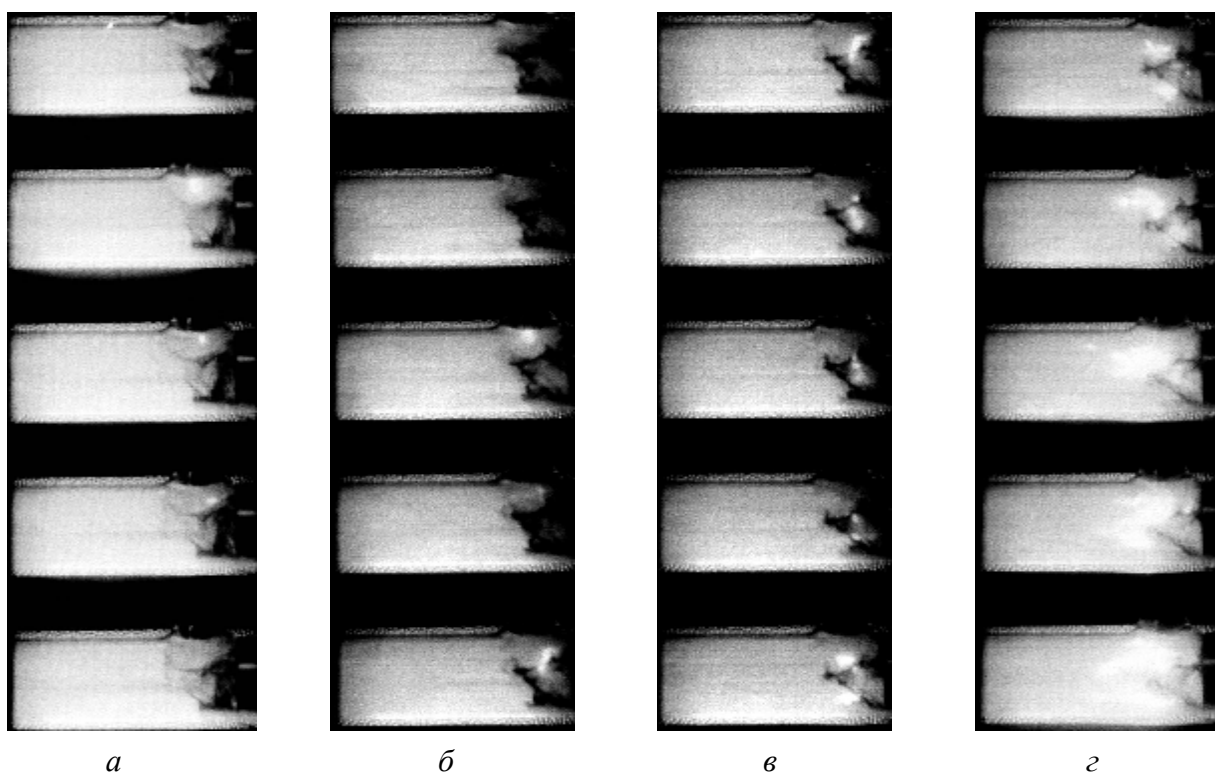


Рис. 1. Развитие начального очага в аэрозвеси частиц Al марки АСД-1
a – неудачное; *б*, *в*, *г* – успешное развитие; направление потока аэрозвеси справа налево;
 параметры потока: скорость на входе в камеру $U_0 = 50 \text{ м / с}$; состав смеси $\alpha = 1,1$;
 температура аэрозвеси на входе $T_0 = 293 \text{ К}$; скорость кино съемки – 600 кадр/с

В случае успешного воспламенения можно видеть (рис. 1, б), что очаг воспламенения в начальный момент времени уменьшается (четвертый кадр сверху). Этому предшествовало, естественно, также резкое увеличение размеров очага, что зафиксировано на третьем кадре сверху.

На третьем и четвертом кадрах видно, что очаг имеет сферическую форму. Затем под действием турбулентных пульсаций он вытягивается и раздваивается, что можно видеть на последующих кадрах (рис. 1, в). В дальнейшем процесс развития начального очага приобретает характер для установившегося распространения пламени (рис. 1, г). В донной области зоны рециркуляции появляется пламя, которое распространяется по всей зоне рециркуляции.

На рис. 2 представлены кривые изменения размеров начального очага по времени для угасающего (кривая 1) и распространяющегося пламени (кривая 2) для тех же самых условий, что и на рис. 1.

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

Вероятно, для того, чтобы электрическая искра могла привести к воспламенению в зоне рециркуляции алюминиево-воздуш-

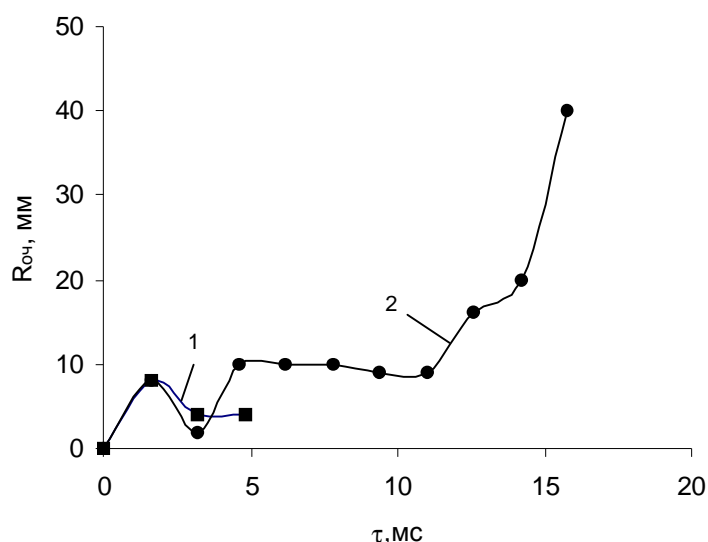


Рис. 2. Изменение размеров очага по времени для затухающего (1) и распространяющегося (2) пламени

ную смесь с частицами АСД-1, соответствующий ей критический радиус должен быть равен 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 успешным или неудачным необходим интервал времени в 4,9 мс.

Известно [9], что для того, чтобы осуществить искровое зажигание в гомогенной горючей смеси, соответствующий ей эквивалентный радиус $R_{эkv}$ должен быть в несколько раз больше, чем характерная ширина зоны ламинарного пламени b_n . В [10] было получено искомое условие воспламенения в простой форме: $R_{эkv} \geq 3,7b_n$.

Было отмечено [9], что данную формулу можно рассматривать только как качественную связь между мощностью источника воспламенения и параметрами горючей смеси. Полученное значение коэффициента пропорциональности указывает только на порядок этой величины, учитывая приближенность допущений, принятых при выводе формулы. Поэтому окончательная оценка справедливости формулы может быть сделана только на основании экспериментальных данных.

Таким образом, полученное экспериментальное значение критического размера

начального очага воспламенения для алюминиево-воздушной смеси $R_{кр} \approx 4$ мм соответствует коэффициенту пропорциональности 3,7 в формуле эквивалентного радиуса для гомогенной горючей смеси.

При исследовании фотографированием [8] процесса воспламенения метано-воздушной смеси в различные моменты времени было обнаружено, что после проскока искры радиус светящегося шарика в некоторых случаях сначала уменьшается (из-за охлаждения газа), а потом начинает увеличиваться. Однако полного перерыва свечения не происходит.

На серии последовательных фотографий процесса воспламенения можно видеть, что воспламенившийся очаг вначале имеет цилиндрическую форму и только примерно через 100 мкс его форма приближается к сферической. Примерно через 500 мкс сфера сплющивается вдоль оси электродов, видимо, под действием теплоотвода. В дальнейшем при $t \geq 4$ мс в случае воспламенения появляется нормальное сферическое пламя.

На рис. 3. приведены кривые изменения радиуса очага по времени для распространяющегося (кривая 2) и угасающего (кривая 1) пламени в метано-воздушной смеси при $a = 1,1$ [8]. При значении времени воспламенения $t \approx 1$ мс скорость роста распространяющегося минимальна. Этот момент соответствует критическому состоянию очага.

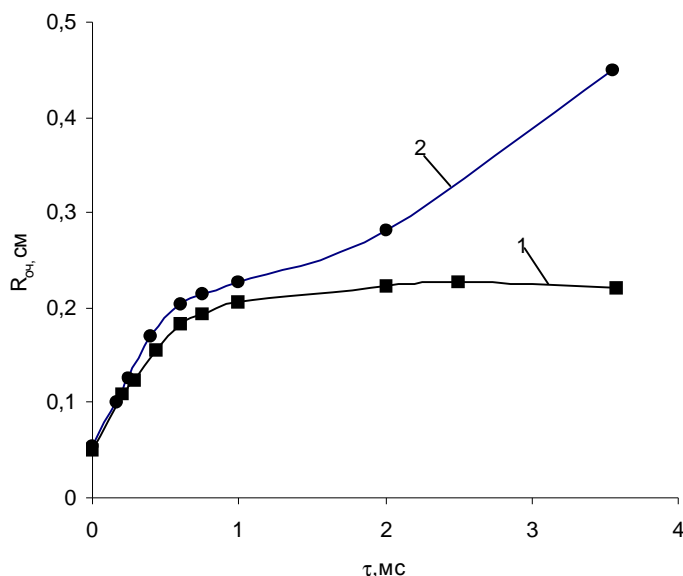


Рис. 3. Изменение радиуса очага по времени для затухающего (1) и распространяющегося (2) пламени [8]

Качественно характер полученной экспериментальной кривой зависимости $R_{оч}(t)$ соответствует теоретической кривой зависимости температурного напора $\Theta_0 = E(T_0 - T_n) / (RT_0^2)$ в очаге от времени $\Theta_0(t)$ (рис. 4) [11]. Было отмечено, что решение существенно зависит от Θ и d . При малых Θ вблизи критики температура может иметь два экстремума, природа которых в корне отлична от описанных в [12]. Так, при $\Theta = 5$, $b = 0,01$, $d = 4,8$ температура в центре очага сначала возрастает до 0,5 к моменту $t = 0,75$; затем уменьшается до 0,3 вследствие

теплоотвода в окружающую среду с границ очага.

Длительное время температура в центре очага практически не изменяется, и только при значении $t = 9,2$ происходит воспламенение. Такая особенность характерна для области вырожденного очагового взрыва [13], когда влияние химических реакций в окружающей очаг среде начинает сказываться уже при конечных временах: $t = 0$.

В области вырождения очагового воспламенения усиливается влияние параметра $b = RT_0 / E$ на характеристики процесса (рис. 4). Например, для $\Theta = 5$ и $d = 4,7$ $t =$

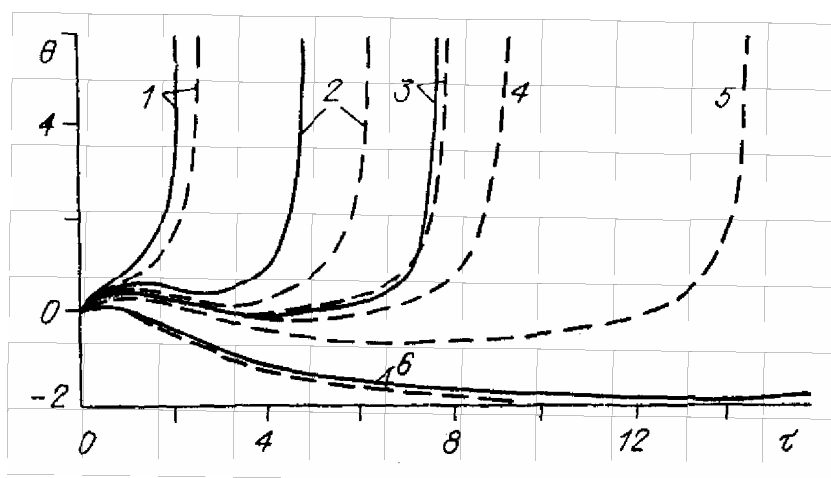


Рис. 4. Зависимость температуры в центре очага от времени при $b = RT_0 / E = 0,01$

(сплошные линии), 0,1 (штриховые); $\Theta = 5$;

$d = R_0^2 / (ct)$: 1 - 6,0, 2 - 4,95, 3 - 4,85, 4 - 4,8, 5 - 4,7, 6 - 4,0 [11]

= 14,5 и 7,8 при $b = 0,01$ и $0,01$, соответственно.

Факторов, влияющих на характер развития начального очага воспламенения и, как следствие, на ход всего процесса зажигания в потоке аэровзвеси, достаточно много. К ним относятся: мощность источника зажигания, дисперсный состав, форма и состояние поверхности частиц, теплота сгорания и другие физико-химические свойства, начальная температура, скорость, турбулентность, давление и др.

Изучив механизм развития начального очага воспламенения, можно в большинстве случаев качественно, а иногда и количественно оценить влияние каждого фактора на процесс искрового зажигания в турбулентном потоке аэровзвеси частиц порошкообразного алюминия.

Форма и состояние поверхности частиц металлов оказывает существенное влияние на процесс воспламенения и горения, так как химическая реакция протекает как в газовой фазе, так и на поверхности частиц. Поэтому исследовался процесс зажигания в потоках

аэровзвесей как со сферическими частицами Al , так и с частицами в форме пластин.

На рис. 5 и рис. 6 показан характер развития начального очага в потоке аэровзвеси, содержащей частицы сферической формы различного диаметра d_{32} .

На рис. 5 для частиц Al порошка АСД-1 с $d_{32} = 17,5 \mu m$ наблюдается большая пространственная неоднородность концентрации алюминия в донной области зоны рециркуляции, где в первую очередь распространяется пламя, инициированное электрическим разрядом свечи. Время распространения пламени по зоне рециркуляции с момента воспламенения составляет 25 мс. Видно, как пламя первоначально возникает в очаге и от него распространяется по зоне рециркуляции. По причине полидисперсности порошка АСД-1 вначале происходит воспламенение и выгорание мелких фракций частиц Al . После того, как пламя заполняет весь объем зоны рециркуляции, формируется фронт пламени, который имеет форму одного или нескольких языков, вырывающихся из зоны.

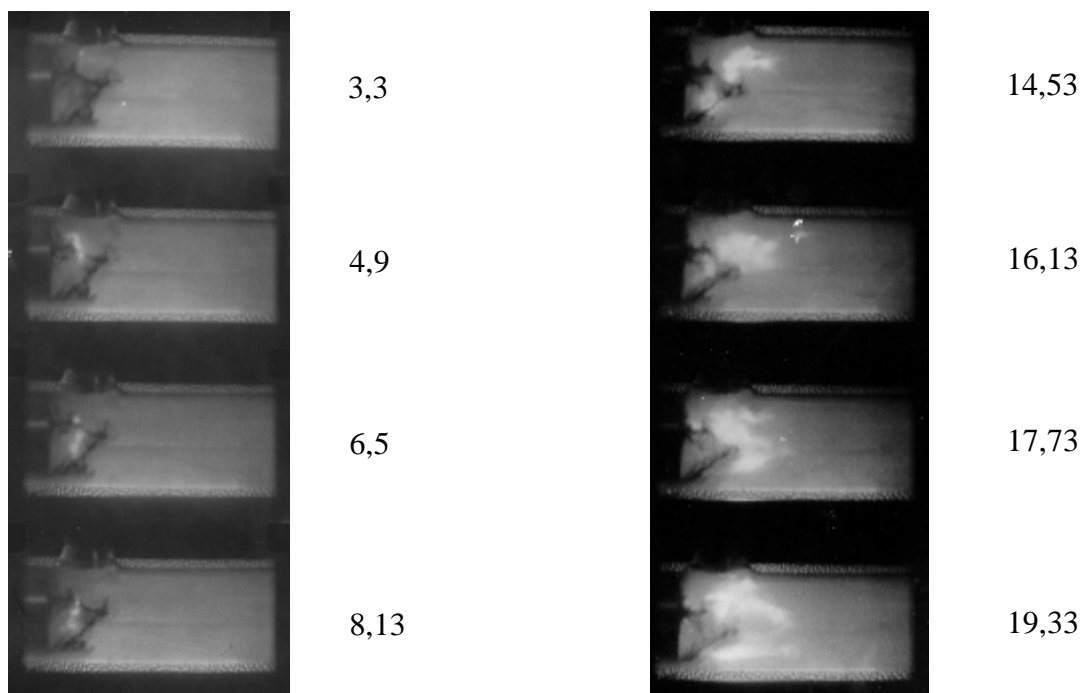
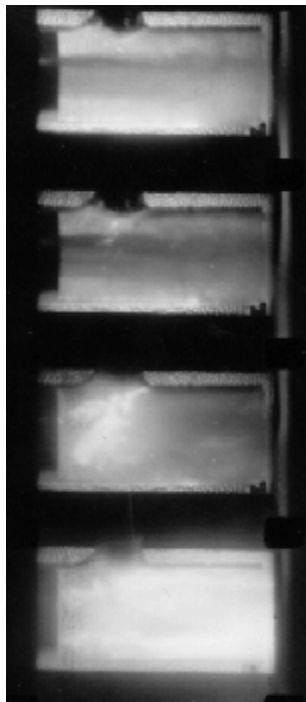


Рис. 5. Развитие очага в зоне рециркуляции камеры сгорания $D_{КС} = 0,04 м$: горючее – АСД-1 ($d_{32} = 17,5 \mu m$); направление потока аэровзвеси слева направо; параметры потока: $U_0 = 50 м/с$; $a = 1,1$; $T_0 = 293 K$; цифры справа от снимков – время в мс, прошедшее от момента воспламенения



0

1,6

3,3

4,9

*Рис. 6. Развитие очага горения в зоне рециркуляции:
 $D_{КС} = 0,04 м$; горючее – АСД-4 ($d_{32} = 7,5 мкм$); направление потока
 аэрозвеси слева направо; параметры потока: $U_0 = 50 м / с$;
 $a = 1,1$; $T_0 = 293 K$; цифры справа от снимков – время в мс,
 прошедшее от момента воспламенения*

Результаты исследования процесса развития начального очага воспламенения и распространения пламени в зоне рециркуляции для частиц АСД-4 с $d_{32} = 7,5 мкм$ (рис. 6) показали, что с уменьшением диаметра частиц d_{32} процесс развивается более динамично. Появившийся возле свечи зажигания начальный очаг горения развивается и заполняет зону рециркуляции за 3,3 мс. Затем фронт пламени формируется вдоль «определяющей» цилиндрической поверхности (диаметр которой равен диаметру входного отверстия канала) и поджигает основной поток алюминиево-воздушной смеси.

Поскольку теплоотвод от начального очага осуществляется посредством турбулентной диффузии и его интенсивность определяется величиной пульсационной скорости, то необходимо исследовать влияние турбулентности на процесс развития начального очага. Влияние начальной турбулентности e_0 потока алюминиево-воздушной смеси на характер развития начального очага воспламенения в зоне рециркуляции показан на рис. 7.

Как видно из рисунков 7,б и 7,в, турбулентное дробление очага усиливается с увеличением его размеров даже в том случае, когда интенсивность турбулентности пони-

жается с удалением от турбулизирующей решетки. Такое усиление действия турбулентного потока на сферическое пламя связано с тем, что очаг увеличенного размера становится доступным воздействию пульсаций все больших масштабов, которым соответствуют и большие значения пульсационной скорости [14].

При трубной турбулентности (рис. 7,а) с момента возникновения начального очага у свечи распространение пламени по всей зоне рециркуляции происходит за 2 кадра, что составляет 3,3 мс. При повышенной турбулентности (рис. 7, б, в) это время увеличивается до 4,9 мс. Время распространения пламени из зоны рециркуляции в основной поток алюминиево-воздушной смеси в обоих случаях осуществляется за время экспонирования одного кадра, т. е. менее чем за 1,6 мс.

Если при трубной турбулентности (рис. 7,а) пламя, вначале распространившись практически по всей зоне рециркуляции, поджигает основной поток алюминиево-воздушной смеси, то при повышенной турбулентности очаги горения, не успевая распространиться в зоне рециркуляции, выносятся в основной поток и там гаснут, тем самым затягивая процесс зажигания основного потока алюминиево-воздушной смеси. На последу-

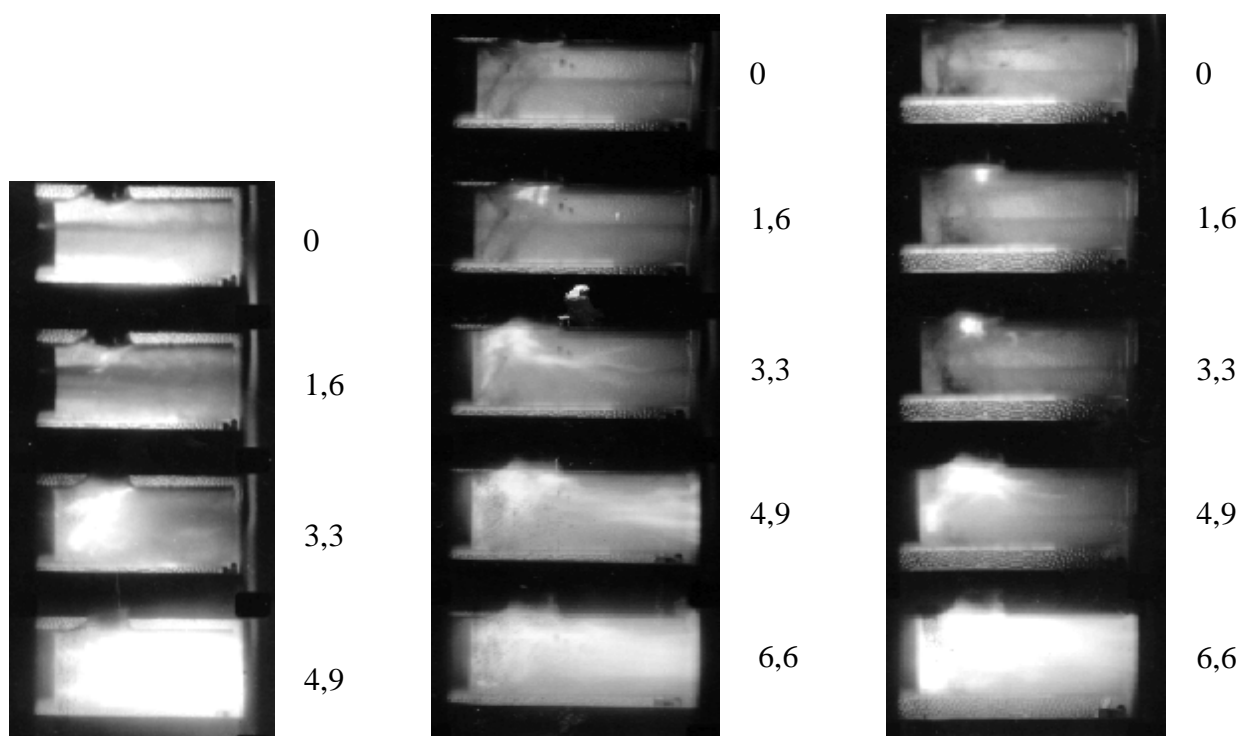


Рис. 7. Влияние начальной турбулентности e_0 на процесс развития очага в зоне рециркуляции; направление потока аэрозвеси слева на право: $D_{КС} = 0,04\text{ м}$; горючее – АСД-4 ($d_{32} = 7,5\text{ мкм}$); а) – без решетки ($e_0 = 5\%$), б) – с решеткой на $l_p = 0,02\text{ м}$ ($e_0 = 22\%$), в) – с решеткой на $l_p = 0,057\text{ м}$ ($e_0 = 12\%$); цифры слева от снимков – время в мс, прошедшее от момента воспламенения

ющих кадрах уже видно, как пламя заполняет зону рециркуляции и распространяется в основной поток алюминиево-воздушной смеси.

Отмечено [14], что для однородной смеси тормозящее действие турбулентности на развитие пламени в начальной стадии может быть связано с двумя эффектами: усилением теплоотдачи от начального очага реакции, затрудняющим воспламенение, и расширением зоны реакции в турбулентном пламени, снижающим среднюю температуру газа в нем и, соответственно, степень его расширения.

Результаты исследований показали, что процесс развития начального очага в зоне рециркуляции в турбулентном потоке алюминиево-воздушной смеси, содержащей частицы АСД-4, протекает в две стадии. При турбулентности на начальной стадии развития темпы роста начального очага в течение первых 2 мс ниже, чем при установке решеток. На второй стадии развития со 2 по 5 мс темпы роста очага при турбулентности

выше, чем в опытах с установкой решеток (рис. 8).

Выявлено влияние начальной турбулентности воздушного потока на развитие процесса зажигания при отдельной подаче компонентов аэрозвеси в камеру сгорания. Воздух в камеру поступал через входное отверстие, а навеска порошка Al подавалась через специальный штуцер непосредственно в зону рециркуляции.

Получено, что при повышенной турбулентности первоначальное увеличение роста начального очага сменяется его замедлением. Такой характер развития начального пламени был отмечен ранее и в турбулентных газоздушных смесях. При интенсивной турбулентности и в сильно разбавленных смесях в течение значительного интервала времени (до 10 мс после искры) наблюдается прекращение развития очага пламени, а иногда и его затухание [14].

На рис. 9 показано влияние начальной турбулентности потока воздуха на динамику

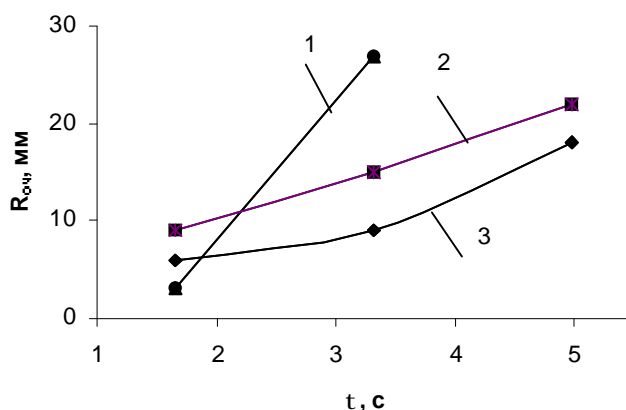


Рис. 8. Влияние турбулентности на динамику роста очага в зоне рециркуляции: горючее АСД-4; $D_{KC} = 0,04 м$; 1 – без решетки ($e_0 = 5\%$), 2 – с решеткой на $l_p = 0,02 м$ ($e_0 = 22\%$), 3 – с решеткой на $l_p = 0,057 м$ ($e_0 = 12\%$)

роста очага для порошка АСД-1 при отдельной подаче компонентов аэрозвеси в камеру сгорания диаметром 0,09 м.

Из рисунка видно, что процесс развития начального очага в зоне рециркуляции при отдельной подаче так же, как при совместной подаче компонентов аэрозвеси в камеру, протекает в двух фазах. В течение первой фазы (~ 10 мс) темпы роста очага при повышенной турбулентности выше, чем при трубной турбулентности. Затем во второй фазе темпы роста очага при повышенной турбулентности становятся ниже, чем при трубной турбулентности.

Таким образом, процесс развития начального очага в зоне рециркуляции проходит в обоих случаях в две стадии. Первая стадия, когда скорость выделения тепла в процессе химической реакции превосходит скорость теплоотвода в окружающую среду, составляет 1/3 от общего времени развития очага.

Увеличение турбулентности потока аэрозвеси оказывает положительное влияние на размеры начального очага воспламенения в зоне рециркуляции на первой стадии развития и отрицательно - на второй.

С увеличением среднего диаметра частиц алюминия с 7,5 до 17,5 мкм время распространения пламени по зоне рециркуляции увеличивается с 5 до 25 мс.

Полученные скоростной киносъемкой экспериментальные данные показали, что для

обеспечения надежного процесса воспламенения основного потока алюминиево-воздушной смеси необходимо создать условия для возникновения начального очага около свечи, переброса пламени в зону рециркуляции и воспламенения 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 [15]:

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

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.

Условие переброса пламени для алюминиево-воздушной смеси в исследованном диапазоне размеров частиц в зоне рециркуляции так же, как и в бензовоздушной смеси [16], может быть описано выражением

$$U_{c6}/U_n \leq L_{zp}(1 - \bar{L}_{c6})/R_{kc}(1 - \sqrt{B_2}).$$

Это условие определяется нормальной скоростью распространения пламени (U_n), скоростью потока у свечи (U_{c6}), размерами зоны рециркуляции (L_{zp}), координатой свечи зажигания (\bar{L}_{c6}) и геометрическими параметрами модели ($R_{kc}, B_2 = H^2/D_{kc}^2$).

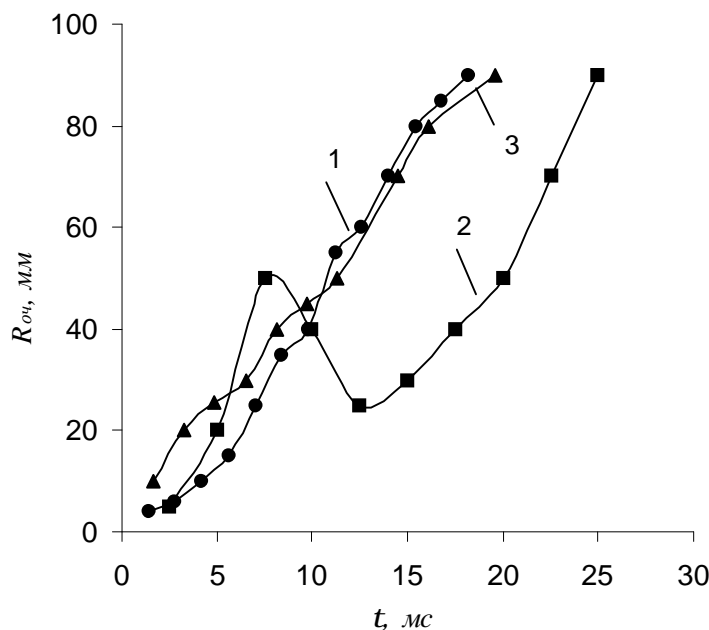


Рис. 9. Влияние начальной турбулентности воздуха e_0 на динамику роста очага при раздельной подаче компонентов взрывзвеси в камеру сгорания: $D_{КС} = 0,09 м$; горючее – АСД-1 ($d_{32} = 17,5 мкм$); 1 – без решетки ($e_0 = 5\%$), 2 – с решеткой на $l_p = 0,02 м$ ($e_0 = 22\%$), 3 – с решеткой на $l_p = 0,057 м$ ($e_0 = 12\%$)

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

$$\frac{t_{np}}{t_z} \geq \frac{H \cdot U_n}{U_{zp}} \cdot a = Mi^{soen},$$

где t_z – время горения, Mi^{soen} – критерий Михельсона на границе воспламенения, a – коэффициент температуропроводности.

Таким образом, на основе полученных данных в результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Самолетную систему зажигания с поверхностной свечой СПН-4-3Т можно использовать для зажигания турбулентного потока алюминиево-воздушной смеси содержащей частицы алюминия марок АСД-4 и АСД-1.

2. Качественно характер развития начального очага зажигания в турбулентном потоке алюминиево-воздушной смеси в исследованном диапазоне размеров частиц алюминия соответствует характеру развития начального очага при воспламенении однородной горючей смеси.

3. Процесс развития начального очага зажигания алюминиево-воздушной смеси в

зоне рециркуляции проходит в две стадии. Первая стадия, когда скорость выделения тепла в процессе химической реакции превосходит скорость теплоотвода в окружающую среду и составляет 1/3 от общего времени воспламенения.

4. Увеличение турбулентности потока алюминиево-воздушной смеси на входе в камеру сгорания положительно влияет на первую стадию развития начального очага зажигания и отрицательно - на вторую.

Список литературы

1. Раушенбах Б. В., Белый С. А., Беспалов И. В., Борадачев В. Я., Волынский М. С., Прудников А. Г. Физические основы рабочего процесса в камерах сгорания воздушно – реактивных двигателей. – М.: Машиностроение, 1961.
2. Лефевр А. Процессы в камерах сгорания ГТД. - М.: Мир, 1986.
3. Егоров А. Г., Русаков М. М., Шайкин А. П. Зажигание турбулентного потока джужкопентной газозвеси // Труды Всероссийской научно-технической конференции. Процессы горения, теплообмена и экологии тепловых двигателей.-Самара, 2000. - С. 43-57.

4. Егоров А. Г., Малинин В. И. Искровое зажигание и пределы воспламенения в потоке взвеси частиц алюминия // IV Международная школа-семинар «Внутрикамерные процессы, горение и газовая динамика дисперсных систем». Сборник материалов. - С. Петербург, 2004. - Том № 1. - С. 36 – 39.
5. Егоров А. Г., Кальней Е. Д., Шайкин А. П. Стабилизация пламени порошкообразного металлического горючего в турбулентном потоке воздуха // Физика горения и взрыва. - 2002. - Т. 37. - № 5. - С. 28 – 35.
6. Егоров А. Г., Маркаров Э. Э., Павлов Д. А., Шайкин А. П. Влияние начальной турбулентности потока алюминиево-воздушной смеси на процессы воспламенения и стабилизации пламени // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени С.П. Королева. - 2002. - № 2. - С. 27 – 32.
7. Егоров А. Г. Время пребывания частиц алюминия в камерах сгорания с внезапным расширением – М.: Химическая физика. – 2003. – Т. 22. - №11. - С. 54-63.
8. Кумагаи. Горение. – М: Химия, 1980.
9. Щетинков Е. С. Физика горения газов. - М.: Наука, 1965.
10. Зельдович Я. Б. Журнал экспериментальной и теоретической физики. - 1941. - № 11. - С. 159.
11. Буркина Р. С., Князева А. Г. Исследование очагового теплового воспламенения и режима его вырождения // Физика горения и взрыва. - 1992. - Т.28. - №3. - С. 3 – 8.
12. Князева А. Г., Буркина Р. С., Виллюнов В. Н. Особенности очагового теплового воспламенения при различных начальных распределениях температуры // Физика горения и взрыва. - 1988. - Т.24. - № 3. - С. 45.
13. Мержанов А. Г., Барзыкин В. В, Гонтовская В. Т. // Доклад АН СССР. - 1963. - Т. 148. - № 2. - С. 380.
14. Соколик А. С. Самовоспламенение, пламя и детонация в газах. - М.: Изд. Академии наук СССР, 1960.
15. Сеплярский Б. С., Ивлева Т. П. Изучение искрового зажигания взвеси твердых частиц с помощью очаговой модели воспламенения // XII Симпозиум по горению и взрыву // Химическая физика горения и взрыва. Ч.2. – Черноголовка. - 2000. – С. 47-48.
16. Лукачев С. В., Ланский А. М., Абрашкин В. Ю., Диденко А. А. и др. Рабочий процесс камер сгорания малоразмерных ГТД, проблемы и некоторые пути повышения его эффективности // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. С.П. Королева. - Самара. - 1998. - Выпуск №1. - С.11 – 38.