

УДК 536.46

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО ВЗРЫВА В ПОТОКЕ ПСЕВДОЖИДКОГО ТОПЛИВА

© 2011 А. Г. Егоров<sup>1</sup>, А. И. Сафронов<sup>1</sup>, А. С. Тизиров<sup>1</sup>, С. В. Иванин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Тольяттинский государственный университет (ТГУ)

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский военный инженерно-технический институт (ВИТИ)

На основе модели очагового теплового воспламенения экспериментально исследован процесс электроискрового зажигания потока аэрозвеси частиц алюминия в канале с внезапным расширением. Определен критический радиус начального очага воспламенения, изучена динамика процесса и установлено влияние интенсивности турбулентности на развитие очага.

*Аэрозвеси, тепловой взрыв, искровое зажигание, воспламенение, зона рециркуляции, критический радиус, период индукции.*

Использование порошкообразных металлов в активных средах, с которыми сталкивается новая техника и практика, резко стимулировало постановку работы по выявлению характерных особенностей и закономерностей воспламенения и самовозгорания частиц металлов в условиях их промышленного производства, эксплуатации и хранения.

В настоящее время такие металлы, как алюминий, бор, магний, являются одним из основных компонентов твердых ракетных топлив и пиротехнических составов. Применение порошкообразного металлического горючего (ПМГ) в реактивных двигателях открывает новое направление в реактивном двигателестроении.

Для теоретического описания процесса зажигания облака газозвеси искровым разрядом используется модель очагового теплового воспламенения. Проблеме очагового теплового воспламенения посвящено большое количество работ численного и приближенно-аналитического характера.

В тепловой теории воспламенения задача об очаговом взрыве сводится к анализу развития начального температурного профиля в реакционно-способной среде, а также определению критического значения параметра Франк-Каменецкого:

$$d^{cr} = R_0^2 / ct_a, \quad (1)$$

где  $R_0$  - радиус очага разогрева;  $c$  - температуропроводность вещества;  $t_a$  - период адиабатической индукции [1].

Одиночная сферическая частица металла в нагретом газе - очень удобный объект для описания теплового взрыва благодаря двум особенностям: 1) отсутствие распределения температуры в частице (безградиентное температурное поле); 2) очень простое и физически четкое выражение для коэффициента теплоотдачи  $a$ .

Для мелких частиц, несмотря на возможные высокие температуры теплового взрыва, роль лучистой составляющей  $a_r$  обычно невелика. Следовательно, критерий Био можно записать:

$$Bi = a_c r_0 / I_p = I_g / I_p, \quad (2)$$

где  $a_c$  - кондуктивная составляющая коэффициента теплоотдачи;  $r_0$  - радиус частицы металла;  $I_g$  - коэффициент теплопроводности газа;  $I_p$  - коэффициент теплопроводности частицы. Таким образом, задача сводится в чистом виде к постановке Семенова-Тодеса [2].

Закономерности теплового взрыва для одиночных частиц металлов и их совокупностей (облаков) отличаются, поскольку в совокупностях имеет место тепловое взаимодействие между частицами. В [3] дан анализ картины теплового взрыва для различных законов окисления ме-

таллов. Для линейного закона имеет место нулевой порядок тепловыделения и справедливо, как и для случая частиц взрывчатых веществ, критическое значение критерия Семенова:

$$Se^{cr} = 1/e. \quad (3)$$

Для параболического и экспоненциального законов имеет место сильное кинетическое (точнее, диффузионное) торможение реакции вследствие нарастания окисной плёнки. В реальных условиях теплового взрыва оно оказывает конкуренцию аррениусовскому тепловому самоускорению. В результате предвзрывная картина заметно отличается от классической [2].

Известно, 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 начального очага пламени при искровом разряде, а другая – неустойчивое распространение пламени этого очага. Возникновение начального очага будет зависеть от двух конкурирующих процессов: разогрев очага за счёт химической реакции и теплоотвода. Поэтому в критических условиях должно выполняться равенство [4]

$$t_{ch} = t_h + t_{ind} + t_{cool}, \quad (4)$$

где  $t_{ch}$  – время химической реакции;  $t_{cool}$  – время охлаждения очага;  $t_h$  – время прогрева частиц в очаге;  $t_{ind}$  – период индукции теплового взрыва.

Зажигание горючей газовой смеси искровым разрядом сводится к нагреванию некоторого сферического объёма этой смеси, радиус которого должен превышать характерную ширину фронта ламинарного пламени  $b_f$ . Формулу

$$R_{кр} \geq 3,7b_n, \quad \text{предложенную}$$

Я. Б. Зельдовичем, можно рассматривать только как качественную связь между мощностью источника воспламенения и параметрами горючей смеси. Полученное значение коэффициента пропорциональности указывает лишь на порядок этой величины ввиду допущений, принятых

при выводе формулы. Поэтому окончательная оценка справедливости формулы может быть сделана только на основании экспериментальных данных.

Для экспериментов характерно, что факт зажигания фиксировался по появлению вспышки без наблюдения за формированием устойчивого фронта горения.

В связи с вышеизложенным в настоящей работе при экспериментальном исследовании процесса электроискрового зажигания в потоке аэровзвеси частиц алюминия определялся критический радиус начального очага воспламенения и отслеживалась динамика его развития до формирования устойчивого фронта пламени в зоне рециркуляции.

Модели камер сгорания с внезапным расширением представляли собой осесимметричные каналы диаметром  $D_{кc} = 0,04 \dots 0,09 \text{ м}$  с входным отверстием диаметром  $d_0 = 0,02 \text{ м}$ . Относительная длина  $L_{кc} / d_0$  изменялась от 8,0 до 15,4, а степень расширения ( $r^* = D_{кc} / d_0$ ) варьировалась в диапазоне 2,0...4,5. В качестве характерного размера использовался параметр  $H$  ( $H = R_{кc} - r_0$ ), который изменялся от 0,01 до 0,035 м.

Испытания без горения проводились на моделях, изготовленных из органического стекла, с горением – из тугоплавкого стекла "Пирекс".

В опытах по исследованию влияния интенсивности турбулентности воздушного потока на развитие начального очага зажигания при отдельной подаче компонентов аэровзвеси в камеру сгорания воздух в камеру поступал через входное отверстие, а навеска порошка алюминия подавалась через специальный штуцер непосредственно в зону рециркуляции.

С помощью турбулизирующей решётки, которая устанавливалась на различных расстояниях от плоскости внезапного расширения  $l_p$ , изменялась пульсационная скорость  $\sqrt{u'^2}$ . С изменением параметра  $l_p$  соответственно менялось расстояние между решёткой и свечой за-

жигания. В этих условиях интенсивность турбулентности варьировалась от 5 до 12 %. Скорости и турбулентные характеристики чистого воздушного потока (без частиц  $Al$ ) измерялись с помощью комплекта термоанемометрической аппаратуры DISA-55M.

Для визуализации процесса развития начального очага воспламенения в зоне рециркуляции при искровом зажигании турбулентного потока аэровзвеси частиц алюминия применялся оптический метод с использованием кинокамеры СКС-1М, которая позволяла производить съёмку со скоростью до 5000 кадров в секунду.

В качестве горючего использовался порошок алюминия марки АСД-1, выпускаемый отечественной промышленностью и соответствующий отраслевому стандарту и техническим условиям на дисперсный состав. Несущим газом (окислителем) служил воздух с температурой 293 К.

Наиболее удобным и достаточно удовлетворительным источником зажигания является электрический разряд, эффективно преобразующий электрическую энергию в тепло, которое концентрируется в относительно малом объёме. Поэтому для зажигания турбулентного потока алюминиево-воздушной смеси использовалась свеча поверхностного разряда СПН-4-3Т с энергией разряда  $W = 0,05$  Дж. Механизм искрового зажигания в потоке металло-воздушной смеси так же, как и в неподвижном облаке газозвеси [5], можно представить следующим образом. Поскольку объём, заполненный частицами алюминия, можно считать много меньшим, чем у воздуха, то вероятность выделения тепла искрой в газовой среде много выше вероятности попадания частицы алюминия в очаг искрового разогрева. Искра выделяет в малом объёме газовой среды некоторое количество тепла, которое отводится из зоны тепловыделения излучением, теплопроводностью и мелко-масштабной турбулентной диффузией. Через промежуток времени тепловая волна начнёт прогревать частицы, инициируя химические реакции, тепловое самоуско-

рение которых может привести к зажиганию аэровзвеси. Частицы металла на первых этапах развития процесса зажигания служат стоком тепла, а после воспламенения (и перехода в диффузионный режим реагирования) частицы греют газ, который, в свою очередь, играет роль теплопроводящей среды.

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

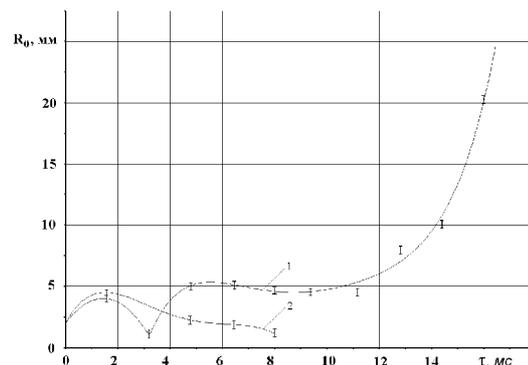


Рис. 1. Изменение размеров начального очага во времени распространяющегося (1) и затухающего (2) пламени

Для обоих случаев на начальном этапе процесса в течение  $\sim 1,6 \cdot 10^{-3}$  с наблюдается увеличение начального радиуса очага от 0 до 4 мм. Затем в интервале времени от  $1,6 \cdot 10^{-3}$  до  $3,3 \cdot 10^{-3}$  с происходит его уменьшение до  $\sim 2$  мм. При значении  $3,3 \cdot 10^{-3}$  с уменьшение размеров начального очага в обоих случаях прекращается. В случае срыва процесса зажигания (кривая 2) первоначальное увеличение размеров очага сменяется его уменьшением, и при значении радиуса начального очага разогрева  $\sim 2$  мм происходит его погасание.

При успешном развитии процесса (кривая 1) происходит увеличение радиуса начального очага до 5 мм ( $t \approx 4,9 \cdot 10^{-3}$  с) с последующим продолжительным периодом времени  $t = 4,9 \cdot 10^{-3} \dots 11 \cdot 10^{-3}$  с без изменения его размеров. Это говорит о том, что скорость роста распространяющегося пламени равна нулю, а температура в центре очага

практически не изменяется. Этот момент соответствует критическому состоянию очага. Такая особенность характерна для области вырожденного очагового взрыва.

Период индукции теплового взрыва  $t_e = 12,6 \cdot 10^{-3}$  с аэровзвеси частиц АСД-1 хорошо согласуется с периодом задержки воспламенения  $\tau_b = 12,7 \cdot 10^{-3}$  с, полученным Р. Фридманом и А. Мачеком в экспериментах по воспламенению мелкодисперсного алюминия в пламени газовой горелки.

Таким образом, на основе полученных экспериментальных данных можно сделать вывод о том, что воспламенение алюминиево-воздушной смеси в зоне рециркуляции может произойти в том случае, если критический радиус начального очага  $R_{кр} \geq 5$  мм. При этом условии можно предположить, что ближайšie к очагу частицы алюминия успеют воспламениться прежде, чем начальный очаг разогрева остынет. Для обеспечения воспламенения аэровзвеси частиц алюминия в зоне рециркуляции необходим интервал времени  $\sim 10 \cdot 10^{-3}$  с.

Следуя тепловой теории Я.Б. Зельдовича, зажигание алюминиево-воздушной смеси искровым разрядом сводится к нагреванию сферического объёма, радиус которого должен превышать характерную ширину пламени  $b_i$ , составляющую для аэровзвесей частиц алюминия 2 мм. Тогда, принимая полученное в эксперименте значение  $R_{кр} = 5$  мм, условие обеспечения воспламенения аэровзвеси частиц алюминия марки АСД-1 в зоне рециркуляции будет определяться выражением  $R_{кр} \geq 2,5b_n$ .

Полученный в настоящей работе характер экспериментальной кривой зависимости  $R_i(t)$  (рис.1) качественно соответствует теоретической кривой зависимости температурного напора в очаге от времени  $\Theta_0(t)$  [1]. При низких значениях  $\Theta_0$  (в нашем случае  $\Theta_0 = 0,2$ ) вдали от условий критики до момента воспламе-

ния очаг сужается. В окрестности  $d^{cr}$  очаг после некоторого сужения вновь расширяется еще до момента  $t_e$ , что связано с подключением реакции в окружающей среде по мере ее прогрева. Такая картина развития процесса и связана с понятием вырождения критических условий при малых значениях  $\Theta_0$  [1].

По полученным материалам скоростной киносъёмки также была определена видимая скорость пламени  $u_a = \frac{1}{S} dV / dt$  в потоке алюминиево-воздушной смеси после искрового зажигания по изменению объёма очага  $V$  и его поверхности  $S$ , для алюминиево-воздушной смеси АСД-1 при  $a = 1,1$  (рис.2).

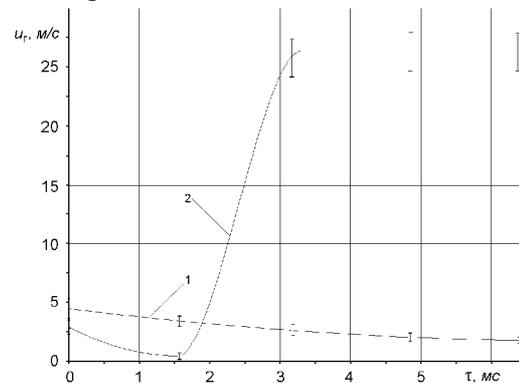


Рис. 2 Изменение во времени видимой скорости горения начального очага при  $a=1,1$ :  
1 - отказ зажигания; 2 - успешное зажигание

В отличие от однородной смеси в гетерогенной алюминиево-воздушной смеси воздействие интенсивности турбулентности на развитие пламени начального очага имеет свои особенности (рис.3).

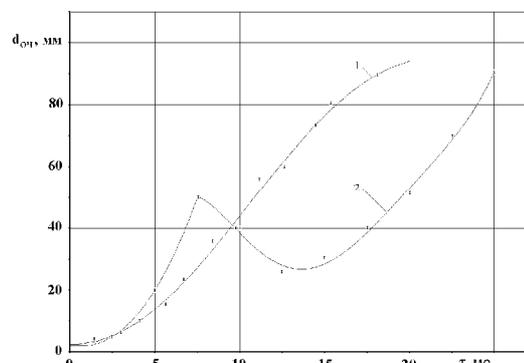


Рис. 3. Влияние интенсивности турбулентности на динамику роста начального очага:  
1 - без решётки; 2 - с решёткой

В течение первой фазы ( $t \approx 9 \cdot 10^{-3}$  с) темпы роста очага при установке решёток выше, чем при трубной турбулентности. Это связано с увеличением интенсивности тепломассообменных процессов, протекающих на поверхности частиц, приводящих к увеличению скорости химических реакций. Первая фаза, когда скорость выделения тепла в процессе химической реакции превосходит скорость теплоотвода в окружающую среду, составляет  $\sim 1/3$  от общего времени развития очага. Во второй фазе ( $9 \cdot 10^{-3} \dots 27 \cdot 10^{-3}$  с) темпы роста очага с увеличением интенсивности турбулентности (с установкой решётки) становятся ниже, чем при трубной турбулентности, что обусловлено усилением теплоотдачи от начального очага разогрева.

Используя полученное в настоящей работе значение диаметра очага разогрева, можно вычислить начальную скорость распространения пламени. Известно [2], что зависимость начальной скорости распространения от диаметра очага, по видимому, связана с нестационарным характером возбуждения процесса. Так, в нашем случае, для АСД-1 при значениях  $d=10$  мм и  $a=8 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с получим  $(dx/dt)_{\text{нач}}=16 \dots 24$  м/с.

В результате проведённых исследований определён критический радиус начального очага воспламенения при электроискровом зажигании потока аэрозвеси частиц алюминия марки АСД-1, изучена динамика процесса и установлено влияние интенсивности турбулентности на развитие очага в зоне рециркуляции.

Полученные результаты можно использовать для уточнения существующих математических моделей воспламенения аэрозвеси частиц алюминия в потоке, определения условий возникновения по-

жаров в трубопроводах, а также при организации процесса зажигания порошкообразного алюминия в камерах сгорания перспективных двигательных установок [6].

### Библиографический список

1. Буркина, Р. С. Исследование очагового теплового воспламенения и режима его вырождения [Текст] / Р. С. Буркина, А. Г. Князева // Физика горения и взрыва. – 1992. – Т. 28. -№ 3. – С. 3–8.
2. Барзыкин, В. В. Тепловые режимы экзотермических реакций: избр. тр. [Текст] / В. В. Барзыкин [и др.]; под ред. Н. И. Ваганова. – Черноголовка: ИСМАН, 2004. – 311 с.
3. Егоров, А. Г. Стабилизация пламени порошкообразного металлического горючего в турбулентном потоке воздуха [Текст] / А. Г. Егоров, Е. Д. Кальней, А. П. Шайкин // Физика горения и взрыва. - 2002. -Т. 37. -№ 5. -С. 28-35.
4. Сеплярский, Б. С. Изучение искрового зажигания газозвеси твердых частиц с помощью очаговой модели воспламенения [Текст] / Б. С. Сеплярский, Т. П. Ивлева // Химическая физика процессов горения и взрыва: XII симпозиум по горению и взрыву. – Черноголовка, 2000. – Ч. 2. – С. 28–30.
5. Губин, Е. И. О зажигании пылевого облака искрой [Текст] / Е. И. Губин, И. Г. Дик // Физика горения и взрыва. – 1986. -Т. 22, -№ 2. -С. 10-17.
6. Егоров А.Г. Процессы горения порошкообразного алюминия в прямоточных камерах реактивных двигательных установок [Текст] / А. Г. Егоров. – Самара: Изд-во Самар. науч. центра РАН, 2004. - 376 с.

## INVESTIGATION OF THERMAL EXPLOSION IN A PSEUDOLIQUID FUEL

© 2011 A. G. Yegorov<sup>1</sup>, A. I. Safronov<sup>1</sup>, A. S. Tizilov<sup>1</sup>, S. V. Ivanin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Togliatti State University (TSU)

<sup>2</sup> St. Petersburg Military Engineering Institute (SPMEI)

The process of electric spark ignition of aluminium particle air suspension is investigated experimentally in a duct with an expansion on the basis of a model of focal thermal ignition. The critical radius of the initial focal point of ignition is specified, the process dynamics is investigated and the influence of turbulence intensity on the development of the place of ignition is established.

*Air-suspensions, thermal explosion, spark ignition, combustion, recirculation zone, critical radius, induction period.*

### Информация об авторах

**Егоров Александр Григорьевич** – доктор технических наук, доцент, профессор, заведующий кафедрой «Начертательная геометрия и черчение», Тольяттинский государственный университет, [eag@tltsu.ru](mailto:eag@tltsu.ru). Область научных интересов: горение порошкообразных металлических горючих в потоке активного газа.

**Сафронов Александр Иванович** – доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Нанотехнологии и новые материалы», Санкт-Петербургский военный инженерно-технический институт. Область научных интересов: горение порошкообразных металлических горючих в потоке активного газа.

**Тизилев Андрей Сергеевич** – аспирант Тольяттинского государственного университета, [andrewtizilov@mail.ru](mailto:andrewtizilov@mail.ru). Область научных интересов: внутрикамерные процессы реактивных двигателей летательных аппаратов.

**Иванин Сергей Викторович** – аспирант Санкт-Петербургского военного инженерно-технического института. Область научных интересов: пожаро- и взрывоопасность реактивных установок на металлическом порошкообразном горючем.

**Alexander Grigorievich Yegorov** - Ph.D., associate professor, professor, head of the department "Descriptive Geometry and Drawing», [eag@tltsu.ru](mailto:eag@tltsu.ru). Area of research: powdered metal fuel combustion in the flow of active gas.

**Safronov Alexander Ivanovich** - doctor of physical and mathematical sciences, department "Nanotechnologies and new materials". Area of research: burning of powdered metal fuel in the flow of active gas.

**Tizilov Andrey Sergeevich** – post-graduate student Togliatti State University, [andrewtizilov@mail.ru](mailto:andrewtizilov@mail.ru). Area of research: intrachamber processes in aircraft jet engines.

**Ivanin Sergey Viktorovich** - student of St. Petersburg Military Engineering School. Area of research: fire and explosion hazards in rocket launchers using metal powder fuel.