

УДК 536.3

ВОСПЛАМЕНЕНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ПОТОКА АЭРОВЗВЕСИ ЧАСТИЦ АЛЮМИНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ИСКРОЙ

Тольяттинский государственный университет
Россия, 445667, г. Тольятти, Самарская обл., ул. Белорусская, 14

На основе модели очагового теплового зажигания исследован процесс воспламенения турбулентного потока аэровзвеси частиц алюминия порошка марки АСД-4. Определены критический радиус очага зажигания и условие его формирования. На основании визуализации процесса развития очага зажигания рассмотрены особенности формирования очага зажигания в случае распространяющегося и затухающего пламени, а также влияние начальной турбулентности потока алюминиево-воздушной смеси на развитие очага зажигания. С помощью полученного значения размера критического очага зажигания определена минимальная энергия искрового разряда, необходимая для надежного воспламенения алюминиево-воздушной смеси, а также теоретически определена скорость распространения пламени, подтверждающаяся экспериментальными исследованиями.

: очаг зажигания, критический радиус очага, электроискровое зажигание, турбулентность, аэровзвесь частиц алюминия.

В тепловой модели зажигания газовой смеси, предложенной Я.Б. Зельдовичем [1], искровой разряд приравнен к точечному, мгновенно действующему тепловому источнику и энергия, выделяемая искровым зарядом, нагревает до некоторой температуры сферический объем газа радиусом r . Накопленное в этом объеме тепло теплопроводностью передается окружающей смеси, вследствие чего температура в первоначально нагретом объеме снижается, а окружающей смеси – увеличивается.

Зажигание горючей газовой смеси искровым разрядом сводится к нагреванию некоторого сферического объема этой смеси, радиус которого r_{cr} должен превышать характерную ширину фронта ламинарного пламени δ_f :

$$r_{cr} \geq 3.7 \cdot \delta_f. \quad (1)$$

Это условие обеспечивает воспламенение окружающей смеси до момента остывания первоначального объема.

Данное условие (1) 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 условия зажигания начального очага (1) может быть сделана только на основании экспериментальных исследований [2].

Таким образом, как и для газовой смеси, в турбулентном потоке

Александр Григорьевич Егоров (д.т.н.), профессор кафедры «Дизайн и инженерная графика».

Андрей Сергеевич Тизлов, аспирант.

аэрозвеси частиц алюминия зажигание сведется к нагреванию сферического объема, радиус которого должен превышать характерную ширину пламени δ_f .

В настоящей работе представлены результаты исследования процесса воспламенения турбулентного потока аэрозвеси частиц алюминия порошка марки АСД-4 на основе модели теплового очагового зажигания и выявлено влияние начальной турбулентности на развитие очага.

Схема экспериментального стенда, описание узлов и агрегатов установки, а также методика проведения испытаний представлены в работах [3, 4]. Отметим только, что рабочий участок представляет собой осесимметричный канал диаметром $D_{cb} = 0.04$ м с диаметром входного отверстия $d_o = 0.02$ м.

Начальная скорость потока аэрозвеси на входе в рабочий участок канала изменялась в пределах $U_o = 5 \div 50$ м/с.

Интенсивность турбулентности ε варьировалась от 5 до 22 % при помощи турбулизирующей решетки, которая устанавливалась на различных расстояниях от плоскости внезапного расширения.

Для визуализации процесса развития начального очага воспламенения в зоне рециркуляции при искровом зажигании турбулентного потока аэрозвеси частиц алюминия применялся оптический метод с использованием кинокамеры СКС-1М со скоростью съемки 600 кадров в секунду.

В качестве горючего использовался порошок алюминия марки АСД-4 ($d_{32} = 7.4$ мкм). Окислителем служил воздух с начальной температурой 293 К.

Наиболее удобным и достаточно удовлетворительным источником зажигания является электрический разряд, эффективно преобразующий электрическую энергию в тепло, которое концентрируется в относительно малом объеме. Поэтому для зажигания турбулентного потока аэрозвеси частиц алюминия использовалась электрическая свеча поверхностного разряда.

Результаты визуализации процесса развития очага зажигания показали, что на начальном этапе происходит увеличение размера очага, затем наблюдается либо взрывной рост очага в случае распространяющегося пламени (рис. 1б), либо полное угасание очага в случае затухающего пламени (рис. 1а).

Для обоих случаев зажигания на начальном этапе, при $\tau \approx 1.0 \cdot 10^{-3}$ сек, происходит формирование начального очага. Затем, в случае затухающего пламени (рис. 1а), размеры очага за время $\tau \approx 1.6 \div 3.2 \cdot 10^{-3}$ сек остаются постоянным, после чего угасают. В случае распространяющегося пламени (рис. 1б) при $\tau \approx 1.6 \cdot 10^{-3}$ сек размер очага остается неизменным ($r_h \approx 1$ мм), после чего происходит резкое увеличение начального очага и заполнение зоны рециркуляции при $\tau \approx 3.2 \cdot 10^{-3}$ сек. Далее при $\tau \approx 4.8 \cdot 10^{-3}$ сек пламя из зоны рециркуляции распространяется в основной поток алюминиево-воздушной смеси.

В обоих случаях постоянное значение размера начального очага зажигания ($r_h \approx 1$ мм) за период времени $\tau \approx 0 \div 1.6 \cdot 10^{-3}$ сек 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 [5].

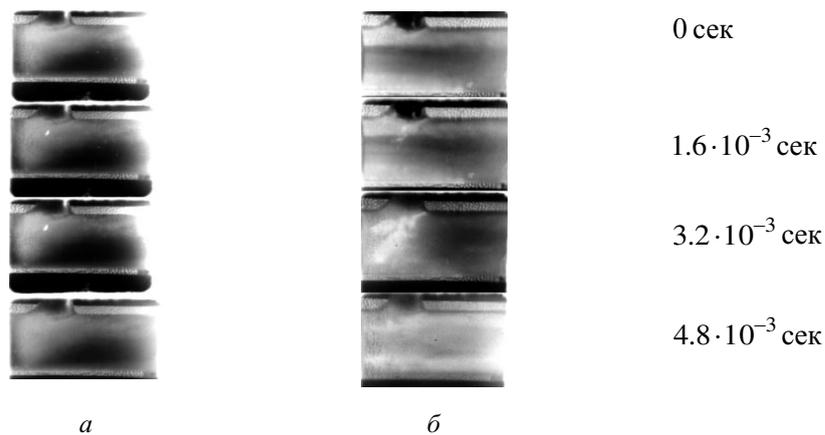


Рис. 1. Изменение начального очага зажигания:
 для затухающего (а) и распространяющегося (б) пламени.
 Порошок марки АСД-4 ($d_{32} = 7.4$ мкм); направление потока слева направо;
 $U_o = 50$ м/с; $T_o = 293$ К; $\varepsilon = 5\%$; $D_{cb} = 0.04$ м; $\alpha = 1.1$

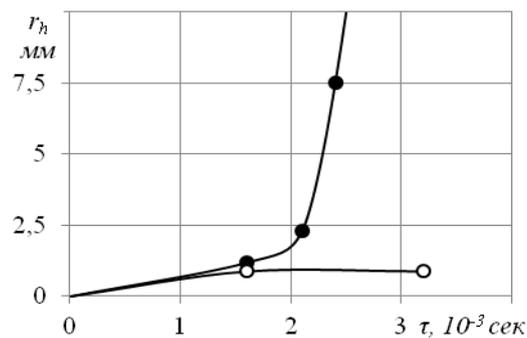


Рис. 2. Зависимость $r_h = f(\tau)$ для распространяющегося (кривая 1)
 и затухающего (кривая 2) пламени

На рис. 2 представлена зависимость $r_h = f(\tau)$ для затухающего (кривая 2) и распространяющегося (кривая 1) пламени. Из рисунка видно, что для частиц алюминия порошка АСД-4 с размером $d_{32} = 7.4$ мкм период индукции составляет $\tau \approx 2.0 \cdot 10^{-3}$ сек. Определенное в настоящей работе значение $\tau \approx 2.0 \cdot 10^{-3}$ сек согласуется с величиной периода индукции, полученной при воспламенении аэрозвеси порошка алюминия марки АСД-4 за отраженными ударными волнами в атмосфере чистого кислорода [6].

Таким образом, чтобы воспламенить аэрозвесь частиц алюминия порошка марки АСД-4 в зоне рециркуляции электрической искрой, критический радиус очага должен быть $r_{cr} \geq 1$ мм. При этом можно предположить, что ближайшие частицы алюминиево-воздушной смеси успеют воспламениться прежде, чем нагретый искрой начальный очаг остынет. Учитывая, что для порошка алюминия $\delta_f = 2 \cdot 10^{-3}$ м [7], условие Я.Б. Зельдовича (1) для аэрозвеси частиц алюми-

ния порошка марки АСД-4 запишется следующим образом: $r_{cr} \geq 0.5 \cdot \delta_f$.

Поведение начального очага зависит от того, будет ли скорость выделения тепла в процессе горения превосходить скорость теплоотвода в окружающую среду вследствие излучения и турбулентной диффузии. Поскольку теплоотвод от очага осуществляется посредством турбулентной диффузии, а его интенсивность определяется величиной пульсационной скорости, необходимо установить влияние начальной турбулентности на процесс развития начального очага в зоне рециркуляции.

Влияние начальной турбулентности на развитие очага зажигания для порошка марки АСД-4 представлено на рис. 3.

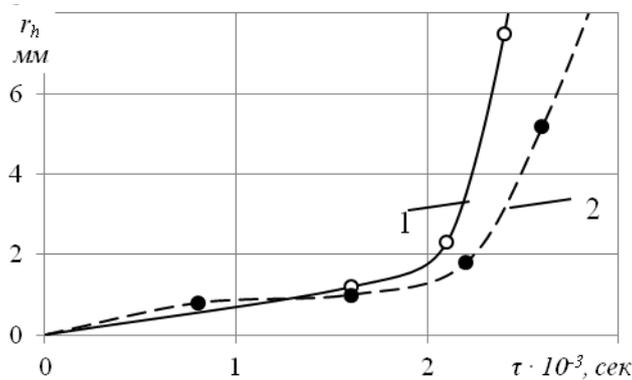


Рис. 3. Влияние начальной турбулентности на развитие очага зажигания для порошка марки АСД-4: 1 – $\varepsilon = 5\%$; 2 – $\varepsilon = 22\%$

На первой стадии процесса зажигания ($\tau \approx 1.3 \cdot 10^{-3}$ сек) наблюдается положительное влияние турбулентности на рост очага за счет увеличения интенсивности тепломассообменных процессов, протекающих на поверхности частицы и приводящих к увеличению скорости химической реакции. На второй стадии ($\tau \approx 1.5 \cdot 10^{-3} \div 3 \cdot 10^{-3}$ сек) турбулентность снижает скорость развития начального очага за счет интенсивного теплоотвода из зоны реакции.

Полученное значение радиуса критического очага можно использовать для расчета минимальной энергии искрового разряда E_{min} . Согласно Я.Б. Зельдовичу [1], создание очага горения, способного к распространению в аэрозвзвях частиц алюминия, так же как и в газозвзвях, будет обусловлено равенством его диаметра ширине зоны горения δ_f . Соответственно, E_{min} должна обеспечить нагрев определенного объема аэрозвеси радиусом r_{cr} , пропорциональным ширине фронта пламени, от начальной температуры T_o до температуры горения T_b [1].

$$E_{min} = \delta_f^3 \cdot c_p \cdot \rho \cdot (T_b - T_o), \quad (2)$$

где c_p – теплоемкость аэрозвеси при постоянном давлении;

ρ – плотность аэрозвеси (1782 кг/м^3) [8].

Расчет минимальной энергии по формуле (2) показал, что для воспламенения аэрозвеси частиц алюминия марки АСД-4 минимальное значение энергии искры

должно составлять 0,026 Дж, что соответствует экспериментально полученному значению энергии воспламенения 0,025 Дж [9].

Полученное значение радиуса критического очага зажигания можно также использовать для определения начальной скорости распространения пламени [10]:

$$(dx/dt)_o = (2 \div 3) \cdot 10^3 \cdot a/d, \quad (3)$$

где a – температуропроводность воздуха ($8 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$);
 d – диаметр очага зажигания.

Начальная скорость распространения пламени, рассчитанная по формуле (3) для аэровзвеси частиц алюминия марки АСД-4, составляет 80 ÷ 120 м/сек. Данный диапазон скорости распространения пламени согласуется с диапазоном значений 40 ÷ 160 м/сек, полученным в ходе исследования нестационарного распространения пламени аэровзвеси частиц алюминия в каналах [11].

В результате проведенных исследований определен критический радиус очага при электроискровом зажигании потока аэровзвеси частиц алюминия марки АСД-4, изучена динамика процесса и установлено влияние начальной турбулентности на развитие очага в зоне рециркуляции.

Полученные результаты можно использовать для разработки средств пожаробезопасности при расчете минимальной энергии зажигания потока аэровзвеси частиц алюминия в трубопроводе с переменным сечением; для уточнения существующих математических моделей воспламенения аэровзвеси частиц алюминия в турбулентном потоке воздуха; для организации процесса зажигания порошкообразного алюминия в камерах сгорания перспективных энергетических и технологических установок.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Зельдович Я.Б., Баренблатт Г.И., Либрович В.Б. и др.* Математическая теория горения и взрыва. – М.: Наука, 1980.
2. *Щетинков Е.С.* Физика горения газов. – М.: Наука, 1965. – 740 с.
3. *Егоров А.Г., Иванов С.В., Малинин В.И.* Исследование зажигания потока газозвеси на основе модели очагового теплового воспламенения // Физика горения и взрыва. – 2010. – Т. 46. – № 3. – С. 1-6.
4. *Егоров А.Г.* Искровое зажигание газозвеси в турбулентном потоке // Химическая физика. – 2006. – Т. 25. – № 1. – С. 74-78.
5. *Буркина Р.С., Князева А.Г.* Исследование очагового теплового воспламенения и режима его выгорания // Физика горения и взрыва. – 1992. – Т. 28. – № 3. – С. 3-8.
6. *Бойко В.М., Лотов В.В., Папырин А.Н.* Воспламенение газозвесей металлических порошков в отраженных УВ // Физика горения и взрыва. – 1989. – Т. 25. – № 2. – С. 67-74.
7. *Виленский Т.В., Хзмалян Д.М.* Динамика горения пылевидного топлива. – М.: Энергия, 1978.
8. *Крюков А.Ю.* Адаптация внутрикамерных процессов и элементов конструкции прямоточных воздушно-реактивных двигателей на порошковом горючем для конверсионного использования: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.07.05. / Пермь: Пермск. гос. техн. ун-т, 2003. – 18 с.
9. *Корольченко А.Я.* Пожаровзрывоопасность промышленной пыли. – М.: Химия, 1986. – 216 с.
10. *Барзыкин В.В.* Тепловые режимы экзотермических реакций. – Черногловка.: Энергия, 2004. – 311 с.
11. *Шевчук В.Г., Кондратьев Е.Н., Бойчук Л.В. и др.* Нестационарное распространение пламени в газозвеси частиц твердых горючих // Физика аэродисперсных систем. – 1985. – Вып. 27. – 70 с.

Статья поступила в редакцию 16 октября 2013 г.

IGNITION TURBULENT FLOW AEROSUSPENSION ALUMINUM PARTICLES ELECTRICAL SPARKS

A.G. Egorov , A.S. Tizilov

Togliatti State University
14, Str. Belaruskaya, Togliatti, Samara region, 445667, Russian Federation

Based on the model of focal thermal ignition investigated the ignition process of turbulent flow aerosuspension aluminum particles powder ASD -4. The critical radius of the hot spot and the condition of its formation. Based on the visualization of the development process are considered a hot spot features: formation of a hot spot in the case of propagating and evanescent flame effect of the initial turbulence aluminum- air mixture on the development of a hot spot. Using the obtained values of the critical size of a hot spot defined minimum spark energy required for reliable ignition of aluminum- air mixture, and theoretically determined the rate of flame propagation is confirmed by experimental studies.

Keywords: *ignition hearth, critical radius, electric spark ignition, turbulence, aerosuspension aluminum particles.*

*Alexander G. Egorov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Andrey S. Tizilov, Aspirant.*