

## О ПРЕДЕЛАХ СТАБИЛИЗАЦИИ ПЛАМЕНИ В ПОТОКЕ АЛЮМИНИЕВО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ

© 2012 А. С. Тизиров, А. Г. Егоров

Тольяттинский государственный университет

Определена область устойчивого горения порошка алюминия марки АСД в высокоскоростном потоке воздуха. Получена зависимость скорости срыва пламени в потоке алюминиево-воздушной смеси в диапазоне изменения  $\alpha=0,04 \div 3,0$ .

*Стабилизация, канал с внезапным расширением, горение, срыв пламени, состав смеси.*

### Введение

Известно [1], что для стабилизации пламени в турбулентном потоке металло-воздушной смеси необходимо наличие постоянного источника поджигания горючей смеси, поскольку скорость распространения пламени существенно меньше, чем скорость набегающего потока. Стационарное пламя при этом может существовать лишь при наличии постороннего непрерывного источника поджигания или если в процессе есть точка или зона, где имеет место равенство скоростей набегающего потока и распространения пламени. В последнем случае такую область можно рассматривать как неподвижный источник поджигания, от которого пламя будет распространяться в поток. В качестве основного регистрируемого параметра в этом случае принимается скорость турбулентного горения аэровзвеси, которая оценивается по критическому значению скорости потока, при котором происходит срыв пламени [2].

Также известно [3], что в сравнении с углеводородными горючими порошкообразные металлические горючие обладают рядом особенностей, затрудняющих их воспламенение и горение. Во-первых, частицы металлов обладают высокой температурой воспламенения ( $T_{ign} > 1000K$ ) и большим временем горения ( $\tau_b > 2$  мс). Во-вторых, капли металлов обладают большой вязкостью, мало дробятся и плохо испаряются даже при повышенных температурах. Однако порошки металла, распылённые в воздухе, не менее пожаровзрывоопасны, чем пары углеводородных горючих. Повышенная горючесть металлических порошков обусловлена большой химической активностью и высоким значением тепловыделения в химических реакциях (на единицу массы продуктов сгорания). В гомогенных смесях горючих газов с воздухом скорость распространения

пламени  $u_f$  имеет максимальное значение при коэффициентах избытка воздуха  $\alpha$ , близких к единице [4]. В аэровзвесьях капле углеродов и частиц угля закономерность сохраняется:  $u_{fmax}$  при  $\alpha = 0,7 \div 0,9$  [5]. Эти экспериментальные данные соответствуют теоретическим представлениям, согласно которым при  $\alpha \approx 1$  в указанных смесях тепловыделение, температура, нормальная скорость распространения пламени принимают максимальные значения [6].

Термодинамический анализ горения металлических частиц в потоке воздуха указывает на два максимума температуры продуктов сгорания. Первый максимум находится в диапазоне  $\alpha = 0,11 \div 0,14$ , что обусловлено реакцией азотирования. Второй максимум температуры продуктов сгорания соответствует диапазону значений  $\alpha = 0,9 \dots 1,1$  за счёт наличия достаточной концентрации кислорода в смеси [7].

Известные данные по определению области устойчивого горения порошков алюминия в потоке воздуха были получены при низких скоростях потока (до 40 м/с) в узком диапазоне  $\alpha$  (до 0,3) [8, 2], что не позволяет однозначно судить о влиянии состава смеси на пределы распространения пламени в высокоскоростном потоке алюминиево-воздушной смеси.

Целью настоящей работы является определение области устойчивого распространения пламени в высокоскоростном потоке алюминиево-воздушной смеси в диапазоне  $\alpha = 0,04 \div 3$ .

### Описание установки

Для проведения исследований процессов горения порошкообразного алюминия в потоке воздуха был разработан стенд с техническими характеристиками, обеспечивающими проведение испытаний в необхо-

димом диапазоне изменения режимных параметров эксперимента.

Источником сжатого воздуха служил компрессор Fubag с регулируемым выходным сжатием и расходом воздуха. Мощность компрессора составляет 1,5 кВт, рабочее давление 8 бар.

Для регистрации расхода воздуха применялся твердотельный датчик расхода воздуха FlowMate. Датчик расхода напрямую подключался к персональному компьютеру (ПК) посредством интерфейса RS232. Полученный сигнал обрабатывался программным обеспечением FlowMateSuite, что позволяло с высокой точностью и низкой погрешностью производить измерение расхода воздуха. Измерение температуры воздуха производилось

с помощью датчика МВТ 3560 скорость потока воздуха измерялась датчиком SCHMIDT SS 20.60 с возможностью измерять скорости потока до 200 м/с. Данные с обоих датчиков посредством АЦП передавались в ПК для дальнейшей обработки. Рабочий участок установки представляет собой осесимметричный канал с внезапным расширением.

Система зажигания экспериментальной установки состоит из источника питания  $U = 27$  В, агрегата зажигания КНПС-22 и свечи поверхностного разряда СПН-4-3Т.

Схема экспериментальной установки для испытаний в высокоскоростном потоке алюминиево-воздушной смеси представлена на рис. 1.

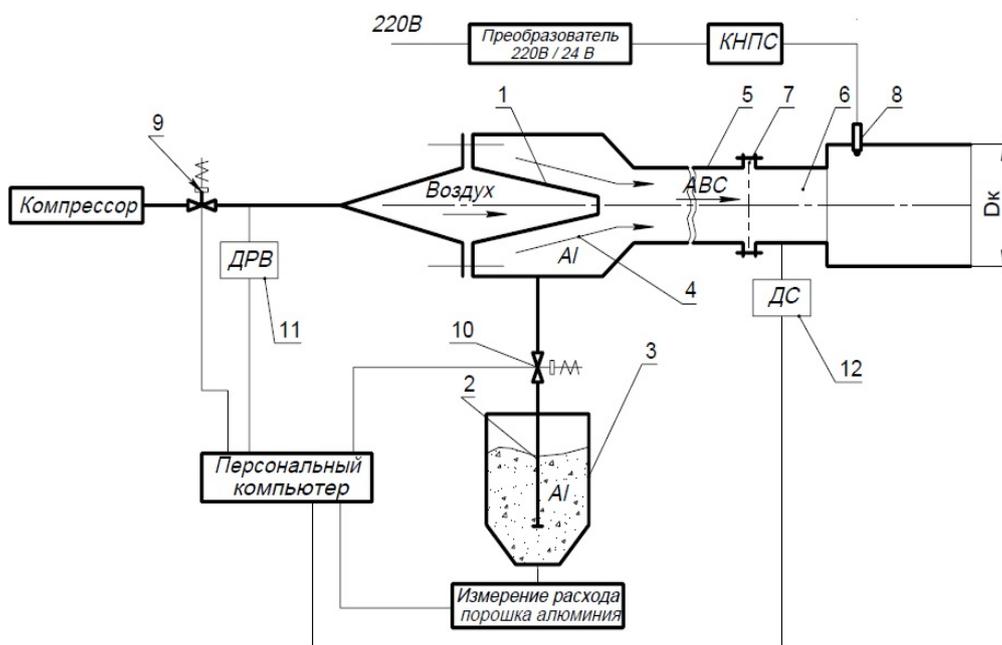


Рис. 1. Схема рабочего участка экспериментальной установки:

- 1 - сопло эжектора; 2 - трубка заборника порошка; 3 - бункер; 4 - приемная камера эжектора; 5 - камера смешения эжектора; 6 - канал с внезапным расширением; 7 - перфорированный диск; 8 - свеча зажигания; 9 - электроклапан компрессора; 10 - электроклапан подачи порошка алюминия; 11 - датчик расхода воздуха; 12 - датчик скорости

Работа установки осуществлялась следующим образом: под действием разряжения, создаваемого активной струей воздуха, истекающей из сопла эжектора 1, алюминиевый порошок из бункера 3 через заборную трубку 2 подавался в приемную камеру эжектора 4.

Из приемной камеры порошок алюминия попадал в камеру смешения эжектора 5, где он перемешивался активной струей воздуха, образуя алюминиево-воздушную смесь, которая затем поступала в канал с

внезапным расширением 6. Источником инициирования процесса горения служила электрическая свеча 8, которая устанавливалась за плоскостью внезапного расширения. Расходы воздуха и порошка алюминия регулировались при помощи электроклапанов 9, 10. Датчики 11 и 12 измеряли расход и скорость воздуха, поступающего от компрессора в сопло эжектора 1.

Уровень и масштаб турбулентности потока алюминиево-воздушной смеси на входе

в канал изменялись с помощью перфорированных дисков, которые устанавливались на выходе из камеры смешения эжектора на различных расстояниях до плоскости внезапного расширения.

### Методика проведения эксперимента

При произвольном расходе воздуха и горючего производилось поджигание смеси, после наступления установившегося процесса горения уменьшался расход горючего до наступления срыва. После того как расходы горючего и воздуха, соответствующие «бедному» срыву пламени, были зарегистрированы, процесс в канале восстанавливали и при том же самом расходе воздуха увеличивали расход алюминия до достижения «богатого» срыва пламени. Эти циклы повторялись при других значениях расхода и скорости воздуха до тех пор, пока не определился весь диапазон устойчивого горения.

Расход порошка алюминия рассчитывался посредством фиксации значений начального веса бункера с порошком и веса бункера после проведения замера, также проводилась фиксация времени замера. Зная вес бункера в начале и конце замера, т. е. общий расход порошка, и время, за которое он был израсходован,

секундный расход горючего порошка алюминия вычислялся ПК по формуле

$$G_{Al} = \frac{G_{\theta}}{\tau}, \quad (1)$$

где  $G_{Al}$  - расход порошка алюминия, кг/с;  $G_{\theta}$  - общий вес порошка, израсходованного за время;  $\tau$  - время, с.

Коэффициент избытка воздуха  $\alpha$  рассчитывался программными средствами по полученным от датчиков данным расхода горючего и окислителя по формуле:

$$\alpha = \frac{G_B}{L_o G_{Al}}, \quad (2)$$

где  $G_B$  - расход воздуха;  $L_o$  - стехиометрическое соотношение, для реакции алюминия с воздухом  $L_o = 3,84$ .

Суммарная погрешность измерения алюминиевого порошка составляет  $\sim 1,3\%$ , температуры  $\sim 5\%$ , расхода воздуха  $\sim 1,5\%$ .

### Анализ результатов

Полученные экспериментальные данные по определению области устойчивого горения алюминиево-воздушной смеси, представлены в виде зависимости  $U_{sb} = f(\alpha)$  на рис. 2. Как и в [3], при  $\alpha = 0,04 \dots 0,12$  наблюдается резкий рост скорости срыва пламени алюминиево-воздушной смеси, который достигает максимума при  $\alpha \approx 0,12$ .

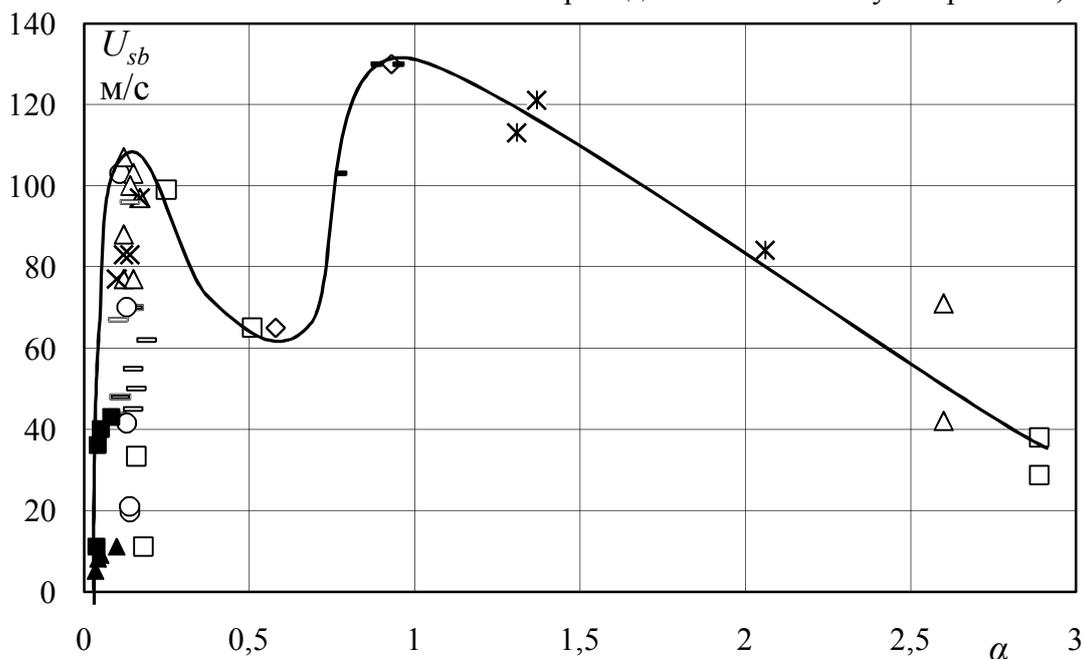


Рис. 2. Область устойчивого горения порошка алюминия марки АСД в высокоскоростном потоке воздуха; диаметр канала ; степень турбулентности температура воздуха  $T = 293\text{Л}$  размер частиц алюминия

○, □, ◻, △, -, +, ×, ✱ - данные настоящей работы; ▲, ■ - данные [7]

Рост скорости при низких значениях  $\alpha$  происходит за счёт реакции азотирования [8]. Далее, с увеличением  $\alpha$  растёт содержание кислорода в зоне реакции. Молекулы кислорода замещают молекулы азота, однако ввиду низкого содержания кислорода в зоне реакции в промежутке  $\alpha = 0,2 \div 0,6$  наблюдается резкое понижение скорости срыва пламени. Затем, при насыщении зоны реакции кислородом, количества которого достаточно для полного сгорания частиц алюминия, наблюдается рост скорости срыва пламени. Максимальное значение скорости срыва достигает при  $\alpha = 0,9 \div 1,1$ . При дальнейшем увеличении содержания кислорода скорость срыва равномерно уменьшается.

Полученные экспериментальные данные о пределах распространения пламени в высокоскоростном потоке алюминиево-воздушной смеси подтверждаются прове-

дёнными термодинамическим анализом [7], рис. 3. Представлена зависимость тепловыделения и термодинамической температуры продуктов сгорания аэрозвеси порошка алюминия от состава смеси. Из анализа рис. 2 и 3 видно, что максимумы термодинамической температуры продуктов сгорания (рис. 3) при  $\alpha = 0,1 \div 0,3$  и  $\alpha = 0,9 \div 1,1$  соответствуют максимумам скорости срыва пламени (рис. 2) при тех же значениях  $\alpha$ . Следует отметить, что изменение гидродинамических параметров потока смеси (скорость воздушного потока от 10 до 130 м/с; степень турбулентности 5 до 22%; диаметр канала с внезапным расширением от 40 до 80 мм; диаметр исходных частиц алюминия  $d_{32}$  от 7,4 до 17,5 мкм) не привело к качественному изменению зависимости скорости срыва пламени от состава смеси.

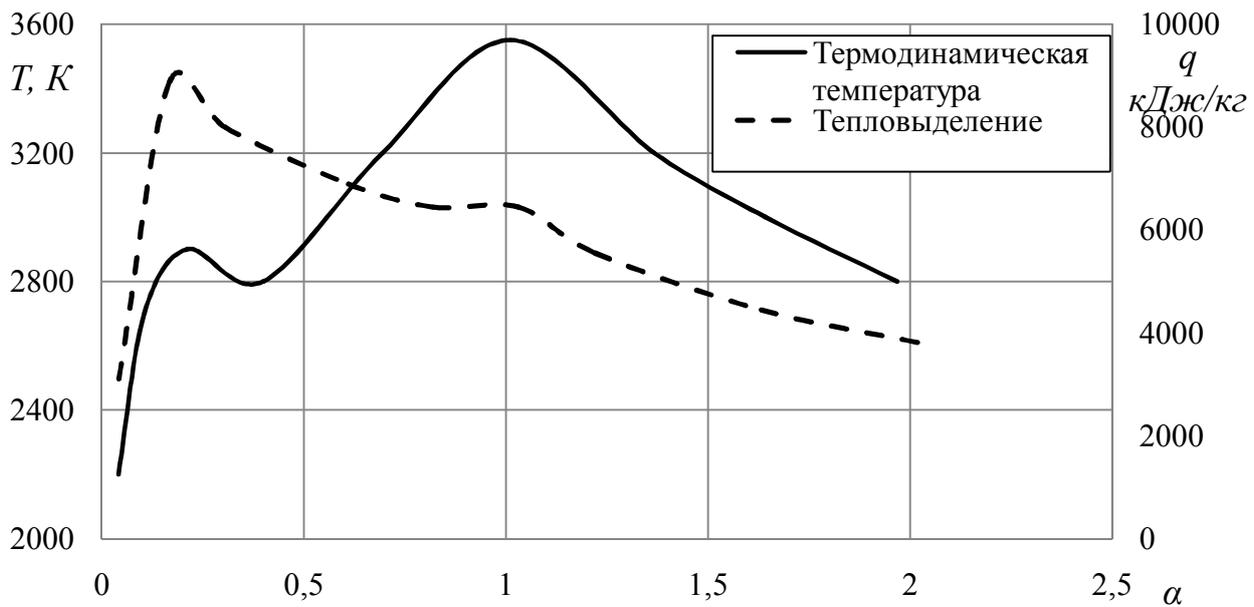


Рис. 3. Термодинамическая температура продуктов сгорания и тепловыделение:  $p = 0,1 \text{ МПа}, T_0 = 300 \text{ К}$  [6]

В [2, 9] отмечено, что скорость распространения пламени в алюминиево-воздушной смеси с ростом  $\alpha$  экспоненциально уменьшается и превалирующее воздействие на скорость срыва пламени оказывает не состав смеси потока, а гидродинамические параметры.

Однако полученные экспериментальные данные о пределах распространения пламени в алюминиево-воздушной смеси в диапазоне  $\alpha \approx 0,04 \div 3,0$  показали, что скорость химической реакции имеет два

максимума на кривой зависимости  $U_{sb} = f(\alpha)$  и что на скорость срыва пламени в значительной степени влияет состав смеси, а не гидродинамические параметры потока.

#### Библиографический список

1. Егоров, А.Г. Процессы горения порошкообразного алюминия в прямоточных камерах реактивных двигательных установок [Текст] / А.Г. Егоров.- Самара: СНЦ РАН, 2004.- 375 с.

2. Ягодников, Д.А. Воспламенение и горение порошкообразных металлов [Текст] / Д.А. Ягодников. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 432 с.
3. Малинин, В.И. Особенности распространения пламени по аэровзвеси частиц алюминия [Текст] / В.И. Малинин, В.И. Петренко // III междунар. школа-семинар: Внутрикамерные процессы, горение и газовая динамика дисперсных систем. - СПб.: БГТУ, 2000. - С. 135 - 137.
4. Бахман, Н.Н. Горение гетерогенных конденсированных систем [Текст] / Н.Н. Бахман, А.Ф. Беляев. - М.: Наука, 1967. - 226 с.
5. Физические основы рабочего процесса в камерах сгорания воздушно-реактивных двигателей [Текст] / Б.В. Раушенбах, С.А. Белый, И.В. Беспалов [и др.]. - М.: Машиностроение, 1961. - 521 с.
6. Франк-Каменецкий, Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике [Текст] / Д.А. Франк-Каменецкий. - М.: Наука, 1987. - 502 с.
7. Малинин, В.И. Воспламенение и горение аэровзвеси алюминия в реакторе высокотемпературного синтеза порошкообразного оксида алюминия [Текст] / В.И. Малинин, Е.И. Коломин, И.С. Антипин // Физика горения и взрыва. - 2002. - Т. 38.- № 5. -С. 41-51.
8. Малинин, В.И. Внутрикамерные процессы в установках на порошкообразных металлических горючих [Текст] / В.И. Малинин. - Екатеринбург – Пермь: УрО РАН, 2006. - 262 с.
9. Распространение фронта химической реакции в двухфазном потоке [Текст] / В.М. Кудрявцев, А.В. Сухов, А.В. Воронецкий [и др.] // Высокотемпературные газовые потоки, их получение и диагностика. - Харьков: ХАИ, 1986. - Вып. 4. - С. 66-69.

## THE LIMITS OF DISTRIBUTION IN A FLAME ALUMINUM-AIR MIXTURE

© 2012 A. S. Tizilov, A. G. Egorov

Togliatti State University

The region of stable combustion of aluminum powder ASD in high speed air flow. The dependence of the stall speed of the flame in the flow of aluminum-air mixture in the range of  $\alpha = 0,04 \div 3,0$ .

*Stabilization, channel with sudden expansion, combustion, flame failure, the composition of the mixture.*

### Информация об авторах

**Тизиллов Андрей Сергеевич**, аспирант, Тольяттинский государственный университет. E-mail: [andrewtizilov@mail.ru](mailto:andrewtizilov@mail.ru). Область научных интересов: ракетные двигатели.

**Егоров Александр Григорьевич**, доктор технических наук, профессор, Тольяттинский государственный университет. E-mail: [eag@tltsu.ru](mailto:eag@tltsu.ru). Область научных интересов: ракетные двигатели.

**Tizilov Andrey Sergeevich**, Post graduate, Togliatti State University. E-mail: [andrewtizilov@mail.ru](mailto:andrewtizilov@mail.ru). Area of Research: Rocket Engine.

**Egorov Alexander Grigorievich**, Doctor of Technical Sciences, Professor of Togliatti State University. E-mail: [eag@tltsu.ru](mailto:eag@tltsu.ru). Area of Research: Rocket Engine.