

УДК 536.46

А. Н. Бобров, Д. А. Ягодников, И. В. Попов

**ВОСПЛАМЕНЕНИЕ  
И ГОРЕНИЕ ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ ГАЗОВЗВЕСИ  
ПОРОШКООБРАЗНЫХ ГОРЮЧЕГО И ОКИСЛИТЕЛЯ**

Экспериментально исследованы характеристики воспламенения и горения двухкомпонентной газозвеси порошкообразных алюминия и перхлората аммония в условиях модельной установки. С использованием киносъемки внутрикамерных процессов и оптико-электронной дешифровки кинограмм определены особенности гидродинамической картины горения и подтверждена возможность организации устойчивого самоподдерживающегося воспламенения и горения Al в продуктах разложения ПХА. Установлено, что с ростом давления в диапазоне 0,2—4 МПа и уменьшением среднемассового диаметра порошкообразного алюминия от 22,5 до 10 мкм эффективность использования энергии газозвеси увеличивается.

Экспериментально-теоретическому исследованию процессов воспламенения и горения газодисперсных систем посвящено большое количество публикаций (например, [1—3]), в которых рассматриваются газозвеси, образованные диспергированными, как правило, в воздухе частицами горючего. Однако в последнее время для различных отраслей техники разрабатываются энергетические установки, использующие в качестве рабочего тела газозвеси порошкообразных частиц горючего и окислителя, способного разлагаться в волне горения.

Для повышения эффективности такого рода установок необходимо исследовать закономерности организации рабочего процесса, связанные с подачей, смесеобразованием и преобразованием химической энергии двухкомпонентной газозвеси в тепловую. Поскольку публикации по данному вопросу [4] ограничены, в настоящей работе определяли характеристики воспламенения и горения двухкомпонентной газозвеси при различных значениях режимных параметров. В качестве порошкообразного горючего выбран алюминий марок АСД-1, АСД-4, а в качестве порошкообразного окислителя — перхлорат аммония (ПХА) марки Д-315 (стехиометрическое соотношение  $K_m^0 = 2,614$ ). Геометрические характеристики полидисперсных порошкообразных компонентов представлены в таблице среднестатистическими диаметрами:  $d_{10}$  — среднесчетный,  $d_{30}$  — среднеобъемный,  $d_{32}$  — диаметр Заутера,  $d_{43}$  — среднемассовый.

Для экспериментального исследования указанных характеристик создана модельная установка, позволяющая осуществлять пневматическую подачу псевдооживленных ПХА и Al, их распыление и воспламенение. Установка (рис. 1) состоит из закрепленного вертикально рабочего участка 2 квадратного поперечного сечения (70 × 70 мм) с прозрачной передней стенкой из полиметилметакрилата, к которому подстыковывается цилиндрическая камера диаметром 0,08 м и длиной 0,5 м, магистралей подачи ПХА 4 горючего 5, баков ПХА 8 и горючего 9, пускоотсечных порошковых клапанов 7, магистралей наддува баков 10 с редукторами давления 12, аккумулятора давления 11, электродуговой системы зажигания 3. На рабочий

Порошок	$d_{10}$ , МКМ	$d_{30}$ , МКМ	$d_{32}$ , МКМ	$d_{43}$ , МКМ
Д-315	144	155	189	240
АСД-1	6,1	10,6	15,8	22,5
АСД-4	5,2	6,3	7,8	10

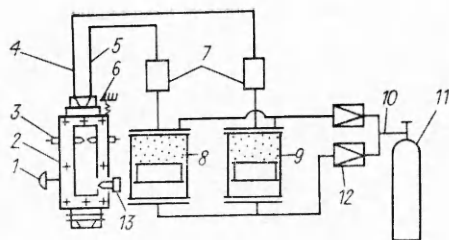


Рис. 1. Схема установки.

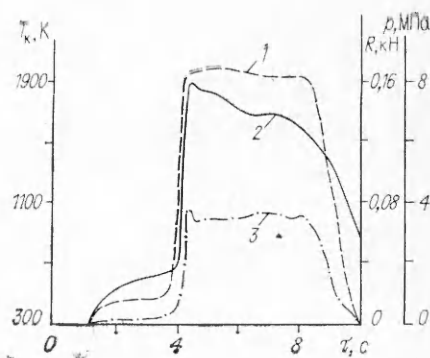


Рис. 2. Осциллограмма эксперимента. Горючее — АСД-1,  $K_m = 2,35$ .  
1 — R, 2 —  $T_k$ , 3 — p.

участок устанавливаются датчики давления 1 и усилия 6 и термомпара 13 типа ВР 5/20 (заподлицо с внутренней поверхностью стенки).

Компоненты подавались через две струйные форсунки. В качестве вытесняющего и транспортирующего газа используется воздух. Поскольку массовый расход последнего не превышает 3% массового расхода ПХА и горючего, то воздух не оказывает заметного влияния на характеристики рабочего процесса, которые также не изменялись в случае замены воздуха азотом. Система измерения установки позволяет регистрировать давление в рабочей части и по магистралям с предельной погрешностью ~1,5%, а массовые расходы порошкообразных компонентов (по скорости перемещения поршня в баке) — не более 4,5%.

Методика проведения эксперимента заключается в следующем. На промежуточном режиме с целью обеспечения надежного воспламенения алюминия по магистрали ПХА подается вспомогательный воздух. При этом соотношение компонентов составляет  $K_m = 1,15$ . После воспламенения горючего, контролируемого визуально через прозрачный элемент конструкции, система зажигания отключается. На рис. 2 представлена типичная осциллограмма пуска, из которой видно, что на этом режиме значения температуры  $T_k$ , давления в рабочей части  $p$  и усилия  $R$  относительно невелики и составляют ~500 К, 0,2 МПа и 0,2 кН соответственно. На основном режиме работы после подачи вместо вспомогательного воздуха ПХА указанные характеристики заметно увеличиваются, что обусловлено значительной интенсификацией рабочего процесса. Поскольку в эксперименте не наблюдалось каких-либо существенных колебаний параметров, то можно заключить, что полученные результаты свидетельствуют об устойчивом самоподдерживающемся горении за счет взаимного влияния физико-химических процессов разложения ПХА и горения Al в продуктах его разложения.

Результаты термомпарного зондирования показывают, что наибольшая температура в 1900 К зарегистрирована в начальный момент основного режима работы. Эта величина ниже термодинамической температуры горения  $T^* = 4120$  К, рассчитанной по универсальной программе «Астра» [5] для условий проведения эксперимента. Значительное отличие экспериментальных и расчетных данных может объясняться следующим. При установке термомпары заподлицо измеряется температура в пограничном слое, которая меньше, чем в ядре потока. Кроме того, анализ матчасти после эксперимента свидетельствует об осаждении конденсированной фазы, состоящей в основном из оксида алюминия, на спай термомпары (диаметр ~0,5 мм), что приводит, в свою очередь, к существенным погрешностям (например, за счет излучения  $\kappa$ -фазы, паразитных термо-ЭДС и т. д.) в определении  $T_k$ . Следует отметить, что в случае размещения спаев термомпары на оси рабочего участка он оплавлялся и полностью сторал, не выдерживая скоростного и высокотемпературного воздействия

к-фазы. Также необходимо припомнить во внимание неравновесность процесса горения.

В исследованиях проводилась киносъемка внутрикамерных процессов через прозрачный элемент конструкции. С целью получения количественных значений температурных характеристик используется метод, основанный на регистрации монохроматической яркости излучения продуктов сгорания, представляющих субдисперсные частицы оксида алюминия. Из проведенных ранее исследований известно, что спектр излучения продуктов сгорания смесей на основе ПХА и Al аналогичен спектру серого тела, на фоне которого при определенных условиях могут появляться колебательные полосы, обусловленные излучением молекул AlO (передние канты 464, 484, 508, 533 нм) и AlN (424, 426 нм) [6]. В связи с этим киносъемка проводится в узком спектральном диапазоне, где нет наложения излучения газообразных составляющих на непрерывный спектр к-фазы. Для этого используется интерференционный светофильтр с максимумом пропускания в районе 550 нм. Поскольку в данном случае определяется яркостная температура  $T_n$ , то переход к истинной  $T_n$  осуществляется по соотношению Вина с учетом спектральной излучательной способности продуктов сгорания Al и ПХА  $\epsilon_{550} \approx 0,85 \div 0,89$  [6, 7]:

$$T_n = \left( \frac{1}{T_n} + \frac{\lambda_c}{C_2} \ln \epsilon_{550} \right)^{-1},$$

где  $\lambda_c$  — длина волны, соответствующая максимуму пропускания светофильтра;  $C_2$  — постоянная излучения. Поскольку величина  $\epsilon_{550} \approx 1$ , можно сделать вывод, что значения яркостных температур также близки к истинным и слабо зависят от концентрации источников сплошного спектра, излучение которых в данных условиях практически аналогично излучению абсолютно черного тела.

В результате проведенных экспериментов получены киноизображения гидродинамической картины горения. Информация, пригодная для дальнейшей обработки, заключается в форме неоднородности яркости объекта съемки. Дешифровка кинограмм проводится на оптико-электронной установке [8], позволяющей преобразовывать черно-белое полутоновое изображение в псевдоцветовое с точностью до 1/256 шкалы яркости при формате разложения  $256 \times 256$ . Тогда при выбранном оператором режиме дешифровки на экране монитора установки зоны одного и того же цвета соответствуют одинаковым температурам. Привязка к температурной шкале (калибровка) цветного эталонного жлина производится с учетом тарировки фотоэмульсии киноплёнки по излучению вольфрамового тела накала эталонной лампы СИ 8-200У на длине волны  $\lambda_c$ . Систематическая погрешность определения температур оценивалась при помощи съемки тела накала лампы СИ 10-300У. Далее описанным выше методом вычислялась температура тела накала  $T_n$  и сравнивалась с паспортным значением. Например, при  $T_n \approx 1700$  и  $2500$  К относительные погрешности соответственно равны 1,5 и 2 %.

На рис. 3 в виде изотерм представлены результаты дешифровки кинограмм внутрикамерного процесса на основном режиме работы установки. Видно, что фронт пламени находится у форсуночной головки, а устойчивость процессов воспламенения и горения Al в продуктах разложения ПХА обеспечивается зоной обратных токов с наибольшей температурой  $\sim 2480$  К. Обратим внимание, что изотермы смещены по направлению подачи ПХА вправо. Это обусловлено тем, что импульс истекающего из форсунки потока ПХА больше импульса потока Al, в результате — по правилу сложения векторов — изменяется гидродинамическая картина горения.

Максимальное значение  $T_n = 2590$  К зарегистрировано в центре рабочей части. Ниже по потоку наблюдается снижение температуры до  $\sim 2360$  К, что объясняется, по-видимому, следующим. Поскольку используемые порошки АСД-1 и Д-315 полидисперсные, то мелкие частицы

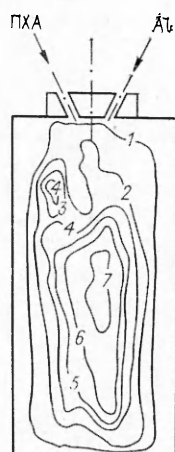


Рис. 3. Изотермы температур в рабочем участке; АСД-1,  $p_k = 0,3$  МПа,  $K_m = 9$ .  
 $T_n$ , К: 1 — 2190, 2 — 2360, 3 — 2390, 4 — 2440, 5 — 2480, 6 — 2520, 7 — 2590.

горючего, воспламенившись раньше остальных, горят при местном соотношении компонентов, близком к стехиометрическому. Выделяющееся при этом тепло идет на нагрев остальной части горючего и газификацию ПХА. К моменту воспламенения крупных частиц Al мелкие сгорают полностью, и местное соотношение компонентов увеличивается по сравнению со стехиометрическим, в результате чего  $T_n$  уменьшается. Измеренные значения  $T_n$  ниже термодинамической температуры горения Al и ПХА  $T^* = 2770$  К, рассчитанной при тех же условиях. Расхождение экспериментальных и теоретических данных объясняется, по всей вероятности, неполным сгоранием алюминия, потерями тепла в стенки и неравновесностью процесса горения на длине прозрачного элемента установки (0,16 м).

В рассмотренном эксперименте проводилось также термодпарное зондирование. При этом на основном режиме работы установки зарегистрировано термодпарой наибольшее значение  $T_k \approx 750$  К, что значительно меньше и термодинамической и полученной кинопиromетрическим методом температур. На основе этого можно заключить, что использование термодпар для диагностики горения дисперсного горючего в условиях модельной установки сопряжено с определенными трудностями и приводит к большим погрешностям.

Поскольку по сплошному спектру излучения оксида алюминия измеряется среднеоптическая температура, которая в общем случае не соответствует ни среднеобъемной, ни среднемассовой температуре продуктов сгорания горючего, то в данной работе для оценки совершенства процессов преобразования энергии в целом используется коэффициент камеры [9]

$$\varphi_k = p_k F_{кр} / \dot{m} \beta_T,$$

где  $p_k$ ,  $\dot{m}$  — осредненные по времени значения давления в камере и суммарного расхода горючего на основном режиме;  $F_{кр}$  — площадь критического сечения сопла. Значение расходного комплекса  $\beta_T$  (рис. 4) определяется термодинамическим расчетом по программе «Астра».

На основе проведенных исследований установлено, что величина  $\varphi_k$  растет с давлением (рис. 5). Это связано с увеличением характерного времени пребывания в камере и скоростей горения частиц Al [10] и разложения частиц ПХА [11]. Представленные зависимости иллюстрируют также возрастание  $\varphi_k$  при уменьшении дисперсности горючего, поскольку время горения частиц Al пропорционально квадрату диаметра [10] и снижение  $d_{43}$  при использовании горючего типа АСД-4 вместо АСД-1 (см. таблицу) приводит к уменьшению времени горения. В результате увеличивается полнота сгорания газозвеси и, как следствие, коэффициент камеры. Обратим внимание, что при  $p_k > 1,5$  МПа в случае АСД-4 величина  $\varphi_k$  практически не изменяется, так как при данном уровне

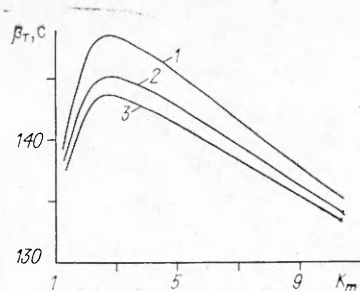


Рис. 4. Зависимость расходного комплекса от соотношения компонентов и давления.  
 $p$ , МПа: 1 — 5, 2 — 0,5, 3 — 0,2.

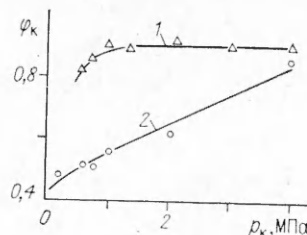


Рис. 5. Зависимость коэффициента камеры от давления и дисперсности ПГ.  
 1 — АСД-4,  $K_m = 3,9 \div 4,7$ ; 2 — АСД-1,  $K_m = 3,1 \div 4,2$ .

давления частицы алюминия, по всей вероятности, полностью сгорают в пределах рабочего участка, и эффективность рабочего процесса лимитируется потерями на двухфазность и тепла в стенку камеры.

Резюмируя изложенное, отметим, что в данной работе разработана модельная установка, позволяющая определять характеристики рабочего процесса при использовании двухкомпонентной газозвеси, и экспериментально подтверждено устойчивое самоподдерживающееся горение порошкообразных А1 и ПХА в диапазонах изменения давления 0,2—4 МПа и соотношения компонентов 0,7—10.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Шевчук В. Г., Безродных А. К., Кондратьев Е. П. и др. Горение аэрозвеси частиц алюминия в свободном объеме // ФГВ.— 1986.— 22, № 5.— С. 40.
2. Ягодников Д. А., Воронецкий А. В., Сухов А. В. Распространение ламинарного пламени в моно- и полидисперсной аэрозвеси // Хим. физика.— 1990.— 9, № 12.— С. 1611.
3. Афанасьев С. Н., Жарков В. Ю., Озеров Е. С. Воспламенение и горение газозвеси частиц алюминия // Физика аэродисперсных систем.— 1965.— Вып. 27.— С. 39.
4. Иващицева Л. И., Степанов А. М. Расчет распространения пламени по газозвеси частиц металла и капель воды // ФГВ.— 1981.— 17, № 1.— С. 52.
5. Сияров Г. В., Ватолин Н. А., Трусов Б. Г. и др. Применение ЭВМ для термодинамических расчетов металлургических процессов.— М.: Наука, 1982.
6. Похил П. Ф., Логачев В. С., Мальцев В. М. Спектральные и фотометрические исследования факела пламени модельных составов горючее — окислитель — металл // ФГВ.— 1970.— 6, № 7.— С. 143.
7. Вафин Д. Б., Шигапов А. Б. К измерению температуры гетерогенных сред // Тепловые процессы в двигателях и энергоустановках летательных аппаратов: Межвузовский сб.— Казань: КАН, 1984.— С. 56.
8. Ягодников Д. А., Мазур А. В., Денисов В. Г. Оптико-электронные методы исследования аэродисперсных систем // Актуальные вопросы физики аэродисперсных систем: Тез. докл. XV Всесоюз. конф.— Одесса, 1989.— Т. I.— С. 199.
9. Васильев А. П., Кудрявцев В. М., Кузнецов В. А. и др. Основы теории и расчета жидкостных ракетных двигателей.— М.: Высш. шк., 1983.
10. Похил П. Ф., Беляев А. Ф., Фролов Ю. В. и др. Горение порошкообразных металлов в активных средах.— М.: Наука, 1972.
11. Коэн Н. С. Модели горения твердого топлива // РТК.— 1980.— № 4.— С. 186.

г. Москва

Поступила в редакцию 2/III 1992