

в [3] предположение о диффузии и последующей конденсации продуктов сгорания между зоной реакции и поверхностью горячей частицы.

Авторы благодарят Е. Н. Кондратьева и С. В. Горошина за полезные обсуждения.

Поступила в редакцию 2/II 1981

ЛИТЕРАТУРА

1. Т. Брякустовский, Н. Гласмен.— В сб.: Гетерогенное горение. М.: Мир, 1967.
2. Л. А. Клячко. ФГВ, 1969, 5, 3.
3. М. А. Гуревич, А. Я. Лукин и др. ПМТФ, 1977, 5.
4. Ю. Б. Голубовский. Вестн. ЛГУ, 1967, 10.
5. Ф. Линевиц. Измерение температур в технике. М.: Metallurgia, 1980.
6. В. Лохте-Хольтгревен. Методы исследования плазмы. М.: Мир, 1971.
7. М. Е. Деряга, А. Н. Степик, Э. А. Федорин. ФГВ, 1978, 14, 5.
8. А. А. Радциг, Б. М. Смирнов. Справочник по атомной и молекулярной физике. М.: Атомиздат, 1980.
9. Н. А. Назимова. ЖПС, 1967, VII, 2.
10. А. Н. Зайдель, В. К. Прокофьев и др. Таблицы спектральных линий. М.: Наука, 1977.
11. Р. Пирс, А. Гейдон. Отождествление молекулярных спектров. М.: ИЛ, 1949.
12. А. Н. Зайдель, Г. В. Островская, Ю. Н. Островский. Техника и практика спектроскопии. М.: Наука, 1972.
13. С. Э. Фриш.— В сб.: Спектроскопия газоразрядной плазмы/Под ред. С. Э. Фриша. Л.: Наука, 1970.
14. Г. К. Ежевский, Е. С. Озеров. ФГВ, 1977, 13, 6.

УДК 536.46

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИСПЕРСНОСТИ ЧАСТИЦ ОКИСИ АЛЮМИНИЯ В ПРОДУКТАХ СГОРАНИЯ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ВЕЩЕСТВ

Б. Н. Федоров, Ю. Л. Плечов, Э. М. Тимохин

(Калининград)

При горении алюминизированных конденсированных веществ в продуктах горения образуются сферические частицы окиси алюминия, которые имеют значительно меньшие размеры, чем частицы исходного порошка алюминия. Размеры частиц окиси алюминия и форма их распределений по размерам зависят от условий их образования и от состава конденсированного вещества. Следует отметить, что данные различных авторов, исследовавших дисперсность частиц окиси алюминия в продуктах сгорания алюминизированных конденсированных веществ, весьма противоречивы и плохо сопоставимы, так как во всех этих работах использованы различные составы конденсированных веществ и разные способы отбора частиц и методы анализа отобранных проб.

Целесообразно было бы провести комплексные исследования влияния различных факторов, в частности давления и содержания алюминия в составе конденсированного вещества, на форму распределения частиц окиси алюминия по размерам на одних и тех же составах и по одним методикам.

Для решения поставленной задачи создана специальная экспериментальная установка, состоявшая из газогенератора (рис. 1), где сжигался образец исследуемого конденсированного вещества, и системы отбора продуктов сгорания из камеры газогенератора. Работа системы отбора продуктов сгорания основана на «замораживании» отбираемой пробы гелием в пробоотборнике, установленном в газогенераторе, раз-

делении газовой и конденсированной фаз продуктов сгорания в специальном циклоне с одновременной консервацией пробы инертным по отношению к конденсированной фазе раствором.

Образец алюминизированного конденсированного вещества \mathcal{Z} диаметром 30 и толщиной 20 мм бронировался по боковой поверхности и одному торцу и вставлялся в специальный держатель 4. Чтобы время пребывания продуктов сгорания в камере газогенератора за время горения образца не изменялось, образец по мере выгорания подавался вперед специальной пружиной 1. Внутренний диаметр камеры сгорания составлял 50 мм. Во избежание искажений результатов отбора пристеночный слой продуктов сгорания сбрасывался. Диаметр отборника и сбросных сопел подбирался так, чтобы поток продуктов сгорания делился пополам.

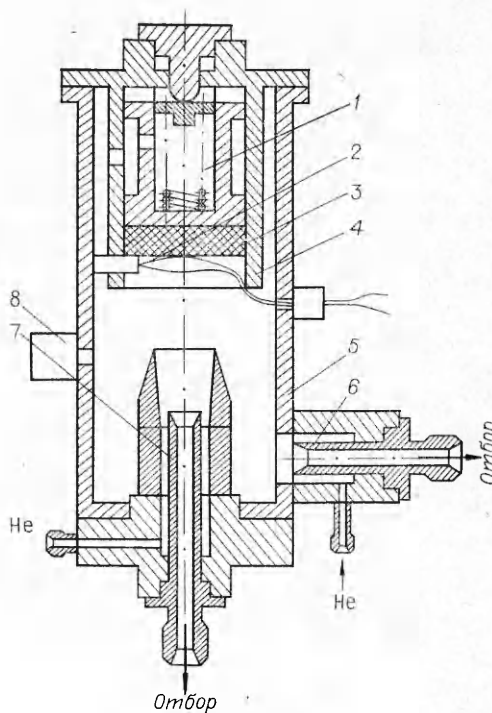


Рис. 1. Схема газогенератора.

Воспламенение образца производилось при помощи навески дымного ружейного пороха, поджигаемой пистолетом накаливания 2. Давление в камере сгорания измерялось тензметрическим датчиком 8. Отбор и «замораживание» частиц осуществлялись при помощи пористого пробоотборника 7 при организации противотока холодного гелия. Для дисперсионного анализа проб конденсированной фазы использован оптический микроскоп МБИ-11 с увеличением до $\times 2700$.

В работе [1] показано, что значения средних размеров d_{13} и d_{32} , определяемые оптическим микроскопом, практически не отличаются от этих же размеров, полученных с помощью электронного микроскопа.

Пробу получали, отфильтровывая конденсированную фазу из ацетатного консервирующего раствора ($pH = 4$), образующегося в циклоне. Для приготовления препарата на предметное стекло микроскопа пипеткой наносилась капля взвеси частиц в спирте. Взвесь предварительно гомогенизировалась ультразвуковым диспергатором. Нанесенную каплю распределяли по поверхности при помощи стеклянной палочки или другого предметного стекла. Во время разравнивания разрушались сгустки частиц, а также непрочные тонкостенные полые частицы окиси алюминия.

В связи с тем, что погрешность в счете мелких (до 2,5 мкм) частиц влияет на средние размеры частиц выборки значительно меньше, чем погрешность при определении числа средних и крупных частиц, для повышения статистической достоверности получаемых результатов использован следующий способ счета частиц.

Считались 1000 частиц подряд (общая фракция), затем 3000 средних и крупных частиц, начиная с 2 мкм (крупная фракция). После этого «сшивали» две полученные части общего распределения. За стыковочный принимался размер 2 мкм, коэффициент стыковки брался как среднее для четырех диапазонов счета. Находилось число частиц, подсчитанных в спектре крупной фракции, приходящихся на одну частицу этого же диапазона в спектре общей фракции, это отношение и явля-

лось коэффициентом стыковки. В данной работе ширина диапазона при счете частиц составляла 0,64 мкм. Окончательное распределение получалось умножением количества частиц в каждом диапазоне общей фракции до стыковочного размера на коэффициент стыковки. Эта методика счета проверена путем подсчета большого количества частиц подряд (30 000—40 000). Проверка показала хорошее совпадение гистограмм распределенных частиц по размерам, а также средних размеров частиц.

Специальные исследования показали, что в пробоотборнике не изменяются размеры частиц и полнота их сгорания при временах пребывания в камере сгорания больше 10 мс. Образцы конденсированного вещества на основе перхлората аммония, каучука и алюминиевого порошка содержали 1, 2, 5, 10, 15 и 18% алюминия. Алюминиевый порошок (АСД-4) вводился в состав за счет перхлората аммония (ПХА).

Испытания образцов проведены при давлении в камере сгорания газогенератора, равном 3,0, 5,0 и 7,5 МПа, по пять экспериментов на каждом давлении для образца одного состава. В связи с возможностью случайных отклонений в условиях отдельного эксперимента в качестве результирующего бралось среднее давление по всем пяти опытам. Результаты дисперсионного (гранулометрического) анализа также осреднялись путем поддиапазонного сложения гистограмм распределений и дальнейшей обработкой суммарной гистограммы.

Для каждого варианта условий эксперимента в пробе подсчитано около 10^5 частиц, что позволяет надеяться на достаточную статистическую полноту использованных выборок и на достаточную достоверность выводов, сделанных на основании обработки этих данных.

По результатам экспериментов построены объемные распределения частиц по размерам, приведенные на рис. 2, из рассмотрения которого можно отметить следующее:

- 1) распределения частиц по размерам имеют гораздо более сложный характер, чем это представлялось ранее [1—6], что говорит о сложности процессов их образования;
- 2) распределения имеют выраженный бимодальный характер во всем диапазоне исследованных давлений при малом содержании алюминия в составе конденсированного вещества (1—5%);
- 3) во всех распределениях можно выделить мелкую и крупную фракции, причем линия распределения во всех исследованных случаях проходит через один и тот же размер;
- 4) мелкая фракция сохраняет свой максимум в районе диаметров частиц 1,5—2,0 мкм при изменении условий образования;

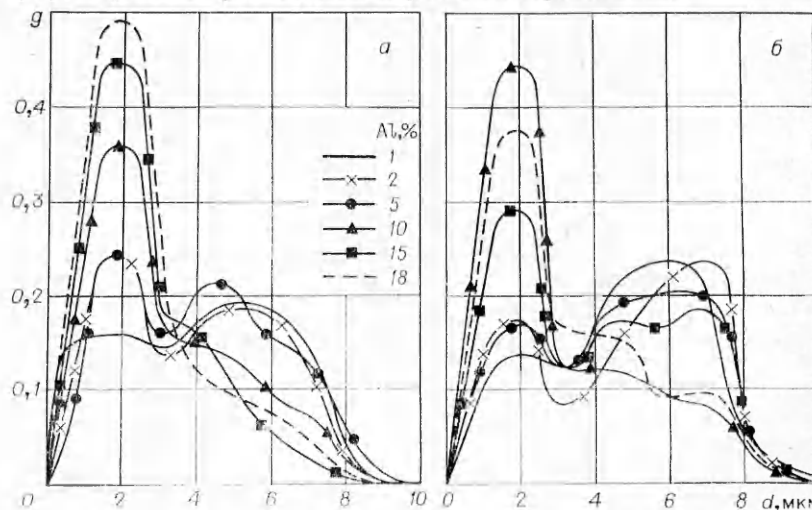


Рис. 2. Массовые распределения частиц по размерам при давлении 3,0 (а) и 7,5 МПа (б).

5) при большом содержании Al в составе конденсированного вещества (10—18%) распределения носят неустойчивый характер без ярко выраженных максимумов (в отличие от работы [1]).

По найденным распределениям построены зависимости средних диаметров d_{43} и d_{32} от содержания Al в составе при различных давлениях (рис. 3). Эти зависимости носят сложный характер, однако можно отметить некоторую тенденцию к снижению средних размеров частиц окиси алюминия в продуктах сгорания с увеличением содержания Al в составе конденсированного вещества (в отличие от работы [1]).

На основе предположения о существовании нескольких механизмов образования частиц сделана попытка описать полученные экспериментальные распределения частиц окиси алюминия по размерам суммой распределений вида

$$f(d) = \sum_{i=1}^4 A_i e^{-\frac{(d-M_i)^2}{S_i}}$$

где A_i — амплитуда распределения; $S = 2\sigma^2$; σ — дисперсия; M_i — среднее значение i -й моды распределения. (В работе [1] описаны распределения, имеющие два максимума.) При этом желательно было бы соотнести каждую моду распределения с определенным механизмом образования частиц.

Известна модель горения [2], рассматривающая сгорание алюминия в паровой фазе в узкой зоне горения, локализованной у частицы. При этом образуются частицы окиси алюминия, имеющие размер менее 1 мкм. Существуют модели горения частиц алюминия по гетерогенному механизму [3], где рассматривается горение алюминия внутри пузырька окиси при подводе окислителя диффузией через жидкую окисную пленку. Подобная модель предсказывает для продуктов сгорания вид полых сфер с размерами, примерно равными исходным частицам порошка металла. В работах [4—6] рассматривается комбинированный механизм образования продуктов сгорания частиц Al, включающий в себя конденсацию летучих субокислов алюминия в объеме с образованием мелкой фракции частиц и на поверхности горячей частицы с образованием крупной фракции. Массовая доля мелкой фракции составляет при этом 0,8, а крупной 0,2 полной массы образовавшейся окиси.

По результатам эксперимента (см. рис. 2, 3) можно видеть, что средний размер частиц окиси алюминия, образующихся при сгорании порошка алюминия со средним размером частиц 10—20 мкм, значительно крупнее субмикронных частиц «дыма» (парофазное горение) и значительно мельче исходных частиц металла.

Исходя из вида полученных распределений частиц окиси алюминия по размерам (см. рис. 2) можно предположить, что горение частиц алюминия идет по следующей схеме. Частицы разогреваются в результате гетерогенной реакции окисления. При достижении частицей температуры кипения происходит либо переход горения в парофазную стадию с образованием из пленки окиси одной частицы (до 15 мкм), либо фрагментация частицы с образованием нескольких капель окиси (2—3 мкм) и нескольких металлических частиц. Парофазная стадия горения приводит к образованию в объеме мелкой фракции частиц (до 1 мкм), а при

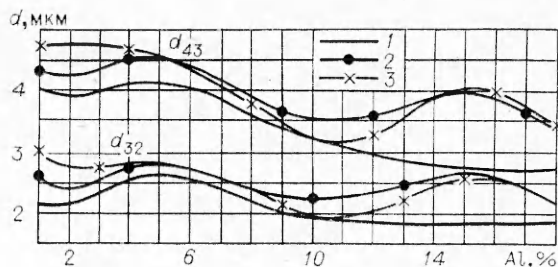


Рис. 3. Зависимость средних размеров частиц окиси алюминия d_{43} и d_{32} от содержания Al в составе конденсированного вещества для давлений 3,0 (1), 5 (2) и 7,5 МПа (3).

Al, %	p, МПа	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	K ₁	K ₂	K ₃	K ₄
1	3,3	0,194	0,068	0,072	0,002	1,21	4,92	6,02	10,02	0,26	9,61	1,81	42,70	0,24	0,50	0,24	0,02
	4,8	0,098	0,060	0,124	0,118	1,44	1,92	5,31	6,66	0,46	2,49	3,76	1,09	0,13	0,18	0,46	0,23
	7,7	0,053	0,110	0,122	0,021	1,23	6,24	5,39	7,93	0,54	17,7	10,4	1,46	0,04	0,50	0,43	0,03
2	2,9	0,150	0,075	0,108	0,000	1,37	2,75	5,02	—	0,39	7,60	9,24	—	0,15	0,34	0,51	0,00
	4,9	0,128	0,065	0,124	0,115	1,39	1,80	5,78	6,92	0,42	2,68	5,76	0,90	0,14	0,18	0,50	0,18
	7,8	0,055	0,014	0,048	0,236	1,07	2,49	6,31	3,26	0,33	5,00	8,04	9,19	0,04	0,04	0,08	0,84
5	2,8	0,232	0,162	—	—	2,24	6,85	—	—	1,41	2,94	—	—	0,38	0,62	—	—
	4,6	0,120	0,093	0,170	0,041	1,48	2,39	6,36	8,61	0,50	3,37	9,68	0,78	0,10	0,21	0,65	0,04
	7,0	0,096	0,086	0,130	0,028	1,20	3,90	6,04	8,16	0,45	1,02	24,16	1,17	0,06	0,27	0,64	0,03
10	2,6	0,221	0,135	0,110	0,093	1,44	1,76	4,47	5,87	0,47	1,96	3,68	2,25	0,22	0,27	0,31	0,20
	5,0	0,198	0,194	0,160	0,122	1,54	1,87	4,70	6,64	0,76	1,30	2,85	1,52	0,21	0,27	0,33	0,19
	7,5	0,245	0,200	0,111	0,076	1,58	1,71	4,83	6,80	0,60	1,27	3,65	1,50	0,26	0,31	0,30	0,13
15	3,1	0,238	0,153	0,094	0,076	1,43	1,86	3,25	6,12	0,51	2,62	3,64	0,94	0,26	0,37	0,26	0,11
	4,8	0,106	0,113	0,179	0,143	1,78	2,12	4,82	6,31	0,80	1,67	2,92	1,66	0,13	0,20	0,42	0,25
	7,5	0,121	0,126	0,128	0	1,45	2,22	5,55	—	0,68	2,05	22,01	—	0,11	0,20	0,69	—
18	3,2	0,256	0,226	0,093	0,202	1,43	1,73	4,44	12,85	0,65	1,31	6,39	5,39	0,18	0,20	0,20	0,42
	5,2	0,219	0,163	0,148	0,170	1,69	1,90	4,61	4,96	0,47	1,52	3,68	2,81	0,16	0,22	0,31	0,31
	7,3	0,234	0,166	0,136	0,083	1,67	1,86	4,54	7,11	0,46	1,51	2,76	0,99	0,24	0,30	0,34	0,12

конденсации на поверхности — крупной фракции (до 3—4 мкм). Кроме того, в потоке с дефицитом окислителя металл может не догорать до конца (до 3%) и вместе с осевшей окисью образовывать частицы с размерами до 5 мкм.

С учетом всех перечисленных выше механизмов образования спектр частиц оксид алюминия может иметь пять максимумов, хотя в действительности размеры частиц, образовавшихся по разным механизмам, будут близки между собой, и максимумов будет меньше. Слияние нескольких фракций в распределении будет проявляться в уширении кривой распределения, т. е. в увеличении параметра S . Поэтому при разложении распределений, полученных в эксперименте, в методику закладывалось значение $f=4$ и не задавались никакие предположения относительно параметра S .

Результаты обработки экспериментальных гистограмм по описанной методике приведены в таблице, где массовая доля каждого распределения обозначена символом K и вычислена по формуле

$$K_i = \int_0^{\infty} f_i(d) dd \Big/ \int_0^{\infty} f(d) dd.$$

При анализе приведенных данных можно выявить еще некоторые особенности полученных распределений:

1) с ростом давления массовая доля мелкой фракции увеличивается, однако для составов с 10 и 18% Al наблюдается некоторая неопределенность результатов, что говорит о неоднозначной зависимости d_{43} и d_{32} от давления и содержания алюминия в составе конденсированного вещества;

2) с увеличением давления массовая доля крупной фракции уменьшается;

3) с увеличением содержания Al в составе конденсированного вещества массовая доля мелкой фракции растет, что может объяснить наблюдаемое некоторое снижение d_{43} и d_{32} ;

4) дисперсия распределения типа Гаусса самой мелкой фракции является наименьшей среди остальных фракций.

В целом следует отметить, что сложность и многообразие механизмов образования частиц окислов алюминия в продуктах сгорания конденсированного вещества, которые проявляются в различных сочетаниях при изменении условий образования частиц, не позволили ответить в данной работе на ряд поставленных вопросов.

Поступила в редакцию 15/X 1980

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. П. Бахир, Г. И. Левашов. ФГВ, 1973, 9, 6.
2. Т. Бржустовский, И. Гласмен.— В сб.: Гетерогенное горение. М.: Мир, 1967.
3. R. W. Bartlett. Comb. Flame, 1963, 3.
4. А. П. Петратов, В. М. Гремячкин, О. И. Лейпунский. ПМТФ, 1974, 4.
5. А. П. Петратов, В. М. Гремячкин, О. И. Лейпунский. ФГВ, 1975, 11, 3.
6. А. П. Петратов, В. М. Гремячкин, О. И. Лейпунский. ПМТФ, 1976, 2.

УДК 536.46 : 534—18 : 621.43.056

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛН ЭНТРОПИИ ПРИ НЕУСТОЙЧИВОМ ГОРЕНИИ В КАМЕРЕ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

В. Е. Дорошенко, В. М. Сильверстов
(Москва)

Неустойчивое горение, возникающее в камерах сгорания теплонапряженных газотурбинных установок и двигателей, сопровождается интенсивными колебаниями давления, которые, как правило, приводят к разрушению отдельных узлов и деталей камеры сгорания или существенно снижают ресурс ее работы.

Важным фактором, способствующим поддержанию развитых колебаний давления в камерах сгорания ЖРД и ГТД, по мнению ряда авторов [1, 2], может оказаться существование так называемых энтропийных волн, взаимодействующих с колебаниями давления, главным образом, в выходном сечении камеры. Возникновение энтропийных волн обусловлено колебаниями теплоподвода в зоне горения, а скорость их распространения совпадает со средней скоростью движения газа от зоны горения к выходному сечению камеры сгорания.

Цель настоящей работы — экспериментальное обнаружение энтропийных волн и исследование степени их влияния на неустойчивое горение в модельном одnogорелочном отсеке газотурбинного двигателя. Для этого проведены измерения амплитуды колебаний температуры и разности фаз между колебаниями температуры и давления в выходном сечении камеры сгорания на режиме неустойчивого горения.

Схема отсека приведена на рис. 1, а. Воздух, подогретый до температуры 423 ± 10 К, по трубопроводу 1 через спрямляющее устройство 3 с решеткой 2, имитирующей в некоторой степени акустическое сопротивление компрессора, подавался в диффузор 4 камеры сгорания.

Топливо (керосин ТС-1) через центробежную форсунку 5 поступало в жаровую трубу 7, где смешивалось с воздухом и поджигалось (при запуске) свечой СП-06 6. В выходном сечении камеры сгорания установлен водоохлаждаемый дроссель 8, обеспечивающий постоянство среднего давления газа в камере сгорания (394—397 кПа) и критический перепад давлений на различных режимах работы. Жаровая труба (см. рис. 1, б), установленная в модельном отсеке, склонна к неустойчивому горению.

Колебания давления регистрировались вблизи выходного сечения ка-