

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИСПЕРСНОСТИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ АЭРОВЗВЕСИ ЧАСТИЦ АЛЮМИНИЯ

Д. А. Ягодников, Е. И. Гусаченко*

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, 105005 Москва
daj@mx.bmstu.ru

*Институт проблем химической физики РАН, 142432 Черноголовка

Исследованы форма, строение частиц и дисперсный состав конденсированных продуктов сгорания аэровзвеси частиц порошкообразного алюминия марок АСД-1, АСД-4 и АСД-6 при коэффициенте избытка окислителя $0,12 \div 0,4$ и начальном давлении $0,05 \div 0,30$ МПа. Субдисперсные частицы оксида алюминия составляют до 90 % суммарной массы конденсированных продуктов сгорания. Среднемассовый диаметр частиц $0,15 \div 0,18$ мкм, с повышением давления размер частиц увеличивается. При атмосферном давлении начальная дисперсность порошков алюминия, а также соотношение компонентов в рабочем участке практически не влияют на дисперсность частиц к-фазы. Выполнен сравнительный анализ дисперсного состава частиц к-фазы, образующейся при горении алюминия в различных топливных композициях и установках. Показано, что основное влияние на дисперсный состав оказывают тип топливной композиции, газодинамический процесс горения и условия взаимодействия частиц алюминия между собой и с газовой фазой.

Ключевые слова: горение, аэровзвесь алюминия, конденсированные продукты сгорания.

При использовании алюминия в качестве горючего различных топливных композиций в продуктах сгорания образуется конденсированная фаза (к-фаза), что не позволяет полностью реализовать энергетический потенциал топлива. В связи с этим проводятся экспериментальные и теоретические исследования процессов образования к-фазы, которые дают возможность оценить двухфазные потери и разработать рекомендации для определения оптимального содержания металлических добавок. Как правило, такие исследования выполняются для одиночных частиц металлов [1, 2] или для металлосодержащих твердотопливных композиций [3–6]. Однако следует иметь в виду, что в первом случае не учитываются «коллективные» эффекты при горении, а во втором сильное влияние на дисперсный и химический составы к-фазы оказывает процесс агломерации, а также наличие в топливе связующих веществ и окислителя сложного химического состава. В связи с этим практический интерес представляют данные по дисперсному и химическому составам к-фазы, образованной при го-

рении порошкообразного металлического горючего (ПМГ) в окислительной среде простого химического состава в отсутствие процесса агломерации. Эти условия могут быть реализованы, например, при сжигании ПМГ в воздухе, в частности, в процессе распространения пламени по аэровзвеси частиц ПМГ.

Данная работа посвящена исследованию дисперсного состава к-фазы продуктов сгорания аэровзвеси частиц порошкообразного алюминия различного исходного дисперсного состава при различном начальном давлении.

ЭКСПЕРИМЕНТ

В качестве порошкообразного горючего использовался алюминий марок АСД-1, АСД-4 и АСД-6. Фотографии частиц порошка АСД-1 представлены на рис. 1. Внешний вид частиц примечателен тем, что на их поверхности отчетливо различимы бороздки, которые можно считать трещинами в поверхностной оксидной пленке. Согласно принятым представлениям [7] именно их эволюция при нагреве определяет процесс воспламенения частиц алюминия. Для каждого образца исходного ПМГ проводился кондуктометрический дисперсный анализ. На основе плотности распределения коли-

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (номер проекта 99-15-96112).

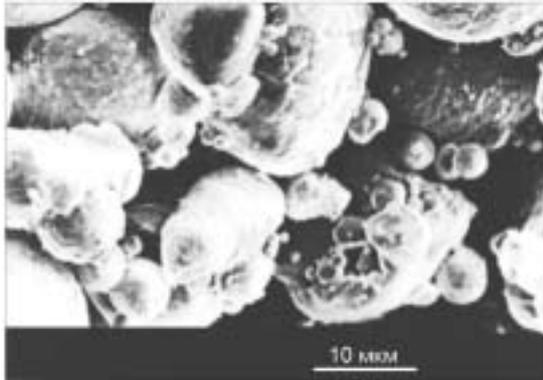


Рис. 1. Фотография частиц ПМГ АСД-1

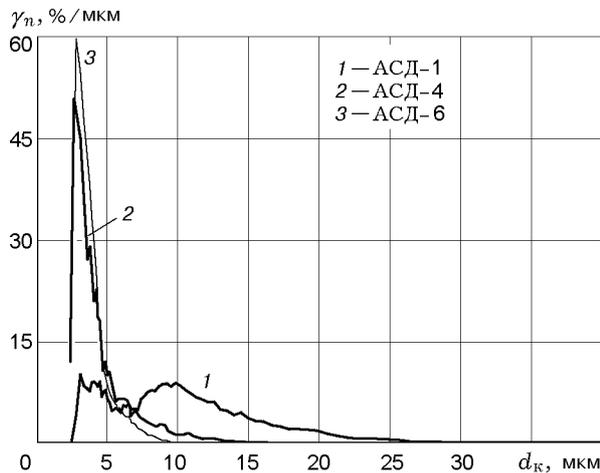


Рис. 2. Плотность распределения количества частиц

чества частиц по диаметру (рис. 2) рассчитывались среднестатистические диаметры: среднесчетный d_{10} , среднеквадратичный d_{20} , среднеобъемный d_{30} , диаметр Заутера d_{32} и среднemasсовый d_{43} , значения которых приведены в табл. 1. Предельная погрешность определения средних диаметров составила $\pm 1\%$.

Экспериментальные исследования проводились на установке постоянного объема [8], включающей вертикально установленную трубу диаметром 80 мм, длиной 1,5 м и ресивер объемом на порядок больше объема рабочего участка, подсоединенный сбоку к нижней части трубы. Навеска порошка алюминия распылялась в верхней части трубы. Фронт пламени инициировался у нижнего конца трубы и распространялся вверх к закрытому концу по оседающей аэрозвеси, что обеспечивало близкий к ламинарному режим распространения

Таблица 1
Среднестатистические диаметры частиц
исходного порошка алюминия

Марка порошка	d_{10} , мкм	d_{20} , мкм	d_{30} , мкм	d_{32} , мкм	d_{43} , мкм
АСД-1	10,4	12,0	13,6	17,4	21,9
АСД-4	4,3	4,9	5,6	7,4	10,1
АСД-6	4,0	4,3	4,5	5,2	6,5

пламени. Частицы к-фазы, образовавшейся после прохождения пламени по рабочему участку, оседали на нижнюю крышку трубы, откуда извлекались через 1 ÷ 2 мин для последующего анализа по методике [3, 4], разработанной для определения дисперсных характеристик конденсированных продуктов сгорания смесевых металлизированных топлив. Эксперименты с порошками алюминия проводились при начальном давлении, равном атмосферному, а также выше и ниже атмосферного, и коэффициенте избытка окислителя $\alpha = 0,12 \div 0,4$, погрешность определения которого $\pm 6\%$. Необходимое разрежение в рабочем участке создавалось вакуумным насосом ВН-461М, а повышенное давление — за счет наддува от баллона воздуха высокого давления. Давление измерялось датчиком МДД200-1000. Изменение давления в установке в течение эксперимента не превышало 15 %, из них приблизительно 12 % приходилось на стадию первоначального воспламенения и 3 % на стадию горения ПМГ.

С целью удаления недогоревшего алюминия образцы конденсированных продуктов сгорания обрабатывали слабым раствором соляной кислоты при комнатной температуре. Травление продолжалось практически до полного исчезновения пузырьков выделяющегося водорода. В связи с тем, что скорость реагирования алюминия в растворе соляной кислоты намного больше скорости реагирования оксида алюминия, можно считать, что потери массы связаны в основном с химическим превращением активного металла.

После промывки и сушки травленных образцов к-фазы проводилось их разделение седиментационным способом на две фракции — 0 ÷ 4 и 4 ÷ 40 мкм. Необходимость разделения порошка на фракции по размерам обусловлена большим диапазоном диаметров частиц (сотые доли — десятки микрометров) в исходной про-

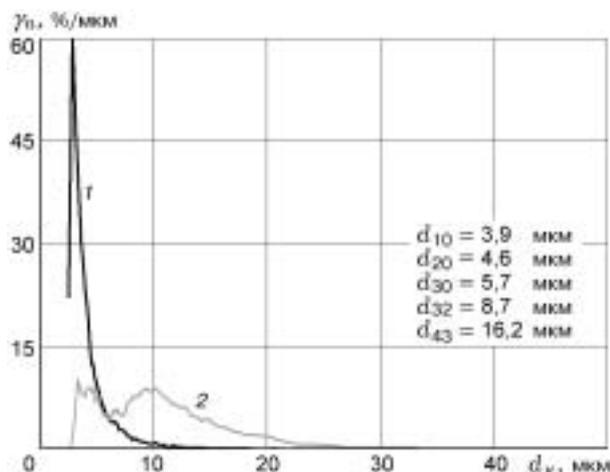


Рис. 3. Плотность распределения количества (1) неповрежденных частиц продуктов сгорания АСД-1 при $p = 0,1$ МПа, $\alpha = 0,21$; распределение исходных частиц алюминия (2)

бе, что недоступно для измерения каким-либо одним методом и прибором.

Седиментационное разделение выполнялось в процессе оседания частиц порошка из слоя жидкости — дистиллированной воды с поверхностно-активным веществом (карбоксиметилцеллюлоза). Многократное повторение циклов оседания обеспечило качественное фракционирование образцов, а параметры процесса — высота слоя жидкости 2 см и время оседания 12 мин — были выбраны так, чтобы получить границу раздела фракций именно 4 мкм.

Частицы фракции $0 \div 4$ мкм изучали по негативам, полученным с помощью электронного микроскопа УЭМВ-100К. Для этого частицы фотографировали, затем изображение негатива проецировалось на экран с общим увеличением 10^5 , на котором частицы измерялись трафаретом с шагом обмера по диаметру 0,01 мкм. Диаметр сферических частиц фракций $4 \div 40$ мкм измерялся с помощью того же трафарета по теневому изображению частиц на матовом стекле оптического микроскопа МБИ-6 при увеличении 10^3 с шагом 1 мкм. Общее число измеренных в каждой фракции частиц составило ≈ 1500 . Затем на основе такой первичной информации рассчитывались перечисленные выше диаметры с погрешностью статистической обработки $\pm 10\%$. Для частиц, форма которых отличалась от сферической, размер также определялся указан-

ным способом, только в этом случае визуально оценивалось соответствие площадей изображения частицы и площадей соседних окружностей трафарета.

ВЛИЯНИЕ ДИСПЕРСНОГО СОСТАВА ПМГ НА ДИСПЕРСНЫЙ СОСТАВ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ АЭРОВЗВЕСИ

Эксперименты по горению алюминия марок АСД-1, АСД-4 и АСД-6 проводились при атмосферном давлении и $\alpha = 0,12 \div 0,26$. Первоначально выполнялся кондуктометрический дисперсный анализ всех исходных (нетравленных) образцов продуктов горения ПМГ марки АСД-1. Дифференциальное распределение частиц по размеру и их среднестатистические диаметры приведены на рис. 3. Из полученных данных следует, что после горения вид распределения существенно изменился: отчетливо наблюдается максимум частиц диаметром ≈ 5 мкм, а также возрастание дисперсности, в частности, среднемассовый диаметр уменьшился с 21,9 до 16,2 мкм.

Общий вид исходных частиц к-фазы, отобранных для анализа, представлен на рис. 4. На фотографии видны частицы округлой формы и конгломераты неправильной формы. Первые могут быть продуктами неполного сгорания алюминия, а вторые — совокупностью субдисперсных частиц, образующих конгломерат за счет сил аутогезионного взаимодействия. Поверхность частиц недогоревшего алюминия* либо имеет металлический блеск и покрыта тонким слоем прозрачного оксида, либо имеет матовую фактуру серого цвета, что свидетельствует об окисленной поверхности металла.

В пробе к-фазы после растворения активного алюминия кислотой остаются мелкодисперсные частицы оксида, прозрачные сферические частицы оксида алюминия, прозрачные оксидные скорлупки с тонкими стенками и относительно редкие частицы полностью протравленного алюминия, покрытые оксидной пленкой. Фотографии травленных частиц, являющихся продуктами сгорания алюминия марки АСД-1, приведены на рис. 5. Как оказалось, субмикронные частицы к-фазы, полученные при сжигании всех марок ПМГ, по внешнему виду и размерам практически одинаковы. Из анализа фотографии можно заклю-

* Данные о полноте сгорания алюминия в указанных условиях приведены в работе [8].

Таблица 2

Средние диаметры травленных частиц к-фазы

Размер фракции, мкм	Диаметр, мкм	АСД-1		АСД-4			АСД-6	
		$\alpha = 0,16$	$\alpha = 0,25$	$\alpha = 0,12$	$\alpha = 0,15$	$\alpha = 0,26$	$\alpha = 0,18$	$\alpha = 0,25$
0 ÷ 4	d_{10}	0,096	0,100	0,086	0,102	0,085	0,083	0,084
	d_{20}	0,103	0,108	0,093	0,108	0,092	0,090	0,093
	d_{30}	0,113	0,118	0,104	0,115	0,100	0,101	0,104
	d_{32}	0,135	0,140	0,130	0,131	0,120	0,127	0,131
	d_{43}	0,170	0,167	0,175	0,155	0,151	0,179	0,180
4 ÷ 40	d_{10}	8,3	9,4	10,9	7,4	10,3	9,2	10,9
	d_{20}	9,2	10,3	12,1	8,2	11,4	10,5	12,0
	d_{30}	10,3	11,3	13,5	9,2	12,7	12,2	13,1
	d_{32}	12,9	13,5	16,9	11,5	15,7	16,3	15,7
	d_{43}	16,1	16,5	21,1	15,0	19,1	21,2	18,7

Таблица 3

Массовое распределение травленных частиц по фракциям в к-фазе

Размер фракции, мкм	АСД-1		АСД-4			АСД-6	
	$\alpha = 0,16$	$\alpha = 0,25$	$\alpha = 0,12$	$\alpha = 0,15$	$\alpha = 0,26$	$\alpha = 0,18$	$\alpha = 0,25$
0 ÷ 4	0,84	0,77	0,79	0,89	0,54	0,70	0,69
4 ÷ 40	0,16	0,23	0,21	0,11	0,46	0,30	0,31

чить, что форма частиц близка к сферической и их минимальный размер составляет $\approx 100 \text{ \AA}$. Причем наночастицы оксида алюминия настолько малы, что становятся прозрачными для пучка ускоренных электронов, с помощью которого сделана фотография. Описанные выше прозрачные сферические частицы оксида, прозрачные оксидные скорлупки и относительно редкие частицы активного алюминия (см. рис. 5, б), покрытые оксидной пленкой, оказались внутри фракции 4 ÷ 40 мкм. Дифференциальные распределения количества и объема частиц представлены на рис. 6 и 7, а среднестатистические диаметры — в табл. 2.

Как следует из приведенных данных, начальная дисперсность алюминия, а также соотношение компонентов в рабочем участке установки практически не влияют на средние размеры частиц к-фазы крупной и мелкой фракций. В этом заключается одно из отличий горения аэрозвесей от горения алюминизированных твердых топлив, когда дисперсность порошкообразного металла является определяющим фактором процессов агломерации конден-

сированных продуктов сгорания [7].

Результаты фракционирования травленных образцов к-фазы свидетельствуют, что массовая доля субмикронных частиц, т. е. частиц в основном мелкой фракции, больше доли частиц фракции 4 ÷ 40 мкм (табл. 3). Поскольку общепринято, что при горении одиночных частиц алюминия оксид металла образуется как по механизму парофазных реакций на многочисленных зародышах, так и по механизму гетерогенных реакций на поверхности горячей частицы металла [2, 7], то и при горении аэрозвесей порошкообразного алюминия оксид алюминия образуется преимущественно в результате парофазных реакций. Обратим внимание на незначительное снижение массовой доли субмикронных частиц Al_2O_3 в случае повышения дисперсности исходного порошка, которое может быть обусловлено увеличением доли оксида алюминия, образующегося в результате гетерогенных химических реакций на поверхности частиц.

ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ НА ДИСПЕРСНЫЙ

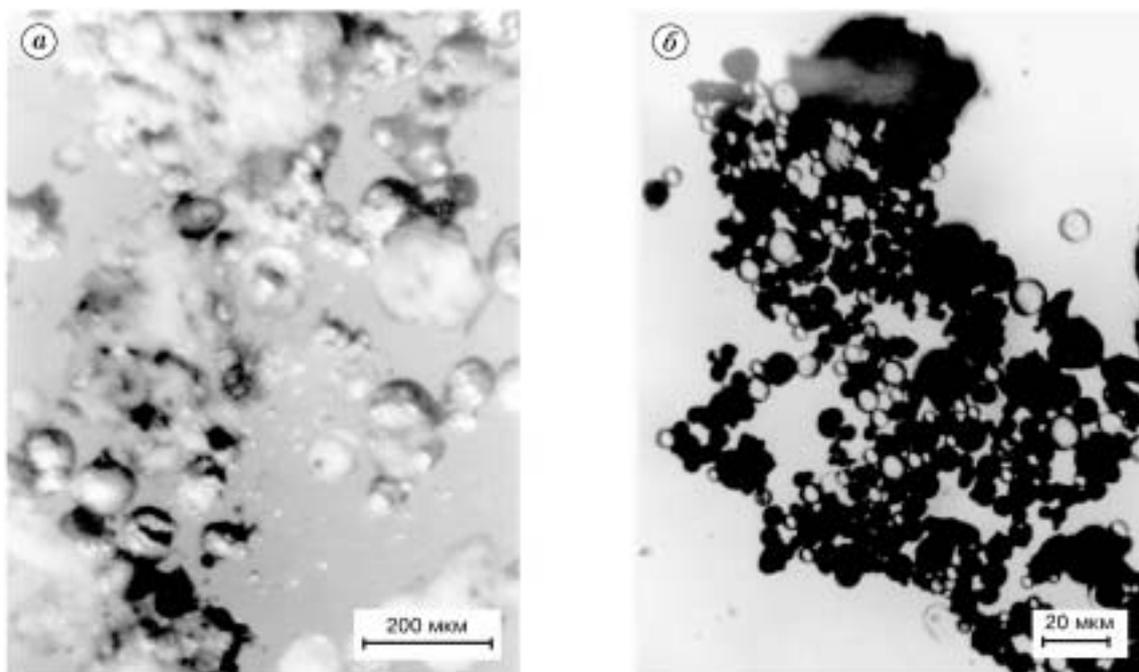


Рис. 4. Фотографии нетравленных частиц к-фазы:
исходный порошок: *a* — алюминий АСД-1, *б* — алюминий АСД-4

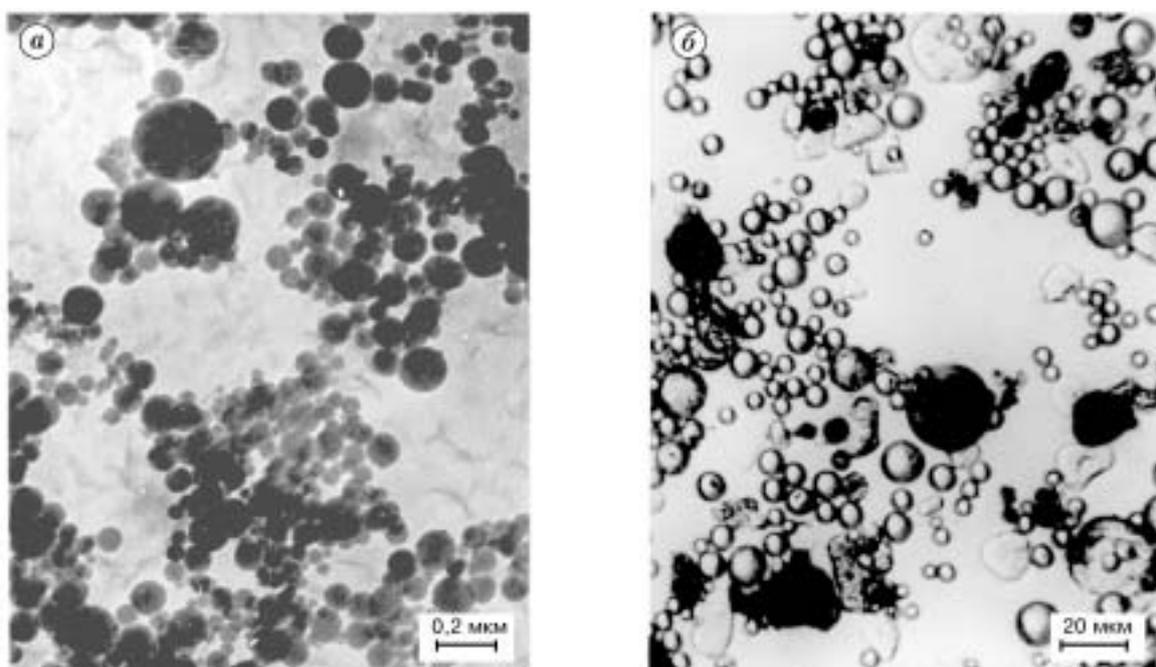


Рис. 5. Фотографии травленных частиц к-фазы (исходный порошок — алюминий АСД-1):
a — субмикронные частицы, *б* — фракция 4 ÷ 40 мкм

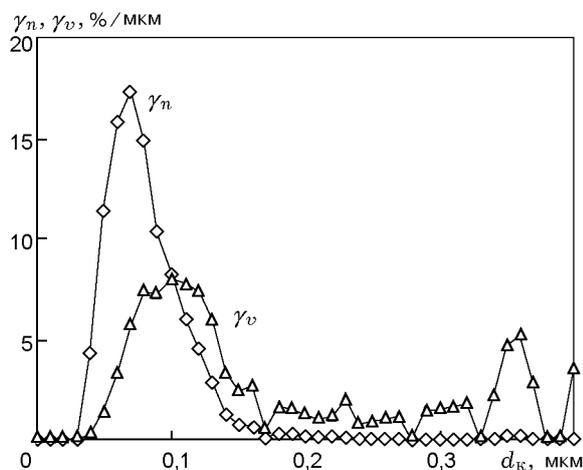


Рис. 6. Плотность распределения количества (γ_n) и объема (γ_v) частиц субдисперсных конденсированных продуктов сгорания алюминия марки АСД-6

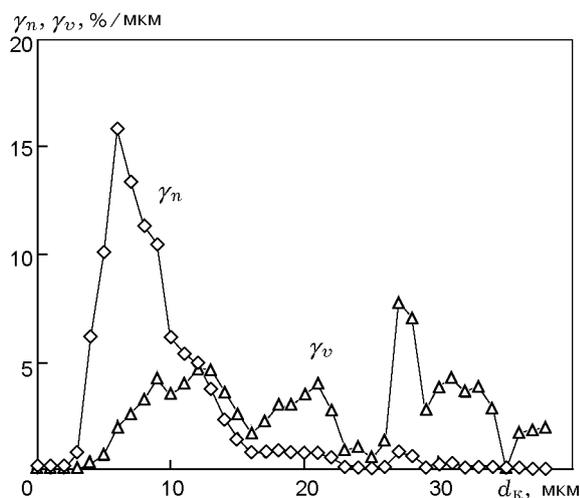


Рис. 7. Плотность распределения количества и объема частиц фракции $4 \div 40$ мкм конденсированных продуктов сгорания алюминия марки АСД-6

СОСТАВ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ АЭРОВЗЕСИ

Эксперименты проводились при давлении, равном, выше и меньше атмосферного, и коэффициенте избытка окислителя в рабочем участке $0,12 \div 0,4$. В качестве горючего использовался порошкообразный алюминий марки АСД-1.

С помощью электронного микроскопа установлено, что внешний вид субмикронных частиц к-фазы практически не зависит от давления в изученном диапазоне и совпадает с опи-

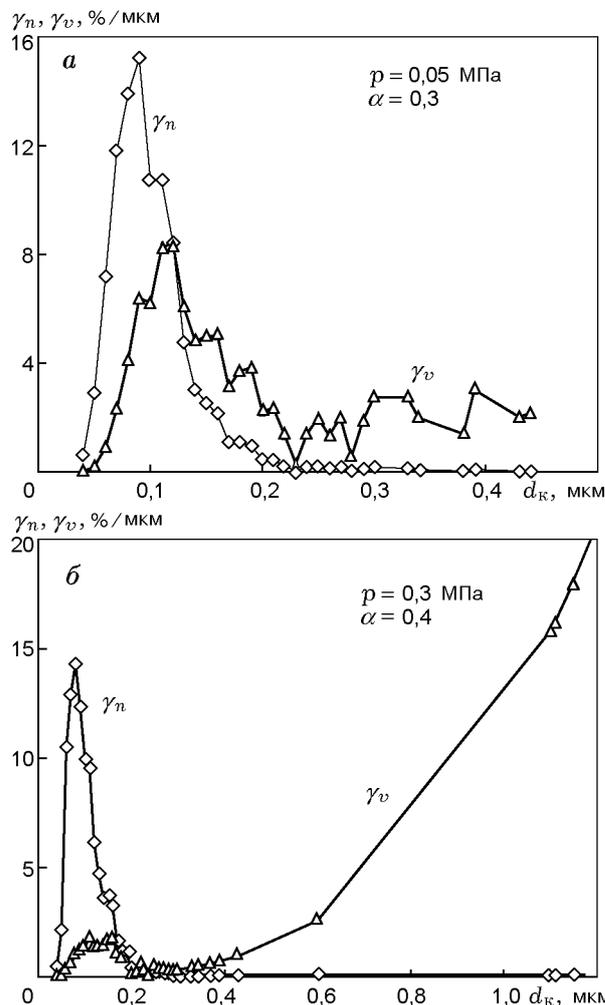


Рис. 8. Плотность распределения количества и объема частиц Al_2O_3 мелкой фракции: исходный порошок — алюминий АСД-1

санным выше (см. рис. 4, а). Помимо субмикронных частиц, в конденсированных продуктах в небольшом количестве представлены частицы в виде полых сферических оболочек диаметром $1 \div 2$ мкм. Данный факт может служить доказательством того, что два механизма образования к-фазы: конденсация на многочисленных зародышах и накопление оксида на поверхности горячей металлической частицы — реализуются не только при горении одиночных и относительно крупных частиц, но и при горении аэровзеси мелких порошков алюминия.

Дифференциальные распределения частиц к-фазы по размеру (рис. 8) использовались для определения среднестатистических размеров. Как следует из данных табл. 4, к-фаза при $p = 0,05$ МПа состоит преимущественно из суб-

Таблица 4
Среднестатистические диаметры частиц Al_2O_3
при горении порошка АСД-1 в воздухе при разных давлениях

p , МПа	α	d_{10} , мкм	d_{20} , мкм	d_{30} , мкм	d_{32} , мкм	d_{43} , мкм
0,05	0,13	0,11	0,12	0,13	0,16	0,20
	0,20	0,12	0,13	0,14	0,16	0,19
	0,30	0,10	0,11	0,12	0,14	0,18
0,075	0,12	0,10	0,12	0,15	0,25	0,56
	0,17	0,12	0,13	0,17	0,28	0,77
	0,23	0,11	0,13	0,19	0,43	1,21
0,30	0,40	0,11	0,13	0,19	0,42	0,91

микронных частиц, наибольший диаметр которых не превышает 0,5 мкм. С увеличением давления вероятность образования Al_2O_3 на поверхности частиц повышается и в продуктах горения появляются полые сферы диаметром 1 ÷ 2 мкм. При этом надо иметь в виду, что приведенные в таблице среднестатистические размеры d_{43} при $p > 0,075$ МПа в определенной степени условны, поскольку плотности субмикронных частиц и полых оболочек, очевидно, различны. Тем не менее среднестатистический (d_{10}), поверхностный (d_{20}) и объемный (d_{30}) диаметры всех проб субмикронных продуктов горения алюминия в диапазоне $p = 0,05 \div 0,3$ МПа при $\alpha = 0,12 \div 0,4$ практически равны и их значения находятся в интервале 0,10 ÷ 0,19 мкм.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ СЖИГАНИЯ Порошкообразного алюминия на дисперсный состав конденсированных продуктов сгорания

Представляет интерес сравнить полученные результаты с результатами исследований дисперсного состава к-фазы продуктов горения алюминия в различных средах и при различных условиях (табл. 5). При стабилизации ламинарного диффузионного газодисперсного пламени на срезе сопла бунзеновской горелки [9] конденсированные продукты горения алюминия (дисперсность исходного порошка соответствовала дисперсности АСД-1) представляют собой субдисперсные частицы оксида со среднестатистическим диаметром 0,25 мкм. Изменение условий горения (сжигание при атмосферном давлении алюминия марки АСД-1 в камере сгорания модельной установки [4]) приводит к полимодальному распределению с широким

диапазоном размеров частиц. Такие качественные и количественные изменения дисперсного состава могут быть вызваны турбулизацией потока и образованием зон обратных токов за стабилизатором пламени, что обуславливает, с одной стороны, возникновение процессов агломерации (появление частиц к-фазы крупнее исходных частиц алюминия), а с другой — приводит к изменению характера взаимодействия отдельных частиц алюминия с кислородом и повышению доли оксида, образующегося на поверхности горящих частиц алюминия.

Горение алюминия в составе смесевых твердых топлив характеризуется образованием агломератов сложного химического состава и структуры, а также их многостадийным выгоранием.

Дисперсный состав к-фазы также является полимодальным, и для него характерны моды в диапазоне размеров частиц 0,3 ÷ 2, 4 ÷ 50 и 50 ÷ 500 мкм [6], представляющих субдисперсный оксид, крупнодисперсный оксид и агломераты в виде каркасов на основе углерода, недогоревшего алюминия и оксида алюминия. Так, например, при сжигании смесевых топлив на основе перхлората аммония, алюминия марки АСД-4 и связки (поливинилтетразольный полимер) при давлении 4,5 МПа [10] среднестатистические диаметры частиц к-фазы фракций 0,5 ÷ 55 мкм и крупнее 55 мкм составляют соответственно 19,7 и 127 мкм, что почти вдвое превышает соответствующие размеры в случае горения азрзовеси алюминия в турбулентном потоке.

При исследовании дисперсного состава агломератов и высокодисперсных частиц оксида алюминия в продуктах сгорания твердого топ-

Таблица 5
Средние диаметры частиц конденсированных продуктов сгорания
алюминия в различных условиях

Условия сжигания	Анализируемая фракция	d_{10} , мкм	d_{20} , мкм	d_{32} , мкм	d_{43} , мкм
Ламинарное диффузионное газодисперсное пламя [9]	Менее 1 мкм	0,066	0,078	0,154	0,253
Турбулентное аэродисперсное пламя, $\alpha = 0,8$ [4]	Менее 1 мкм	0,1	0,106	0,133	0,159
	4 ÷ 50 мкм	10,5	11,6	16,3	19,5
	Более 50 мкм	58	60	68	80
27 % ПХА 35 % октогена	0,5 ÷ 55 мкм	1,6	2,3	8,7	19,7
20 % связки 18 % А1 [10]	55 ÷ 500 мкм	87	90	105	127
64 % ПХА 12 % связки	0 ÷ 2,5 мкм $p = 1$ МПа [11]	—	—	—	0,1 ÷ 0,5
24 % А1	55 ÷ 500 мкм $p = 6$ МПа [12]	—	—	—	126

лива с добавками алюминия марки АСД-4 экспериментально установлено следующее. Среднемассовый диаметр высокодисперсного оксида составляет $0,1 \div 0,5$ мкм при давлении в камере сгорания 1 МПа [11], а агломератов — 126 мкм при давлении в камере сгорания 6 МПа [12].

Таким образом, можно считать, что при горении алюминия в составе газозвеси и в смесевых конденсированных системах качественные характеристики к-фазы (тип частиц, полимодальность распределения по размерам) подобны друг другу, а отличия заключаются в соотношении преобладающих реакций (поверхностные гетерогенные или парофазные), которое оказывает влияние на вид плотности распределения количества частиц к-фазы по размеру и на ее средние моменты.

На основании анализа результатов проведенных исследований и их сравнения с опубликованными данными можно сделать следующие выводы.

1. Определяющее влияние на дисперсный состав к-фазы оказывают газодинамика процесса горения частиц алюминия и условия их взаимодействия между собой и с газом.

2. При горении аэрозвеси частиц алюминия основная доля к-фазы (до 90 %) приходится на субмикронные частицы, размеры которых практически не зависят от начальной дисперсности алюминия и имеют тенденцию к увеличению при повышении давления.

Авторы выражают особую признательность сотруднику ИПХФ РАН В. И. Шевцову за помощь в работе и обсуждение полученных результатов, а также благодарят М. Г. Власова, С. С. Бусарову, В. А. Лесовникову за выполнение дисперсного анализа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бружустовский Т., Глассмен И. Спектроскопическое исследование горения металлов // Гетерогенное горение / Под ред. А. В. Ильинского; Пер. с англ. И. Н. Садовского. М.: Мир, 1967. С. 59–90.
2. Колесников-Свинарев В. И., Истратов А. Г., Смирнов В. И. и др. Влияние параметров окружающей среды на горение капли алюминия // Физика аэродисперсных систем. 1987. Вып. 31. С. 57–63.
3. Стесик Л. Н., Гусаченко Е. И., Фурсов В. П. и др. Особенности формирования агломератов при горении смесевых композиций //

- Физика аэродисперсных систем. 1982. Вып. 21. С. 62–66.
4. **Ягодников Д. А., Гусаченко Е. И.** Влияние внешнего электрического поля на дисперсный состав конденсированных продуктов сгорания аэрозвеси частиц алюминия // Физика горения и взрыва. 2002. Т. 38, № 4. С. 80–86.
 5. **Бабук В. А., Васильев В. А., Свиридов В. В.** Моделирование структуры смесового твердого ракетного топлива // Физика горения и взрыва. 1999. Т. 35, № 2. С. 35–40.
 6. **Глотов О. Г.** Конденсированные продукты горения алюминизированных топлив. II. Эволюция частиц при удалении от поверхности горения // Физика горения и взрыва. 2000. Т. 36, № 4. С. 66–78.
 7. **Горение** порошкообразных металлов в активных средах / Похил П. Ф., Беляев А. Ф., Фролов Ю. В. и др. М.: Наука, 1972.
 8. **Ягодников Д. А., Воронецкий А. В., Лапицкий В. И.** Распространение пламени по аэрозвеси алюминия при пониженных давлениях // Физика горения и взрыва. 1995. Т. 31, № 5. С. 23–31.
 9. **Золотко А. Н., Вовчук Я. И., Полетаев Н. И. и др.** Синтез наноксидов в двухфазных ламинарных пламенах // Физика горения и взрыва. 1996. Т. 32, № 3. С. 24–33.
 10. **Glotov O. G., Zarko V. E., Shandakov V., Yagodnikov D. A.** A study of the effect of polymer coating on aluminum agglomeration // Energetic Materials. Ignition, Combustion and Detonation: Proc. 32th Intern. Annual Conf. of ICT. Karlsruhe, Germany, 2001. P. 115-1–115-14
 11. **Бабук В. А., Малахов М. С.** Изучение закономерностей образования высокодисперсного оксида при горении частиц алюминия // Внутрикамерные процессы, горение и газовая динамика дисперсных систем. СПб., 1997. С. 147–150.
 12. **Бабук В. А.** Рецептурные факторы и проблемы управления процессом агломерации при горении металлизированных твердых топлив // Unsteady Combustion and Interior Ballistics: Lecturers of the III Intern. Workshop. S. Petersburg, 2000. V. 2. P. 308–319.

Поступила в редакцию 20/III 2003 г.
