

ВЛИЯНИЕ ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ДИСПЕРСНЫЙ СОСТАВ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ АЭРОВЗВЕСИ ЧАСТИЦ АЛЮМИНИЯ

Д. А. Ягодников, Е. И. Гусаченко*

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, 107005 Москва
daj@mx.bmstu.ru

*Институт проблем химической физики РАН, 142432 Черноголовка

Исследовалось влияние внешнего электрического поля на полноту сгорания порошкообразного алюминия марки АСД-1 в потоке воздуха и на дисперсный состав конденсированных продуктов сгорания. Установлено, что при коэффициенте избытка окислителя 0,8 и скорости потока на входе в камеру сгорания 10 м/с наложение электрического поля увеличивает полноту сгорания алюминия с 43 до 75 %. При этом размеры субмикронных частиц оксида алюминия практически не изменяются, а среднемассовые размеры и массовая доля частиц фракции 4 ÷ 50 мкм уменьшаются, что обусловлено интенсифицирующим воздействием электрического поля на парофазное горение частиц алюминия. Уменьшение массовой доли частиц крупнее 50 мкм с 12 до 3 % при наложении электрического поля заметно подавляет процесс агломерации частиц алюминия при горении аэровзвеси.

Ключевые слова: аэровзвесь, алюминий, турбулентное горение, электрическое поле, дисперсный состав конденсированных продуктов сгорания.

При использовании алюминия в качестве добавок к смесевым твердотопливным композициям необходимо добиваться снижения двухфазных потерь, обусловленных наличием в продуктах сгорания частиц конденсированной фазы. Данная работа посвящена исследованию влияния внешнего электрического поля (ВЭП) на полноту сгорания порошкообразного металлического горючего — алюминия марки АСД-1 (среднемассовый диаметр частиц 22 мкм) и на дисперсный состав конденсированных продуктов сгорания.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Эксперименты проводились при атмосферном давлении в модельной камере диаметром 70 мм и длиной 1,2 м, описание которой представлено в [1]. Для подачи металлического горючего в камеру сгорания применялась бесфорсуночная вытеснительная система с дозированием расхода порошка в поток воздуха, в котором далее происходило сгорание алюминия. Воспламенение аэровзвеси частиц осуществлялось электроискровым способом. После воспла-

менения топливной смеси электрическая свеча отключалась и фронт пламени стабилизировался за плохообтекаемым телом — конусом с углом при вершине 90° и диаметром основания 40 мм (степень загромождения поперечного сечения 33 %).

Камера сгорания была заземлена, а к электрически изолированному стабилизатору прикладывался отрицательный потенциал 900 В, который не снимался в течение всего опыта. Таким образом в объеме камеры, где происходило воспламенение и горение частиц алюминия, была реализована продольно-поперечная схема наложения ВЭП.

Горение аэровзвеси частиц алюминия исследовалось как в условиях без ВЭП (опыт Р1), так и в условиях наложения поля (опыт Р2) при неизменных коэффициенте избытка окислителя ($\alpha = 0,8$) и скорости потока на входе в камеру сгорания ($v = 10$ м/с). Разработанные методики определения основных параметров горения и конденсированной фазы (к-фазы) характеризуются тем, что преобладающей является систематическая погрешность. Результаты расчета относительных предельных погрешностей основных параметров по методике [2] представлены в табл. 1.

Конденсированные продукты сгорания

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

Таблица 1

Параметр	Погрешность, %
Скорость потока	$\pm 0,51$
Коэффициент избытка окислителя	$\pm 4,5$
Диаметр частиц	± 10

алюминиево-воздушной смеси отбирали на выходе из камеры ($\approx 10\%$ по массе). Образцы к-фазы изучали по методике [3, 4], разработанной для дисперсного анализа конденсированных продуктов сгорания смесевых металлизированных топлив. Исследование включало травление образцов в слабом растворе соляной кислоты, разделение исходных и травленных образцов на три фракции ($0 \div 4$, $4 \div 50$ мкм и крупнее 50 мкм) и изучение частиц каждой фракции при помощи оптической и электронной микроскопии.

Операцию травления, необходимую в связи с удалением неокисленного алюминия, оставивали, когда выделение водорода из образца существенно снижалось, но еще не прекращалось. После травления цвет образца становился практически белым. Потери массы образцов Р1 и Р2 после травления составили 41 и 15 % соответственно. Учитывая, что скорость растворения алюминия в растворе кислоты на порядки выше скорости растворения оксида алюминия, можно предположить, что активный алюминий находился в исходных образцах в количествах, близких к указанным.

Разделение образцов на фракции выполнялось седиментационным (граница раздела 4 мкм) и ситовым (граница раздела 50 мкм) способами. Потери при разделении составили менее 5 % по массе. Результаты определения массовых долей фракций представлены в табл. 2. На основе информации о количестве активного алюминия в образцах и массовых долях фракций была сделана оценка содержания недогоревшего алюминия во фракциях конденсированных продуктов сгорания, результаты которой помещены в этой же таблице.

Фотографии частиц исследованных фракций травленных образцов приведены на рис. 1. Субмикронные частицы образцов Р1 и Р2 практически одинаковы, поэтому даны фотографии частиц, образованных при горении алюминия в присутствии ВЭП. Из анализа фотографии (см. рис. 1,а) следует, что форма частиц близка к сферической и их минимальный размер

$\approx 100 \text{ \AA}$. Причем наночастицы оксида алюминия стали прозрачными для ускоренных электронов, с помощью которых сделана фотография. Частицы фракции $4 \div 50$ мкм представляют собой смесь прозрачных сферических частиц оксида алюминия, прозрачных скорлупок, оставшихся после растворения активного алюминия, и относительно редких частиц неполностью протравленного алюминия. Скорлупок больше в образце Р1 (см. рис. 1,б), в то время как сферических частиц Al_2O_3 больше в образце Р2 (см. рис. 1,г). Фракции крупнее 50 мкм представляют собой в основном сферические частицы оксида алюминия, максимальный размер которых достигает 100 мкм (см. рис. 1,б).

Отметим также, что изучение нетравленных образцов к-фазы с помощью оптического микроскопа позволило дополнительно установить, что:

— частицы недогоревшего алюминия фракции $4 \div 50$ мкм имеют матовую поверхность серого цвета и покрыты слоем оксидной пленки;

— недогоревший алюминий, помимо крупных агломератов, присутствует также в виде мелких частиц с металлическим блеском, которые находятся внутри массивной частицы-матрицы из оксида.

Следующим этапом работы было определение дисперсного состава конденсированных частиц. Диаметр (или поперечник) частиц фракции $0 \div 4$ мкм измеряли на экране, куда проецировались частицы при суммарном увеличении $10^4 \div 10^5$, с помощью трафарета, на котором были нанесены окружности диаметром $3 \div 60$ мм с шагом по диаметру 1 мм. Диаметр изображения частицы сравнивался с диаметром соответствующей окружности на трафарете. Последний позволял проводить обмер частицы с шагом $0,1 \div 0,01$ мкм соответственно. Для получения распределения одной фракции обмерялись диаметры $1500 \div 2500$ частиц без исключения по какому-либо признаку.

Диаметр частиц фракции $4 \div 50$ мкм и фракции крупнее 50 мкм измеряли на матовом стекле оптического микроскопа МБИ-6 при увеличении соответственно $10^3 \div 10^2$ с применением того же трафарета, шаг измерения 1,0 и 10 мкм соответственно. При анализе фракций отмечали прозрачность материала и форму частиц, что позволило дополнительно получить информацию по частицам, имеющим характерные особенности. Так, например, про-

Таблица 2

Опыт	U, В	Массовая доля фракций, %						Массовая доля алюминия в частицах фракции, %		
		Исходный образец			Травленный образец			Исходный образец (оценка)		
		0 ÷ 4 мкм	4 ÷ 50 мкм	> 50 мкм	0 ÷ 4 мкм	4 ÷ 50 мкм	> 50 мкм	0 ÷ 4 мкм	4 ÷ 50 мкм	> 50 мкм
P1	0	47	41	12	69	28	3	14	60	85
P2	900	61	36	3	66	33,3	0,7	8	21	80

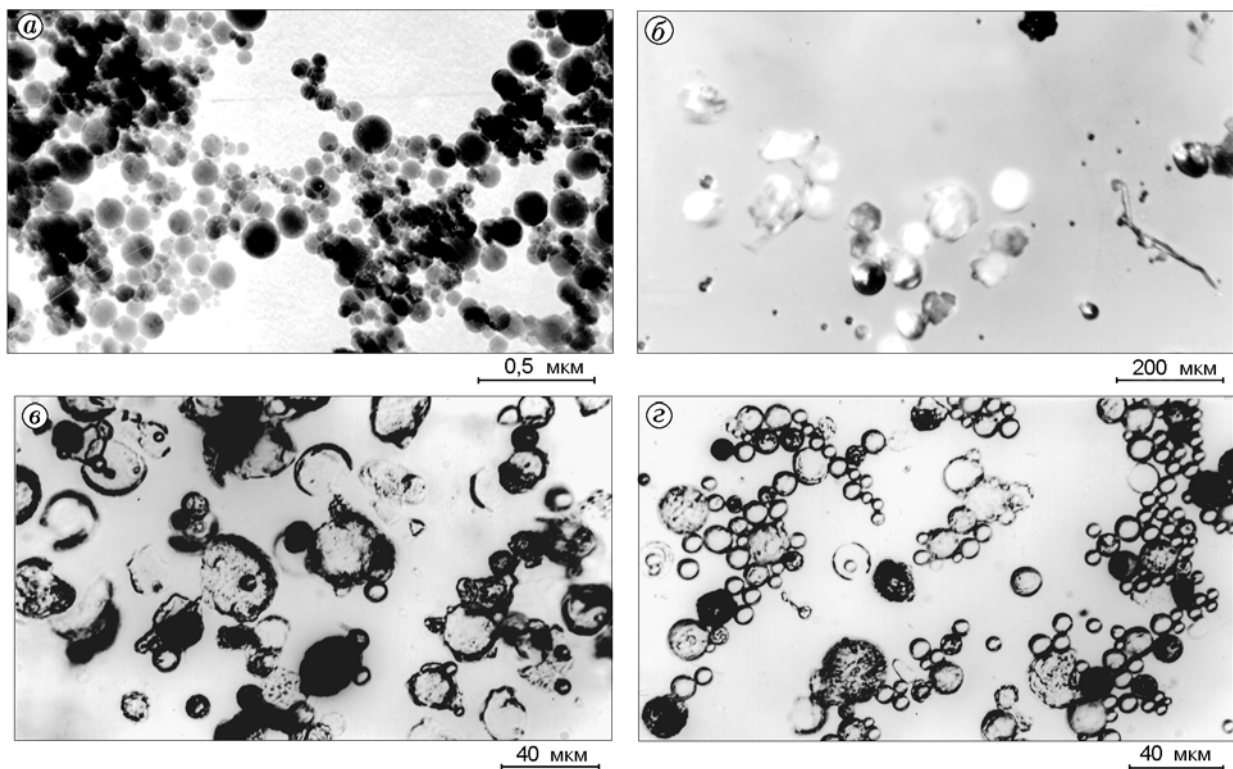


Рис. 1. Фотографии частиц травленных образцов: а — фракция 0 ÷ 4 мкм, образец P2; б — крупнее 50 мкм, образец P2; в — 4 ÷ 50 мкм, образец P1; г — 4 ÷ 50 мкм, образец P2

зрачные частицы фракции 4 ÷ 50 мкм состоят из оксида алюминия, а непрозрачные содержат еще и недогоревший алюминий. Сферические частицы фракции крупнее 50 мкм являются в основном агломератами из недогоревшего алюминия, который в результате травления исчезает.

На основе результатов измерения диаметров частиц для каждой фракции по стандартной процедуре рассчитывали плотность распределения количества частиц в зависимости от их размера, а также определяли среднестатистические диаметры: d_{10} — среднесчетный,

d_{20} — среднеквадратический, d_{30} — среднекубический, d_{32} — диаметр Заутера, d_{43} — среднемассовый (табл. 3). Для указанного количества измеренных частиц точность определения средних диаметров и плотности распределения составила $\approx 10\%$.

Результаты дисперсного анализа субмикронных частиц к-фазы свидетельствует о том, что максимум распределения количества и массы исходных частиц по диаметрам приходится на размер $\approx 0,1$ мкм. Наблюдаемые редкие частицы с поперечником вплоть до 4 мкм, по-видимому, могут быть и частицами оксида,

Т а б л и ц а 3

Фракция, мкм	Опыт Р1, $U = 0$		Опыт Р2, $U = 900$ В	
	Исходный образец	Травленный образец	Исходный образец	Травленный образец
1	2	3	4	5
0 ÷ 4	d_{10} , мкм			
	0,090	0,100	0,090	0,090
	d_{20} , мкм			
	0,103	0,106	0,100	0,103
	d_{30} , мкм			
	0,113	0,114	0,107	0,113
	d_{32} , мкм			
	0,136	0,133	0,125	0,135
4 ÷ 50 (все частицы)	d_{43} , мкм			
	0,157	0,159	0,144	0,164
	d_{10} , мкм			
	13,9	10,5	7,4	8,5
	d_{20} , мкм			
	15,6	11,6	8,4	9,4
	d_{30} , мкм			
	17,1	13,0	9,5	10,4
4 ÷ 50 (прозрачные частицы)	d_{32} , мкм			
	20,6	16,3	12,3	12,7
	d_{43} , мкм			
	22,9	19,5	15,6	15,2
	d_{10} , мкм			
	6,8	9,8	6,2	7,7
	d_{20} , мкм			
	7,4	10,9	6,8	8,2
> 50 (все частицы)	d_{30} , мкм			
	8,1	12,1	7,4	8,7
	d_{32} , мкм			
	9,6	14,9	8,7	9,8
	d_{43} , мкм			
	11,0	17,7	10,1	10,8
	Относительное количество, %			
	35	95	82	90
Относительный объем, %				
3,6	76	38	53	
> 50 (все частицы)	d_{10} , мкм			
	57	58	80	56
	d_{20} , мкм			
	59	60	93	57
	d_{30} , мкм			
62	62	111	59	

Продолжение табл. 3

1	2	3	4	5
> 50 (сферические частицы)	d_{32} , мкм			
	67	68	156	63
	d_{43} , мкм			
	77	80	207	69
	d_{10} , мкм			
	57	57	67	53
	d_{20} , мкм			
	59	59	69	55
	d_{30} , мкм			
	61	63	73	58
	d_{32} , мкм			
	66	72	82	64
	d_{43} , мкм			
	76	95	98	72
	Относительное количество, %			
	99,6	41	89	17
	Относительный объем, %			
	98	44	25	16

и частицами недогоревшего алюминия, который присутствует в исходном образце в количестве $8 \div 14$ % по массе. В травленых образцах наблюдаются также частицы промежуточных размеров, количество которых невелико. Средние размеры субмикронных частиц мелкой фракции для исходных и травленых образцов P1 и P2 практически одинаковы (см. табл. 3). Это свидетельствует о незначительном влиянии и электрического поля, и растворения оксида алюминия в процессе травления образцов на дисперсность субмикронных частиц к-фазы.

Для травленых образцов P1 и P2 функция плотности распределения количества частиц всех фракций по размерам приведена на рис. 2. Функция построена с использованием кривых плотности распределения (дифференциального распределения) количества частиц для каждой из трех фракций и их массовых долей (см. табл. 2). Диапазон диаметров $0,5 \div 6$ мкм, в котором наблюдались частицы, был аппроксимирован линейной зависимостью. Из рис. 2 следует, что функции распределения для образцов конденсированной фазы, полученных при наложении электрического поля и без него, близки.

Для сопоставления на рис. 2 приведены

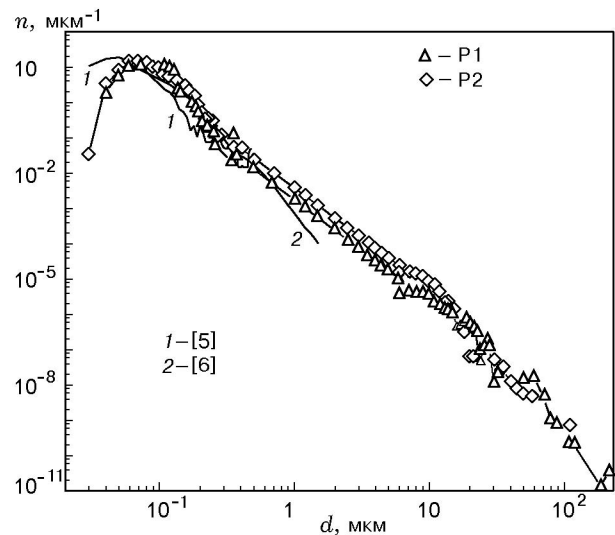


Рис. 2. Функция плотности распределения количества частиц конденсированных продуктов сгорания по размерам

функции плотности распределения конденсированных продуктов при горении аэрозвеси алюминия в бунзеновской горелке [5] (зависимость 1) и продуктов, отобранных при горении смеси топливной композиции на основе перхло-

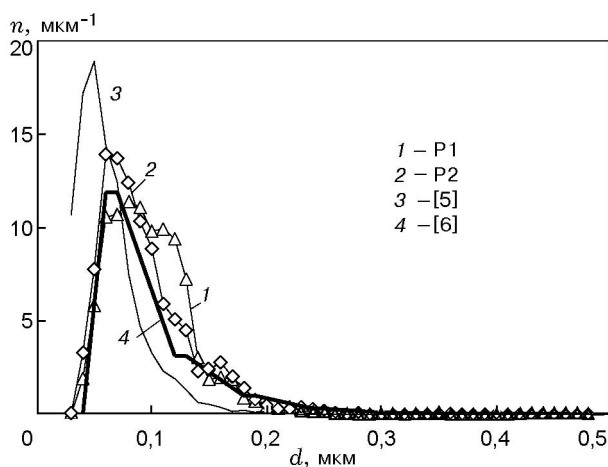


Рис. 3. Влияние внешнего электрического поля на функцию плотности распределения количества частиц для фракции $0 \div 4$ мкм

рата аммония и алюминия в модельной камере сгорания [6] (зависимость 2). По-видимому, гидродинамические характеристики потока, в котором воспламеняются и сгорают частицы алюминия, тоже влияют на дисперсный состав к-фазы продуктов сгорания, что приводит к изменениям формы и положения кривой распределения. Так, при стабилизации ламинарного газодисперсного пламени на срезе сопла бунзеновской горелки удается получить более мелкие частицы оксида алюминия, что авторы указанной работы используют при создании технологии газодисперсного синтеза субмикронных частиц оксидов металлов (нанооксидов). Другой предельный случай реализуется в процессе горения металлизированного твердого топлива, который сопровождается агломерацией частиц алюминия и образованием к-фазы сложного химического состава.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

По результатам химического анализа расчетная полнота сгорания алюминия при наложении внешнего электрического поля возросла с 43 до 75 % и приблизилась к предельной полноте сгорания 80 %, соответствующей коэффициенту избытка окислителя. При одинаковых расходных характеристиках в эксперименте это означает, что внешнее электрическое поле интенсифицирует горение порошкообразного алюминия.

Принято считать, что в отсутствие ВЭП мелкие частицы оксида образуются на много-

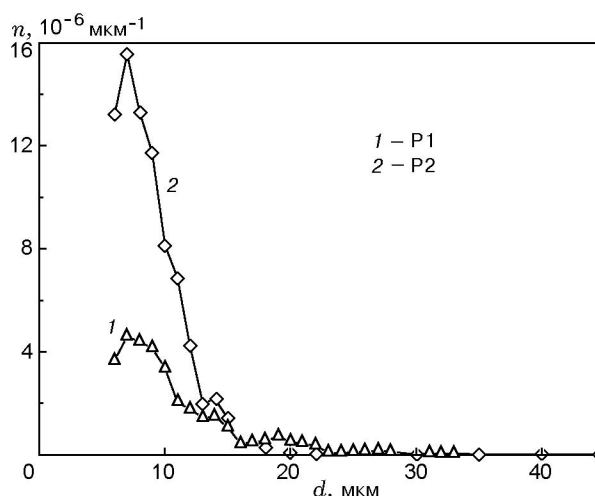


Рис. 4. Влияние внешнего электрического поля на функцию плотности распределения количества частиц для фракции $4 \div 50$ мкм

численных зародышах в зоне парофазных реакций, окружающей горящую каплю металла [7], а крупные, имеющие размер порядка исходных размеров частиц металла, образуются за счет накопления оксида на поверхности горячей капли металла [8]. Результаты опытов показывают, что зависимости $n(d)$ для субмикронных фракций травленных образцов P1 и P2 практически одинаковы (рис. 2 и 3). Однако наложение поля привело к увеличению количества мелких частиц приблизительно в 1,3 раза за счет роста массовой доли частиц мелкой фракции. Это может быть обусловлено увеличением скорости горения и полноты сгорания порошкообразного алюминия.

Процесс накопления оксида на поверхности горящих частиц оказался чувствительным к влиянию внешнего электрического поля, что отразилось на распределении частиц к-фазы (рис. 4). Так, при наложении поля среднемассовый размер частиц фракции $4 \div 50$ мкм конденсированных продуктов сгорания уменьшился с 17 до 10 мкм, что тоже, по нашему мнению, подтверждает факт интенсификации парофазных реакций при горении аэрозвеси частиц алюминия.

Образование конденсированных продуктов сгорания крупнее 50 мкм, что превышает размеры исходных частиц АСД-1, обусловлено слиянием значительного количества (десятки-сотни) частиц алюминия. Такие крупные частицы состоят по оценкам на 80 ÷ 85 % из металла. Снижение их массовой доли с 12 до

3 % при наложении электрического поля означает заметное подавление процесса агломерации частиц алюминия при горении аэровзвеси. Это можно объяснить приобретением частицами алюминия (а также частицами оксида алюминия) отрицательного заряда по механизму «прилипания» свободных электронов [9]. В результате электростатическое взаимодействие одноименно заряженных частиц препятствует образованию агломератов.

Механизм влияния электрического поля на горение и образование конденсированной фазы можно представить следующим образом. Известно [9], что воздействие ВЭП на воспламенение и горение осуществляется посредством ионного ветра (совпадающего с направлением движения положительных ионов). В эксперименте при горении аэровзвеси за плохообтекаемым телом возникают зоны рециркуляции, непосредственно примыкающие к задней кромке стабилизатора. Высокотемпературные продукты сгорания, заполняющие зону рециркуляции, обеспечивают постоянное воспламенение свежей топливной смеси и устойчивый рабочий процесс в камере сгорания. При наложении на стабилизатор отрицательного потенциала ионный ветер, перемещающий с собой микрообъемы горячих газов, направлен преимущественно к задней кромке конуса, что обуславливает интенсификацию процессов тепло- и массообмена между продуктами сгорания и свежей топливной смесью. Вследствие этого скорость срыва пламени повышается в $1,2 \div 1,3$ раза при наложении электрического поля, что экспериментально зарегистрировано в [1]. Одновременно возрастают градиенты температур аэровзвеси за конусом по длине и по диаметру установки. При неизменной начальной скорости потока (по сравнению с экспериментом без ВЭП) это приводит к уменьшению периода индукции воспламенения частиц алюминия и толщины оксидной пленки, образующейся в предвоспламенительный период. В результате интенсифицируются химические реакции в зоне горения аэровзвеси за стабилизатором и повышается полнота сгорания алюминия.

Таким образом, наложение продольно-поперечного электрического поля на область

горения аэровзвеси частиц алюминия АСД-1 повышает полноту сгорания металла, уменьшает агломерацию частиц алюминия, интенсифицирует процесс парофазного горения алюминия и уменьшает размер частиц конденсированных продуктов сгорания.

Авторы признательны сотрудникам ИПХФ РАН М. Г. Власову за фотосъемку частиц на электронном микроскопе, С. С. Бусаровой и В. А. Лесовниковой за помощь при выполнении дисперсного анализа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ягодников Д. А., Воронежский А. В. Влияние внешнего электрического поля на горение аэровзвеси частиц алюминия // Физика горения и взрыва. 1998. Т. 34, № 6. С. 23–28.
2. Зайдель А. Н. Погрешности измерения физических величин. Л.: Наука, 1985.
3. Стесик Л. Н., Гусаченко Е. И., Фурсов В. П. и др. Особенность формирования агломератов при горении смесевых композиций // Физика аэродисперсных систем: Республиканский межведомственный научный сб. Вып. 21. Киев; Одесса: Вища школа, 1982. С. 62–66.
4. Гусаченко Е. И., Стесик Л. Н., Фурсов В. П., Шевцов В. И. Исследование конденсированных продуктов горения магниевых порошков. I. Зависимость от давления // Физика горения и взрыва. 1974. Т. 10, № 4. С. 548–554.
5. Золотко А. Н., Вовчук Я. В., Полетаев Н. И. и др. Синтез наноксидов в двухфазных ламинарных потоках // Физика горения и взрыва. 1996. Т. 32, № 3. С. 24–33.
6. Бабук В. А., Малахов М. С. Изучение закономерностей образования высокодисперсного оксида при горении частиц алюминия // Внутрикамерные процессы, горение и газовая динамика дисперсных систем. С.-Петербург, 1997. С. 147–150.
7. Кудрявцев В. М., Сухов А. В., Воронежский А. В., Шпара А. П. Горение металлов при высоких давлениях (трехзонная модель) // Физика горения и взрыва. 1979. Т. 15, № 6. С. 50–57.
8. Гремячкин В. М., Истратов А. Г., Лейпунский О. И. К теории горения металлических частиц // Физические процессы при горении и взрыве. М.: Атомиздат, 1980. С. 4–68.
9. Лаутон Д., Вейнберг Ф. Электрические аспекты горения / Пер. с англ. Н. М. Вентцель, И. Я. Полонского. М.: Энергия, 1976.