

КОНДЕНСИРОВАННЫЕ ПРОДУКТЫ ГОРЕНИЯ АЛЮМИНИЗИРОВАННЫХ ТОПЛИВ. III. ВЛИЯНИЕ ИНЕРТНОЙ ГАЗООБРАЗНОЙ СРЕДЫ СЖИГАНИЯ

О. Г. Глотов

Институт химической кинетики и горения СО РАН, 630090 Новосибирск, glotov@ns.kinetics.nsc.ru

Исследовано влияние газообразной среды сжигания на гранулометрический и химический составы частиц конденсированных продуктов горения модельного топлива, содержащего перхлорат аммония, связующее и 23,4 % алюминия. Эксперименты проведены при давлениях 0,6; 4,0 и 7,5 МПа. Исследованы оксидные частицы в диапазоне размеров $1,2 \div 60$ мкм и агломераты размером от 60 мкм до максимального. Различие средних размеров отобранных агломератов в экспериментах с азотом и гелием не превышает экспериментальной погрешности. Разница в количестве непрореагировавшего (металлического) алюминия в агломератах в случае отборов в азоте и гелии также незначительна. Замена азота гелием оказывает влияние на распределение оксида, увеличивая массовую долю частиц в диапазоне размеров $1,2 \div 10$ мкм, причем эффект усиливается с давлением.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В настоящее время для исследования конденсированных продуктов горения (КПГ) твердых топлив применяют разнообразные контактные методы, основанные на замораживании, отборе и последующем анализе частиц КПГ. Как видно из обзора [1], наряду с методиками отбора частиц из камеры сгорания, факела или следа ракетного двигателя имеется ряд лабораторных методов, при использовании которых отбирают и исследуют частицы, образующиеся при сжигании небольшого топливного образца в сосуде высокого давления. В дополнение к обзору [1] укажем работы [2–8], в которых также реализованы лабораторные методики отбора КПГ. В качестве среды сжигания, т. е. в качестве замораживающего газа, в подобных методиках обычно используют азот, реже гелий [9]. Данная работа посвящена экспериментальной оценке влияния среды сжигания на характеристики отбираемых частиц и базируется на результатах, которые были частично представлены в [10].

ЭКСПЕРИМЕНТ

По методике [7] были проведены две серии экспериментов в практически одинаковых условиях, отличающихся использованием разных газов для замораживания КПГ. В первой серии опытов образцы топлива сжигали в среде азоте при давлениях $p = 0,6; 4,0;$

7,5 МПа, во второй — в гелии при $p = 0,3; 4,0$ и 7,5 МПа. Модельное смесевое топливо состояло из ПХА, энергетического связующего и 23,4 % алюминия (то же самое, что в работе [11]). Образцы топлива диаметром 6 мм и высотой ≈ 7 мм плотно вставлялись в стаканчики из оргстекла, игравшие роль бронировки. Торцевая поверхность топлива до сжигания располагалась заподлицо со стенками стаканчика. Расход азота составлял 1,4 г/с в экспериментах при $p = 0,6$ МПа и 3,4 г/с при $p = 4,0$ и 7,5 МПа. Расход гелия был 0,4 г/с в экспериментах при $p = 0,3$ МПа и 1,3 г/с при $p = 4,0$ и 7,5 МПа. При фиксированных условиях эксперимента (газ-разбавитель, его давление и расход) сжигали $7 \div 8$ образцов суммарной массой $\approx 2,5$ г. Совокупность частиц, полученных в результате горения этих нескольких образцов, фракционировали на ситах и подвергали гранулометрическому и химическому анализам, как описано в [7, 12].

Отметим, что специальные анализы, основанные на определении аммиака дистилляционным методом, показали отсутствие нитрида алюминия в КПГ. Это позволяет считать азот инертным по отношению к КПГ (по крайней мере, для исследуемого топлива).

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

На рис. 1 представлено распределение по размерам массы частиц КПГ, отобранных при

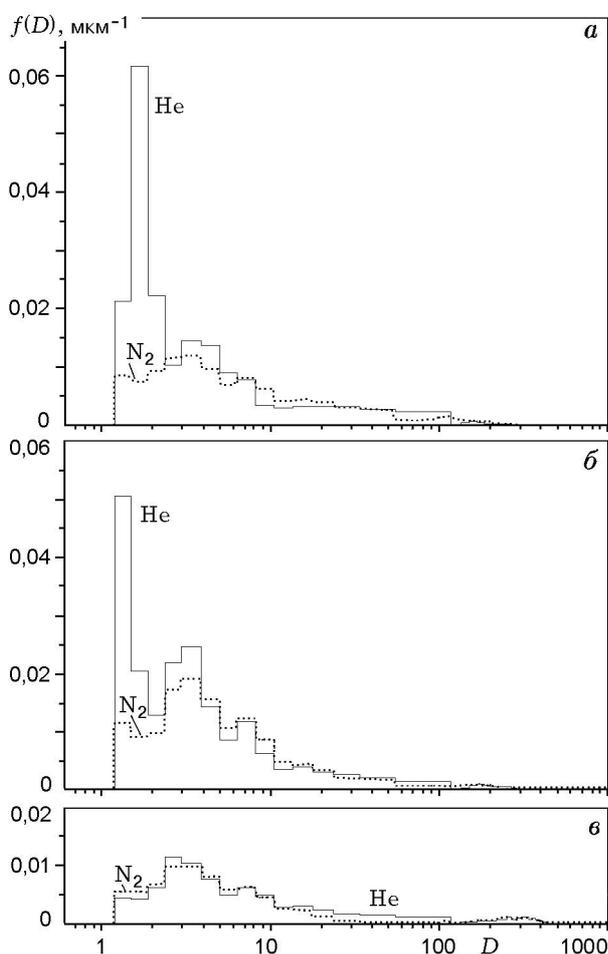


Рис. 1. Распределение массы конденсированных продуктов горения, отобранных при сжигании топлива в азоте и гелии при вариации давления:

a — $p = 7,5$ МПа; *б* — $p = 4,0$ МПа; *в* — $p = 0,3$ МПа (He) и $p = 0,6$ МПа (N_2)

сжигании образцов топлива в азоте и гелии при трех уровнях давления. В соответствии с формой представления результатов, принятой в [7], по оси ординат отложена плотность распределения относительной массы КПП по размерам $f(D)$, определенная как частное от деления массы КПП в некотором интервале размеров на ширину этого интервала и массу топлива. Поскольку для анализа мелких частиц КПП использовали гранулометр «Малверн-3600Е», минимальный размер частиц D равен 1,2 мкм.

В экспериментах с гелием распределения имеют те же, типичные для большинства алюминизированных топлив особенности, что и распределения, полученные в опытах с азотом.

Последние подробно проанализированы в [11]. Основные особенности этих распределений:

существенная полидисперсность;

естественное разделение на мелкие оксидные частицы и агломераты, которое характеризуется наличием локального минимума в области $D = 60 \div 100$ мкм и низким (менее 1,1 %) содержанием металлического алюминия во фракциях КПП мельче 40 мкм;

монотонное снижение среднего размера D_{43} агломератов при повышении давления;

многомодовая структура распределений оксидных частиц в диапазоне $D = 1,2 \div 60$ мкм.

Сравнение распределений оксидных частиц показывает, что для обоих газов в диапазоне размеров $1,2 < D < 60$ мкм можно выделить три¹ локальных максимума (моды) в интервалах $D = 1,2 \div 1,9$; $3,0 \div 3,9$; $6,4 \div 8,2$ мкм, что соответствует 1 + 2, 5 и 8-му каналам гистограммы гранулометра «Малверн-3600Е». При замене газа-разбавителя и/или изменении давления положение максимумов-мод неизменно, однако изменяется соотношение их амплитуд. Так, например, мода в двух первых каналах (1 + 2) при низком давлении (0,6 МПа N_2 и 0,3 МПа He) выражена слабо, а при $p = 7,5$ МПа ее амплитуда в экспериментах с гелием примерно в пять раз больше, чем в экспериментах с азотом.

Количественные характеристики распределений в виде средних размеров D_{mn} , вычисленных для оксидных частиц ($1,2 < D < 60$ мкм) и агломератов ($D > 60$ мкм), представлены в табл. 1 и 2 соответственно. Для сравнения результатов, полученных с использованием азота и гелия, в табл. 1 и 2 дано значение относительного отличия средних размеров, вычисленное по формуле $\Delta D_{mn} = [(D_{mn}^{N_2} - D_{mn}^{He}) \cdot 100\%]/D_{mn}^{N_2}$, где $D_{mn}^{N_2}$ и D_{mn}^{He} — соответствующие средние значения для азота и гелия.

Проанализируем различие в средних размерах частиц КПП, отобранных в азоте и гелии, с учетом разброса данных. Будем иметь в виду, что согласно экспериментальной оценке [8] максимальный разброс средних размеров D_{10}, \dots, D_{53} находится в пределах $3 \div 25\%$.

Для оксидных частиц (см. табл. 1) при низком давлении (0,6 МПа N_2 , 0,3 МПа He) на-

¹В [11] при более широкой вариации условий экспериментов выделяли еще моду в интервале $D = 13,8 \div 17,7$ мкм в 11-м канале гистограммы гранулометра «Малверн». В условиях экспериментов настоящей работы эта мода выражена слабо.

Т а б л и ц а 1
Сравнение средних размеров D_{mn} (мкм) оксидных частиц,
отобранных при сжигании в азоте и гелии

p , МПа	Среда	D_{10}	D_{20}	D_{30}	D_{21}	D_{32}	D_{43}	D_{53}
0,6	Азот	2,4	2,8	3,5	3,3	5,4	9,8	12,5
0,3	Гелий	2,5	3,0	4,3	3,7	8,4	21,2	27,0
		$\Delta D_{mn}, \%$						
		-4	-7	-23	-12	-56	-116	-116
4,0	Азот	2,4	2,9	3,8	3,5	6,9	16,8	22,4
4,0	Гелий	1,8	2,1	2,9	2,5	5,5	17,5	24,0
		$\Delta D_{mn}, \%$						
		+25	+28	+24	+29	+20	-4	-7
7,5	Азот	2,3	2,9	4,2	3,6	9,0	22,3	27,5
7,5	Гелий	1,9	2,1	3,0	2,4	5,7	21,0	27,7
		$\Delta D_{mn}, \%$						
		+17	+28	+29	+33	+37	+6	-0,7

П р и м е ч а н и е. Средние размеры вычислены в диапазоне размеров $1,2 \div 60$ мкм.

Т а б л и ц а 2
Сравнение средних размеров D_{mn} (мкм) агломератов,
отобранных при сжигании в азоте и гелии

p , МПа	Среда	D_{10}	D_{20}	D_{30}	D_{21}	D_{32}	D_{43}	D_{53}
0,6	Азот	164	181	199	199	240	281	299
0,3	Гелий	101	114	133	128	181	248	273
		$\Delta D_{mn}, \%$						
		38	37	33	36	25	12	9
4,0	Азот	108	117	128	127	152	182	200
4,0	Гелий	99	104	112	109	128	158	174
		$\Delta D_{mn}, \%$						
		8	11	13	14	16	13	13
7,5	Азот	98	104	111	110	126	147	158
7,5	Гелий	83	85	89	88	96	108	117
		$\Delta D_{mn}, \%$						
		15	18	20	20	24	27	26

П р и м е ч а н и е. Средние размеры вычислены в диапазоне размеров от 60 мкм до максимального.

блюдается практически монотонное возрастание относительного отличия от -4 до -116% при увеличении порядка среднего размера в последовательности $D_{10}, D_{20}, D_{30}, D_{21}, D_{32}, D_{43}, D_{53}$, так что максимальное отличие наблюдается для средних размеров высоких порядков D_{43} и D_{53} . Известно [7], что средние размеры высоких порядков более чувствительны к крупным частицам. При вычислении средних размеров в диапазоне $1,2 \div 60$ мкм в роли крупных частиц выступают частицы с размером вблизи правой границы диапазона. Поэтому указанное выше различие свидетельствует о большей массовой доли частиц с размером в десятки микрометров в экспериментах с гелием (см. рис. 1).

Из табл. 1 видно, что при $p = 4,0$ и $7,5$ МПа средние размеры оксидных частиц $D_{10}, D_{20}, D_{30}, D_{21}, D_{32}$ при отборе в азоте на $17 \div 37\%$ превышают соответствующие средние размеры в опытах с гелием, в то время как значения D_{43}, D_{53} в обоих случаях практически совпадают (отличие в $-7 \dots +6\%$ находится в пределах экспериментальной погрешности). Эти результаты объясняются большей долей мелких частиц в экспериментах с гелием (см. рис. 1, гистограммные каналы $1 \div 3$).

Средние размеры агломератов при отборе в азоте во всех проведенных экспериментах на $9 \div 38\%$ выше, чем при отборе в гелии (см. табл. 2). Погрешность средних размеров в табл. 2, оцененная как половина ширины интервала гистограмм при проведении гранулометрического анализа под микроскопом, составляет ≈ 22 мкм [7, 11]. Наблюдаемые отличия средних размеров агломератов можно считать небольшими, поскольку они сопоставимы с точностью измерения размеров частиц.

Рассмотрим результаты измерения содержания несгоревшего алюминия в агломератах. Следуя [7, 11], определим неполноту сгорания алюминия агломератов (η) как отношение массы алюминия в частицах КПП с $D > 60$ мкм к начальной массе алюминия в топливе. Результаты вычислений представлены в табл. 3. Относительная погрешность значений η , оцененная посредством теста на воспроизводимость [11], не превышает 15% . Принимая во внимание разброс данных, невозможно сделать заключение о заметных различиях в неполноте сгорания алюминия, реализованной в экспериментах с азотом и гелием. Данные о выгорании алюминия из всей совокупности агломератов, полученные в экспериментах с азотом

Таблица 3
Неполнота сгорания алюминия агломератов

p , МПа	Среда	η
0,6	Азот	$0,14 \pm 0,2$
0,3	Гелий	$0,14 \pm 0,2$
4,0	Азот	$0,16 \pm 0,2$
4,0	Гелий	$0,19 \pm 0,3$
7,5	Азот	$0,11 \pm 0,2$
7,5	Гелий	$0,11 \pm 0,2$

в диапазоне $p = 0,6 \div 7,5$ МПа и при вариации длины охранной трубки от 0 до 190 мм (16 точек), обобщены в [11] в виде зависимости $\eta(t) = 0,184 \exp(-0,0175t)$, где t — время пребывания частиц в пламени горящего топливного образца, мс. Включение в набор данных трех точек, соответствующих экспериментам с гелием, практически не меняет этой зависимости: $\eta(t) = 0,182 \exp(-0,0164t)$.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

При изменении среды сжигания зарегистрированы значимые различия массовых распределений мелких (оксидных) частиц КПП. Обсудим характеристики этих частиц.

Дисперсный оксид алюминия применяется в ряде отраслей промышленности, например в порошковой металлургии для изготовления конструкционной керамики. При этом для обеспечения требуемых физико-механических свойств необходимы исходные порошки высокой дисперсности и чистоты с однородным фракционным составом [13, 14]. Известны попытки получения оксида алюминия в качестве целевого продукта при утилизации зарядов алюминизированного топлива [15, 16] либо в результате сжигания металлического порошка в специальном генераторе [17].

Проведенный в [11] анализ экспериментальных данных показал, что гранулометрический состав образующихся при горении оксидных частиц слабо зависит от природы топлива, давления, исходной дисперсности металла, размера агломератов и других факторов, т. е. обладает определенным консерватизмом. Поэтому любые способы воздействия на распределение оксидных частиц заслуживают внимания.

В работе [17] установлено, что, варьи-

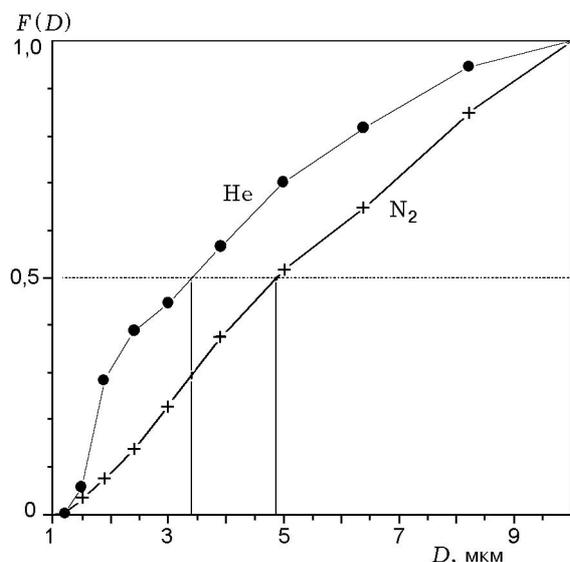


Рис. 2. Нормированные кумулятивные массовые распределения $F(D)$ оксидных частиц в интервале размеров от $1,2 \div 10$ мкм: эксперименты в азоте и гелии при $p = 7,5$ МПа

руя положение (расстояние) отборника относительно выходного сечения сопла генератора в пределах $0,8 \div 1,2$ условных единиц, можно изменить массовый медианный диаметр отбираемых оксидных частиц с 2 до 4 мкм. Расстояние, равное одной условной единице, соответствует расчетному сечению, в котором температуры газа и частиц снижаются до температуры кристаллизации оксида. Массовый медианный диаметр d_m определяется из условия равенства массы частиц слева и справа от d_m в исследуемом диапазоне размеров. В условиях [17] диапазон размеров был от $0,3 \div 0,5$ до 10 мкм.

По данным настоящей работы наиболее заметное различие в распределениях оксидных частиц, отобранных в экспериментах с азотом и гелием, наблюдается в трех первых интервалах гистограммы (границы: $D = 1,2-1,5-1,9-2,4$ мкм) и усугубляется с давлением. Указанный диапазон размеров можно отнести к так называемой первой глобальной моде оксидных частиц [11].

На графиках кумулятивных массовых функций распределения в диапазоне размеров $1,2 \div 10$ мкм (рис. 2) видно, что при $p = 7,5$ МПа замена азота гелием приводит к изменению массового медианного диаметра с 4,9 до 3,4 мкм. Таким образом, имеются основания предполагать, что путем вариации среды сжигания можно воздействовать на распреде-

ление оксидных частиц. Не следует, однако, переоценивать величину наблюдаемого эффекта, поскольку массовая доля частиц мельче 10 мкм невелика. Например, при $p = 7,5$ МПа массовая доля частиц с $D < 10$ мкм в проведенных экспериментах составляет 0,19 для N_2 и 0,26 для He от массы КПП или 0,03 (N_2) и 0,04 (He) от массы топлива.

Рассмотрим *предполагаемую* физическую картину горения алюминийсодержащей частицы и образования оксида алюминия. Алюминийсодержащую частицу для краткости будем называть Al-частицей, подразумевая, что это может быть как агломерат, так и исходный алюминий. Согласно литературным данным при горении Al-частицы протекают следующие процессы².

1. Пары алюминия с открытой поверхностью (не занятой оксидной нашлепкой) диффундируют от Al-частицы и на некотором расстоянии реагируют с окислителем по парофазному механизму [18]. В результате реакции химической конденсации образуется оксид алюминия Al_2O_3 в конденсированной фазе, частицы которого весьма быстро коагулируют до размеров в десятки нанометров.

2. Расплавленный алюминий реагирует с оксидом нашлепки с образованием газообразных субокислов, например AlO [19, 20]. Субокислы подобно парам алюминия в процессе 1 диффундируют от Al-частицы и доокисляются в газовой фазе с образованием конденсированного оксида Al_2O_3 и последующей коагуляцией оксидных частиц.

Пространственное расположение зоны конденсации (зоны пламени), т. е. ее удаленность от поверхности горящей Al-частицы, определяется процессами тепло- и массопереноса [19, 21]. Коагуляция в процессах 1 и 2 осложнена непрерывно действующим источником вновь образующейся к-фазы. Частицы оксида жидкие, и их столкновение приводит к слиянию. В связи с этим отметим, что для частиц нанометрового размера температура плавления понижается с уменьшением размера частиц вследствие увеличения доли поверхностных атомов. Для частиц оксида алюминия размером 2 нм температура плавления ≈ 2000 К [22] вместо 2300 К для вещества в объеме.

3. В зоне конденсации оксида Al_2O_3 и ее окрестности имеет место «разноскоростная»

²Без учета возможной фрагментации Al-частицы.

коагуляция оксидных частиц. Разность скоростей движения обусловлена как различиями размеров «молодых» и «старых» частиц, достигших разного размера по механизму броуновской коагуляции, так и градиентом скорости газового потока. Градиент скорости газа возникает, в частности, при взаимодействии массового потока от горящей Al-частицы с обтекающим ее газовым потоком. Согласно оценке, приведенной в [23, с. 256], разносторонняя коагуляция существенна для частиц размером $0,1 \div 1$ мкм, а для частиц с $D < 0,01$ мкм преобладает броуновская коагуляция, поскольку мелкие частицы быстро ускоряются газовым потоком.

Процессы 1–3 приводят к тому, что в окрестности горящей Al-частицы происходят массовое образование оксидных частиц и их рост, вследствие чего наблюдается характерный ореол, а в условиях обдува — дымовой шлейф.

4. На открытой поверхности алюминия идет гетерогенная реакция. При этом образуются отдельные островки оксида Al_2O_3 , которые впоследствии объединяются с «главной» нашлепкой.

5. Часть паров алюминия не успевает диффундировать от Al-частицы и реагирует в непосредственной близости от нее (по терминологии [24] — «парофазная реакция на окисленной поверхности»). Образующийся оксид Al_2O_3 также идет на рост нашлепки.

В соответствии с описанными представлениями образование оксидных частиц первой моды, т. е. субмикронных или размером порядка 1 мкм (в настоящей работе $1,2 \div 1,9$ мкм), можно связать с процессами 1–3, а образование мод с размером единиц и/или десятков микрометров — с процессами 4, 5. Оксидная частица в этом случае является результатом трансформации нашлепки в сферу после полного выгорания алюминия [25–27]. В настоящей работе смешение продуктов горения образца с инертным газом (замораживание) проводили вблизи поверхности топлива, так что полностью сгореть успевали только самые мелкие Al-частицы. Поэтому наблюдаемые моды $3,0 \div 3,9$ и $6,4 \div 8,2$ мкм, возможно, обусловлены сгоранием неагломерировавших частиц алюминия.

Массовый вклад каждого из процессов 1–5 в формирование дисперсной фазы зависит от множества факторов — температуры, давле-

ния, скорости и реакционной способности окружающего газа, от размера Al-частицы и т. д. В качестве предельных случаев приведем два примера. При сжигании 3-миллиметровых Al-частиц в холодном воздухе остаток горения представлял собой полую сферическую толстостенную оксидную частицу с отверстием-кратером [28]. В условиях, моделирующих ракетный двигатель ($p = 2,5$ МПа, среда — продукты горения топлива, состоящего из перхлората аммония и связующего на основе полибутадиенового каучука с концевыми гидроксильными группами), Al-частицы размером 106 мкм полностью сгорали с образованием мелкодисперсного оксида [29].

Сопоставляя описанную физическую картину образования дисперсного оксида и полученные экспериментальные данные, приходим к заключению, что среда сжигания влияет главным образом на формирование оксидных частиц первой моды, образование которых контролируется процессами конденсации и коагуляции. По литературным данным первая мода массового распределения оксидных частиц обычно располагается в диапазоне $0,1 \div 3$ мкм (максимум в районе $0,2 \div 1,7$ мкм) и смещается в сторону больших размеров частиц при увеличении времени пребывания частиц в пламени [9, 18, 30, 31]. К сожалению, использованный в настоящей работе метод гранулометрического анализа не дает информации о распределении частиц размером $D < 1,2$ мкм. Поэтому наблюдаемое при замене азота гелием увеличение массовой доли частиц размером $1,2 \div 10$ мкм (см. рис. 2) может быть обусловлено, в частности, входением правого хвоста первой моды оксидных частиц в регистрируемый диапазон размеров в результате смещения моды вправо при вариации условий экспериментов. Отсутствие данных в области $D < 1,2$ мкм ограничивает возможность трактовки полученных результатов. Тем не менее можно высказать некоторые общие соображения относительно конденсации и коагуляции.

В [32] теоретически исследовано влияние несущего газа на гомогенную конденсацию паров цинка в рамках классической кинетической теории жидкостей [33]. Основные допущения этой теории следующие: процесс зародышеобразования не зависит от давления и движения капель; капли, достигшие некоторого критического размера, могут существовать и укрупняться в потоке. Показано, что несущий газ

выступает в роли приемника тепла, выделяющегося в результате конденсации. Поэтому чем больше удельная теплоемкость несущего газа, тем быстрее идут охлаждение потока и накопление конденсата. Удельная теплоемкость гелия вследствие его меньшей молярной массы существенно выше, чем у азота (соответственно 5,20 и 1,04 кДж/(кг·К) при температуре 273 К и атмосферном давлении [34]).

Работа [32] дает общую идею о роли среды сжигания как аккумулятора тепла, и с этой точки зрения замену азота гелием можно считать фактором, усиливающим конденсацию и приводящим к более быстрому появлению и укрупнению частиц оксида. Очевидно, однако, что в случае горения небольшого образца металлизированного топлива в лабораторной установке влияние среды сжигания может проявляться в процессе гашения, когда горящая Al-частица оказывается в зоне, где продукты горения топлива в достаточной мере разбавлены окружающим газом. В качестве гасящего агента гелий представляется более эффективным, чем азот. Для достаточно мелких и хорошо теплопроводящих (по сравнению с окружающим газом) частиц характерное время остывания обратно пропорционально теплопроводности газа [35, с. 56; 36, с. 86]. Теплопроводности азота и гелия при температуре 300 К и атмосферном давлении равны соответственно 0,026 и 0,152 Вт/(м·К) и слабо зависят от давления [34]. Поэтому с точки зрения эффективности замораживания горящих частиц замену азота гелием следует считать фактором, подавляющим или ограничивающим конденсацию.

При определении характеристик дисперсной фазы методом отборов коагуляция частиц в характерном ореоле и следе горящего агломерата, а также во всем объеме бомбы является важным фактором, воздействующим на распределение частиц КПП, в том числе оксидных частиц [37]. Роль коагуляции двойственна. С одной стороны, коагуляция выступает как существенная черта процесса горения Al-частицы. Именно вследствие конденсации и коагуляции образуется «оксидный дым», выделяемый горячей Al-частицей в окружающее пространство. С другой стороны, коагуляция трансформирует характеристики дисперсной фазы до момента фиксации этих характеристик и вследствие этого препятствует получению объективной информации о дисперсной фазе, образуемой непосредственно горячей Al-

частицей.

Следует заметить, что в рамках данной работы предполагается, что эффекты, связанные с коагуляцией уже отобранных частиц, несущественны. Для подтверждения этого предположения необходимы дальнейшие специальные исследования.

Влияние среды сжигания на коагуляцию частиц в лабораторной бомбе, предназначенной для отборов, — лишь частный вопрос общей проблемы объективной оценки роли коагуляции в процессах, происходящих в ракетном двигателе. Сложность этой проблемы обусловлена существенной пространственно-временной неоднородностью условий, в которых протекает коагуляция частиц. Для решения проблемы необходимо уметь оценивать характерные времена коагуляции в зависимости от концентрации частиц, температуры и физических свойств среды и других параметров. К сожалению, экспериментальные данные о коагуляции частиц оксида алюминия ограничены. Существующие же теоретические модели построены для описания коагуляции в упрощенных модельных условиях и малоприменимы для таких оценок.

Таким образом, простейшие качественные рассуждения приводят к заключению о неоднозначном влиянии замораживающего газа (среды сжигания) на распределение оксидных частиц по размерам. Для понимания этого влияния необходимы экспериментальные данные о распределении частиц в области размеров менее 1,2 мкм; о взаимодействии горящего агломерата с газовой средой переменного состава, изменяющегося от продуктов горения топлива до газа-разбавителя; о закономерностях коагуляции оксидных частиц в различных условиях, в том числе в различных средах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Средние размеры агломератов, отобранных при сжигании в азоте при $p = 0,6; 4,0; 7,5$ МПа систематически превышают соответствующие средние размеры агломератов, отобранных при аналогичных условиях в гелии. Различие, однако, невелико и зачастую не превышает экспериментальной погрешности. Влияние среды сжигания на содержание непрореагировавшего алюминия в агломератах незначительно (различие в результатах также практически в пределах погрешности эксперимента). При проведении сравнительных испыта-

ний разных топлив рекомендуется использовать один и тот же газ.

В распределениях оксидных частиц, отобранных при сжигании в азоте и гелии, в диапазоне размеров $1,2 \div 60$ мкм имеются отличия, усиливающиеся с давлением. В частности, в случае отборов в гелии масса частиц больше в интервале размеров $1,2 \div 2,4$ мкм. Таким образом, среда сжигания может оказывать влияние на первую моду в распределении по размерам оксидных частиц (характерный диапазон $D = 0,1 \div 3$ мкм с максимумом в районе $D = 0,5 \div 1$ мкм). Это обстоятельство следует принимать во внимание при сравнении данных, полученных с использованием разных газов. Кроме того, вариацию среды сжигания можно рассматривать как способ воздействия на распределение отбираемых оксидных частиц.

Автор выражает глубокую благодарность Т. Д. Федотовой, А. Г. Кирьяновой, О. Н. Житницкой и А. В. Сапрыкину за помощь в проведении химического и гранулометрического анализов, а также В. Е. Зарко, В. В. Карасеву, С. Э. Пашенко и В. А. Бабуку за содержательные дискуссии.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Иванов Н. Н., Иванов А. Н.** Приборы и установки контактной диагностики и их использование в исследовании высокотемпературных двухфазных потоков // *Физика горения и взрыва*. 1991. Т. 27, № 6. С. 87–101.
2. **Левашенко Г. И., Бахир Л. П.** Способ отбора частиц, образующихся при горении металлизированных конденсированных систем в камере постоянного давления // *Физика горения и взрыва*. 1973. Т. 9, № 2. С. 330–331.
3. **Бабук В. А., Белов В. П., Шелухин Г. Г.** Особенности горения частиц алюминия в составе смесевых конденсированных систем при низких и высоких давлениях // *Физика горения и взрыва*. 1981. Т. 17, № 3. С. 26–31.
4. **Самбамурти Дж. К., Прайс Е. В., Сигмен Р. К.** Агломерация алюминия при горении смесевых твердых ракетных топлив // *Аэрокосм. техника*. 1985. Т. 3, № 1. С. 65–81.
5. **Braithwaite P. C., Christensen W. N., Daugherty V.** Quench bomb investigation of aluminum oxide formation from solid rocket propellants (pt I): Experimental methodology // 25th JANNAF Combustion Meeting (Huntsville, AL), Chemical Propulsion Information Agency, Johns Hopkins Univ., Applied Physics Lab., CPIA-Pub-498-VI, Laurel, MD, 1988. P. 175–184.
6. **Tai-Kang Liu, Huey-Cherng Perng, Song-Ping Luh, Fang Liu.** Aluminum agglomeration in AP/RDX/Al/HTPB propellant combustion // AIAA Paper N 91-1870. 1991. P. 1–11.
7. **Глотов О. Г., Зырянов В. Я.** Конденсированные продукты горения алюминизированных топлив. I. Методика исследования эволюции частиц дисперсной фазы // *Физика горения и взрыва*. 1995. Т. 31, № 1. С. 74–80.
8. **Glotov O. G., Zyryanov V. Ya.** The effect of pressure on characteristics of condensed combustion products of aluminized solid propellants // *Archivum Combust.* 1991. V. 11, N 3/4. P. 251–262.
9. **Федоров Б. Н., Плечов Ю. Л., Тимохин Э. М.** Исследование дисперсности частиц окиси алюминия в продуктах сгорания конденсированных веществ // *Физика горения и взрыва*. 1982. Т. 18, № 1. С. 22–27.
10. **Glotov O. G.** The effect of environment (N_2 or He) on the size distribution of condensed combustion products of aluminized solid propellant // *Chemical Gasdynamics and Combustion of Energetic Materials*. Tomsk, 1995. Intern. Workshop TW95: Book of Abstracts. Report 4.10. P. 92–93.
11. **Глотов О. Г.** Конденсированные продукты горения алюминизированных топлив. II. Эволюции частиц при удалении от поверхности горения // *Физика горения и взрыва*. 2000. Т. 36, № 4. С. 66–78.
12. **Fedotova T. D., Glotov O. G., Zarko V. E.** Chemical analysis of aluminum as a propellant ingredient and determination of aluminum and aluminum nitride in condensed combustion products // *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*. 2000. V. 25, N 6. P. 325–332.
13. **Итоги науки и техники.** Сер. Порошковая металлургия. Т. 4 / Под ред. Л. А. Петровой. М.: ВИНТИ, 1990.
14. **Карагедов Г. Р., Ляхов Н. З.** Получение и спекание нанокристаллического порошка $\alpha-Al_2O_3$ // *Химия в интересах устойчивого развития*. 1999. № 7. С. 229–238.
15. **Vorozhtsov A. B., Sal'ko A. E., Bondarchuk S. S.** Obtainment of aluminum oxide in course of large solid propellant charges incineration // *Chemical Gasdynamics and Combustion of Energetic Materials*. Tomsk, 1995. Intern. Workshop TW95: Book of Abstracts. Report 4.5. P. 87.
16. **Biryukov Yu., Vorozhtsov A., Bogdanov L.** Obtaining submicron abrasive powders by pneumatic processing of electric corundum and products of solid rocket propellant combustion // *Energetic Materials: Productions, Processing and Characterization*. 1998. 29th Intern. Annual Conf. of ICT, Karlsruhe, Germany. Report 162. P. 1–9.
17. **Иванов Н. Н., Иванов А. Н.** Способ получения порошка оксидов // *Физика горения и взрыва*. 1994. Т. 30, № 2. С. 64–71.

18. Бахир Л. П., Левашенко Г. И., Таманович В. В. Влияние химического состава металлизированных топлив на дисперсный состав, оптические характеристики частиц окислов и излучательную способность пламени // Физика горения и взрыва. 1980. Т. 16, № 6. С. 10–16.
19. Bucher P., Ernst L., Dryer F. L. et al. Detailed studies on the flame structure of aluminum particle combustion // Solid Propellant Chemistry, Combustion, and Motor Interior Ballistics / Ed. by V. Yang, T. B. Brill, Wu-Zhen Ren. (Progress in Astronautics and Aeronautics; V. 185). Reston, VA: AIAA Inc., 2000. Ch. 2.19. P. 689–722.
20. Бабук В. А., Васильев В. А., Романов О. Я. и др. Физико-химические превращения каплей Al — Al₂O₃ в активном газовом потоке // Физика горения и взрыва. 1993. Т. 29, № 3. С. 129–133.
21. Dreizin E. L. Experimental study of aluminum particle flame evolution in normal and microgravity // Combust. Flame. 1999. V. 116. P. 323–333.
22. Wu M. K., Windeler R. S., Steiner C. K. R. et al. Controlled synthesis of nanosized particles by aerosol processes // Aerosol Sci. Technol. 1993. V. 19. P. 527–548.
23. Райст П. Аэрозоли. Введение в теорию. М.: Мир, 1987.
24. Малинин В. И., Коломин Е. И., Антипин И. С. Особенности горения частицы алюминия в потоке активных газов // Физика горения и взрыва. 1999. Т. 35, № 1. С. 41–48.
25. Duterque J. Experimental studies of aluminum agglomeration in solid rocket motors // 4th Intern. Symp. on Special Topics in Chemical Propulsion. 1996. Stockholm, Sweden. ONERA TP 1996-48. Доступно в Internet по адресу: http://www.onera.fr/RECH/BASIS/public/web_fr/document/DDD/243366.pdf
26. Dupays J., Fabignon Y., Orlandi O., Trubert J. F. Combustion of aluminum particles in solid rocket motors // ODAS 2000 — 2nd ONERA-DLR Aerospace Symp. 2000, Berlin, Germany. ONERA TP 2001-8. Доступно в Internet по адресу: http://www.onera.fr/SEARCH/BASIS/public/web_en/document/DDD/308073.pdf
27. Price E. W., Sigman R. K. Combustion of aluminized solid propellants // Solid Propellant Chemistry, Combustion, and Motor Interior Ballistics / Ed. by V. Yang, T. B. Brill, Wu-Zhen Ren. (Progress in Astronautics and Aeronautics; V. 185). Reston, VA: AIAA Inc., 2000. Ch. 2.18. P. 663–687.
28. Смелков Г. И., Александров А. А., Пехотников В. А., Гришин Е. В. Некоторые аспекты горения крупных алюминиевых частиц в воздушном потоке // Физика горения и взрыва. 1978. Т. 14, № 5. С. 33–37.
29. Melcher J. C., Burton R. L., Krier H. Combustion of aluminum particles in solid-rocket motor flows // Solid Propellant Chemistry, Combustion, and Motor Interior Ballistics / Ed. by V. Yang, T. B. Brill, Wu-Zhen Ren. (Progress in Astronautics and Aeronautics; V. 185). Reston, VA: AIAA Inc., 2000. Ch. 2.20. P. 723–747.
30. Гусаченко Е. И., Фурсов В. П., Шевцов В. И. и др. Особенности формирования агломератов при горении смесевых композиций // Физика аэродисперсных систем. Вып. 21. Киев; Одесса: Вища школа, 1981. С. 62–66.
31. Бахир Л. П., Левашенко Г. И. Исследование размеров каплей окиси алюминия вблизи горячей поверхности топлива // Физика горения и взрыва. 1973. Т. 6, № 8. С. 842–849.
32. Чмилевски, Шерман. Влияние несущего газа на гомогенную конденсацию в сверхзвуковом сопле // Ракетная техника и космонавтика. 1970. Т. 8, № 4. С. 225–231.
33. Френкель Я. И. Кинетическая теория жидкостей. Л.: Наука, 1975.
34. Физические величины: Справочник / Под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991.
35. Стронгин М. П. Математическое моделирование потоков в высокотемпературных технологиях. Новосибирск: Изд-во Новосибирск. ун-та, 1989.
36. Сборник задач по теории горения / Под ред. В. В. Померанцева. Л.: Энергоатомиздат, 1983.
37. Babuk V. A., Vasilyev V. A., Malakhov M. S. Condensed combustion products at the burning surface of aluminized solid propellant // J. Propulsion and Power. 1999. V. 15, N 6. P. 783–793.

*Поступила в редакцию 24/X 2000 г.,
в окончательном варианте — 24/V 2001 г.*