

## КОНДЕНСИРОВАННЫЕ ПРОДУКТЫ ГОРЕНИЯ АЛЮМИНИЗИРОВАННЫХ ТОПЛИВ.

### II. ЭВОЛЮЦИЯ ЧАСТИЦ ПРИ УДАЛЕНИИ ОТ ПОВЕРХНОСТИ ГОРЕНИЯ

О. Г. Глотов

Институт химической кинетики и горения СО РАН, 630090 Новосибирск

Методом отборов исследованы конденсированные продукты горения модельного топлива на основе перхлората аммония и алюминия. Определен гранулометрический состав продуктов горения и содержание металлического алюминия в частицах с размерами от 1,2 мкм до максимального в диапазоне давлений  $0,6 \div 7,5$  МПа на расстоянии от поверхности горения до 190 мм. Обнаружена многомодовая структура массовых распределений оксидных частиц в диапазоне размеров  $1,2 \div 40$  мкм. Получена эмпирическая зависимость выгорания металлического алюминия из совокупности агломератов от времени пребывания частиц в струе продуктов горения топливного образца.

#### ВВЕДЕНИЕ

Целесообразность и эффективность использования алюминия в составе твердого топлива для ракетного двигателя определяется не только реализацией тепловыделения при сгорании алюминия, но и характеристиками образующихся при этом конденсированных продуктов горения (КПГ). Демпфирование колебаний газа в камере сгорания, двухфазные потери удельного импульса, отложение шлаков в двигателе, эрозия соплового блока, оптические характеристики выхлопного факела, экологические последствия работы ракетного двигателя — вот далеко не полный перечень процессов и явлений, так или иначе связанных с характеристиками КПГ. Для математического моделирования перечисленных процессов необходима экспериментальная информация о гранулометрическом и химическом составе КПГ, получение которой является целью настоящей работы.

Склонность алюминия к агломерации приводит к тому, что в двухфазном потоке продуктов горения топлива в общем случае присутствуют агломераты, размеры которых существенно превосходят размеры исходных частиц алюминия в топливе; неагломерировавшие частицы с размером, близким к исходному; оксидные частицы, размер которых варьируется от десятых долей до десятков микрометров [1–3] в зависимости от механизма их образования. В настоящее время экспериментально установлено, что для большинства алюминизированных топлив распределение массы конденсированных продуктов горения по размерам имеет

многомодовый вид, схематически изображенный на рис. 1. Обычно «глобальную» моду 1 в диапазоне размеров  $D = 0,3 \div 2$  мкм связывают с конденсацией паров оксидов на зародышах в пламени (парофазный механизм) [4]. «Глобальную» моду 2 в диапазоне  $D = 4 \div 8$  мкм связывают с конденсацией оксидов на поверхности горячей алюминийсодержащей частицы и с коагуляцией оксидных частиц в окрестности горячей частицы. Частицы КПГ с  $D > 30 \div 100$  мкм — глобальная «мода» 3 — считают агломератами, состоящими в основном из алюминия и оксида алюминия; здесь термин «мода» условный, поскольку распределение агломератов по размерам зачастую само является многомодовым [5]. Заметим, что при определенных условиях (будь то особенности рецепту-

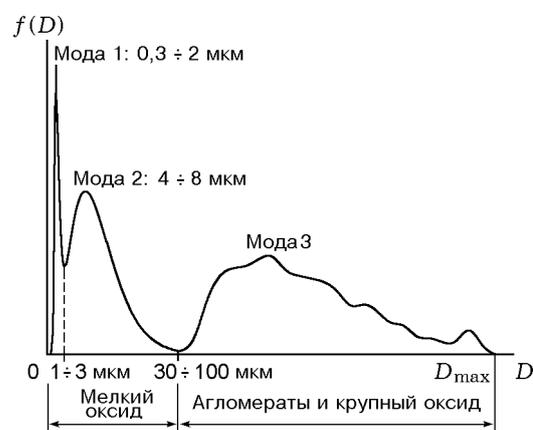


Рис. 1. Качественный характер распределения конденсированных продуктов горения алюминизированных топлив по размерам

ры топлива либо достаточно длительное время пребывания агломератов в пламени) в результате полного выгорания алюминия из агломератов образуются так называемые «крупные» оксидные частицы, обычно имеющие размер в десятки микрометров и также попадающие в моду 3 [6]. Кроме того, для топлив со слабо выраженной агломерацией в моде 2 возможно наличие значительного количества непрореагировавшего алюминия [7].

Как видно из обзора [8], в большинстве работ, посвященных исследованию характеристик КПП, применяют контактные методики, позволяющие отбирать и анализировать либо частицы оксида (моды 1 и 2) [9, 10], либо агломераты (мода 3) [11–15]. Вместе с тем очевидно, что при изучении эволюции КПП, происходящей по мере удаления частиц от поверхности горения топлива, желательнее одновременно следить как за изменением массы, размеров и химического состава агломератов, так и за динамикой массового распределения оксидных частиц, образующихся в процессе выгорания алюминия из агломератов. Для этого необходимо определять характеристики КПП во всем диапазоне размеров. Для решения этой задачи служат методики, в которых отбирают и анализируют всю массу конденсированных продуктов, образовавшихся при горении небольшого образца топлива [6, 16–20]. Эта идея — сбор всех частиц КПП — положена в основу методики [21], применяемой в данной работе. Установка [21] не имеет принципиальных ограничений на размер отбираемых частиц. Однако, вследствие использования для гранулометрического анализа мелких частиц прибора «Малверн-3600Е», фактический диапазон размеров анализируемых частиц был от 1,2 мкм до максимального. Иными словами, в работе исследованы фрагменты «полных» распределений КПП, включающие частицы 2-й и 3-й глобальной моды (см. рис. 1). Согласно оценке [21] для типичных топлив массовая доля частиц размером  $D < 1,2$  мкм, не попадающих в рассматриваемый диапазон, не превышает 5 % от всей массы КПП, так что их отсутствие практически не влияет на вид и характеристики массового распределения частиц в рассматриваемом диапазоне размеров.

### УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В работе представлены результаты гранулометрического и химического анализа кон-

денсированных продуктов горения модельного смесового топлива, содержащего перхлорат аммония (ПХА), энергетическое связующее и 23,4 % алюминия. В соответствии с классификацией [5] исследуемое топливо относится к конденсированным системам класса А, характерной особенностью которых является подповерхностное гетерогенное горение алюминия (в каркасном слое). Эксперименты проведены по методике [21]. Образцы топлива диаметром 6 мм и высотой  $\approx 7$  мм сжигали в азоте при давлениях  $p = 0,6; 2,0; 4,0$  и  $7,5$  МПа. Расход азота был  $1,4$  г/с в экспериментах при  $p = 0,6$  МПа и  $3,4$  г/с в остальных случаях. При каждом значении давления варьировали длину охранной трубки ( $L_T = 0, 10, 86$  и  $190$  мм) с целью получения данных об эволюции КПП при удалении от поверхности горения. Образцы топлива были плотно вставлены в стаканчики из оргстекла, игравшие роль бронировки. В экспериментах без охранной трубки ( $L_T = 0$ ) поверхность топлива до сжигания была расположена заподлицо со стенками стаканчика. Внутренний диаметр стаканчиков, внутренний диаметр охранной трубки и диаметр образцов были одинаковы.

### ТРАНСФОРМАЦИЯ МАССОВЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ЧАСТИЦ КПП ПРИ ВАРИАЦИИ УСЛОВИЙ СЖИГАНИЯ

На рис. 2 представлены распределения массы частиц КПП в диапазоне размеров от 1,2 мкм до максимального, полученные при наименее и наиболее благоприятных с точки зрения выгорания алюминия экспериментальных условиях: рис. 2,а — эксперименты без охранной трубки при низком давлении, рис. 2,б — эксперименты при максимальной длине охранной трубки и высоком давлении. Неполнота сгорания алюминия  $\eta_s$ , определяемая как отношение массы алюминия в отобранных частицах к массе алюминия в топливе, составляет соответственно 0,05 и 0,15. По оси ординат отложена величина  $f$ , определенная как частное от деления массы КПП в некотором интервале размеров на ширину интервала и массу топлива, т. е. плотность распределения относительной массы КПП по размерам. При линейном масштабе по оси абсцисс площадь под гистограммой пропорциональна массе частиц в заданном интервале размеров [21].

В обоих случаях (рис. 2,а и 2,б) распределения соответствуют типичному для алюми-

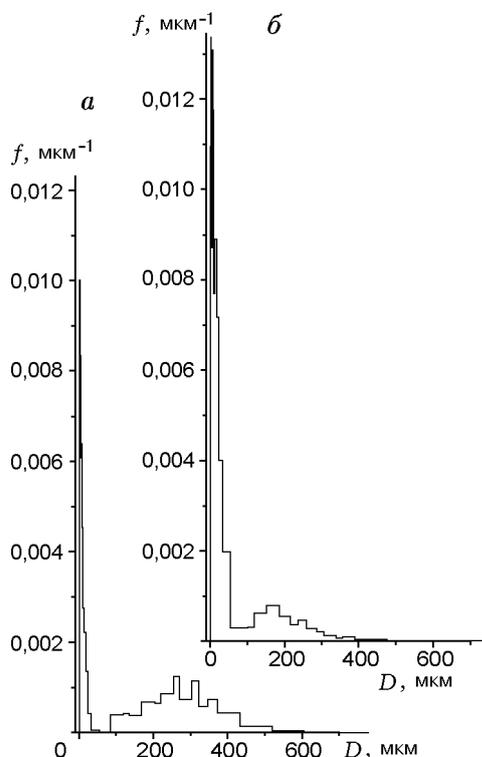


Рис. 2. Трансформация массовых распределений конденсированных продуктов горения в диапазоне размеров  $1,2 \text{ мкм} < D < D_{\text{max}}$  при изменении неполноты сгорания алюминия посредством вариации условий сжигания:

*a* —  $\eta_s = 0,15$ ,  $p = 0,6 \text{ МПа}$ ,  $L_T = 0$ ; *b* —  $\eta_s = 0,05$ ,  $p = 7,5 \text{ МПа}$ ,  $L_T = 190 \text{ мм}$

низированных топлив виду, схематически показанному на рис. 1. Характерные особенности распределений — полидисперсность, т. е. большой диапазон вариации размеров частиц (имеются частицы с  $D > 500 \text{ мкм}$ ), а также естественное разбиение на два участка, разделенных локальным минимумом в районе  $D = 60 \div 100 \text{ мкм}$  и содержащих сопоставимые массы КПП. Результаты химического анализа показывают, что во всех проведенных экспериментах содержание металлического алюминия в ситовых фракциях КПП мельче  $40 \text{ мкм}$  составляет  $0,5 \div 1,5 \%$ . Это соответствует традиционным представлениям: диапазон размеров слева от минимума относится в основном к оксидным частицам, а справа от минимума — к агломератам, состоящим из алюминия и оксида. Характеристики оксидных частиц ( $D < 60 \text{ мкм}$ ) и агломератов ( $D > 60 \text{ мкм}$ )

будут рассмотрены ниже.

Сравнивая вид распределений на рис. 2, *a* и 2, *b*, видим, что выгорание алюминия из агломератов приводит к уменьшению массы частиц-агломератов и сопровождается уменьшением размера агломератов и накоплением оксидных частиц.

### ОКСИДНЫЕ ЧАСТИЦЫ В КПП И МЕХАНИЗМЫ ОБРАЗОВАНИЯ ДИСПЕРСНОГО ОКСИДА

Проанализируем распределение частиц в диапазоне размеров  $1,2 \div 60 \text{ мкм}$ , привлекая опубликованные данные об оксидных частицах, образующихся при горении топлив на основе ПХА и алюминия. Согласно рис. 1 указанный диапазон соответствует 2-й глобальной моде КПП, в которой сосредоточена основная масса частиц оксида, т. е. дисперсного оксида.

Для детального анализа массовых распределений КПП в области малых размеров частиц функции распределения представляли в логарифмическом масштабе по оси абсцисс (при этом, однако, площадь под кривой уже не пропорциональна массе). Примеры таких распределений приведены на рис. 3. В условиях данных экспериментов ( $p = 0,6 \div 7,5 \text{ МПа}$ ,  $L_T = 0 \div 190 \text{ мм}$ ) в диапазоне размеров  $1,2 \div$

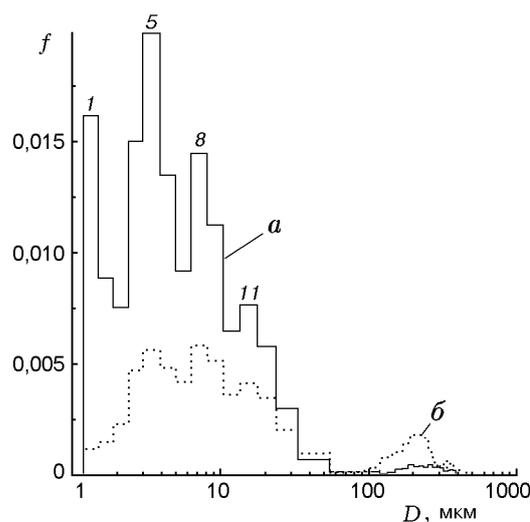


Рис. 3. Многомодовая структура массовых распределений оксидных частиц в диапазоне размеров  $1,2 < D < 60 \text{ мкм}$ :

цифры соответствуют номерам каналов гистограммы «Малверн-3600Е»; *a* —  $p = 2,0 \text{ МПа}$ ,  $L_T = 190 \text{ мм}$ ; *b* —  $p = 4,0 \text{ МПа}$ ,  $L_T = 10 \text{ мм}$

Таблица 1

Средние размеры  $D_{mn}$  частиц КПГ, вычисленные в диапазоне размеров 1,2 ÷ 60 мкм

$p$ , МПа	$L_T$ , мм	$D_{mn}$ , мкм						
		$D_{10}$	$D_{20}$	$D_{30}$	$D_{21}$	$D_{32}$	$D_{43}$	$D_{53}$
0,6	0	2,4	2,8	3,5	3,3	5,4	9,8	12,5
0,6	10	2,8	3,6	5,1	4,7	10,2	20,7	25,3
0,6	86	2,8	3,5	4,9	4,5	9,4	19,4	23,9
0,6	190	2,6	3,3	4,5	4,2	8,7	17,8	22,1
2,0	0	2,4	3,0	4,2	3,8	8,4	18,5	23,1
2,0	10	2,8	3,4	4,3	4,1	7,3	14,4	18,6
2,0	86	2,4	2,9	4,0	3,7	7,2	14,7	18,7
2,0	190	2,3	2,8	3,9	3,5	7,2	14,6	18,4
4,0	0	2,4	2,9	3,8	3,5	6,9	16,8	22,4
4,0	10	3,1	4,0	5,5	5,2	10,5	19,7	23,9
4,0	86	2,2	2,7	3,8	3,4	7,3	16,4	20,9
4,0	190	2,4	2,9	4,0	3,5	7,5	18,5	24,0
7,5	0	2,3	2,9	4,2	3,6	9,0	22,3	27,5
7,5	10	2,5	3,2	4,3	4,0	7,8	15,4	19,4
7,5	86	2,4	3,0	4,1	3,7	7,8	16,5	21,0
7,5	190	2,4	3,2	4,6	4,2	9,4	18,9	23,2

60 мкм на массовых распределениях частиц КПГ можно различить четыре локальных максимума — в интервалах 1,2 ÷ 1,5; 3,0 ÷ 3,9; 6,4 ÷ 8,2; 13,8 ÷ 17,7 мкм, что соответствует 1, 5, 8 и 11-му каналам гистограммы гранулометра «Малверн-3600Е», применявшегося для анализа фракций частиц с  $D < 80$  мкм в режиме с максимальным разрешением. Наиболее выраженный («главный») пик в большинстве случаев находится в интервале  $D = 3,0 ÷ 3,9$  мкм (5-й канал гистограммы). В отдельных случаях этот пик имеет несколько большую ширину и расположен в 4-м и 5-м каналах, т. е. в диапазоне  $D = 2,4 ÷ 3,9$  мкм. Заметим, что эти характеристики распределений зависят от разрешающей способности метода анализа (в данном случае гранулометра «Малверн»).

Обратимся теперь к данным других работ.

В [22] при сжигании топлива с 15 % алюминия АСД-1 при  $p = 4,0$  МПа в соответствующем диапазоне размеров зарегистрирована одна мода, положение которой совпадает с положением «главного» пика в распределениях, полученных в настоящей работе. При этом ширина интервалов размеров гистограмм в [22] была достаточно мала (0,64 мкм при счете частиц с  $D > 0,6$  мкм), чтобы обнаружить другие моды в случае их наличия. При увеличении длины охранной трубки ( $L_T = 0, 30, 60$  мм) эта мода смещалась в сторону больших размеров ча-

стиц, занимая соответственно положения 3,6; 3,9; 4,3 мкм (сделан пересчет от частиц в пламени к «холодным» частицам). Авторы [22] полагают, что наиболее вероятный механизм образования частиц локальной моды в интервале  $D = 3,6 ÷ 4,3$  мкм — «химическая конденсация, обусловленная гетерогенной реакцией доокисления парообразных окислов алюминия до жидкой окиси алюминия на поверхности капель».

В распределениях, полученных в данной работе, при вариации условий экспериментов местоположение локальных максимумов — мод — неизменно, однако меняется соотношение их амплитуд (см. рис. 3). При этом средние размеры  $D_{mn}$ , вычисленные в диапазоне 1,2 ÷ 60 мкм, изменяются незначительно. При вариации длины охранной трубки от 0 до 190 мм монотонной зависимости  $D_{mn}$  не наблюдается (табл. 1).

Следует заметить, что в [22] горение алюминия полностью завершалось даже в экспериментах без охранной трубки, поэтому авторы [22] считают, что укрупнение частиц в пламени с течением времени происходит «исключительно за счет слияния капель при столкновениях». В нашей работе в продуктах горения имеются крупные агломераты, выгорание которых заметно даже на расстоянии 86 ÷ 190 мм от поверхности горения, при этом движущие-

ся горящие агломераты непрерывно производят дисперсный оксид. По-видимому, в этом состоит основное отличие в условиях образования и эволюции оксидных частиц в [22] и в данной работе.

Соответственно, сравнение данных [22] следует проводить с теми данными настоящей работы, которые получены в условиях «замедленного» горения агломератов. Поскольку интенсивность горения агломератов (и образования дисперсного оксида) снижается по мере выгорания алюминия, такие условия связаны с глубоким выгоранием алюминия и реализуются при высоком давлении и длинной охранной трубке. Как видно из табл. 1, при  $p = 4,0$  и  $7,5$  МПа смена длины охранной трубки с 86 на 190 мм приводит к увеличению средних размеров. Например, при  $p = 7,5$  МПа  $D_{30}$  возрастает с 4,1 до 4,6 мкм. По существу, как по нашим данным, так и по данным работы [22], полученным в сопоставимых экспериментальных условиях, увеличение времени пребывания частиц в пламени посредством использования охранной трубки большей длины приводит к возрастанию «в среднем» размера оксидных частиц в рассматриваемом диапазоне размеров.

Важно заметить, что распределения отобранных оксидных частиц в обоих случаях демонстрируют определенное сходство (по положению главной моды и провала между модами), хотя и отличаются в деталях. Здесь уместно добавить, что в экспериментах со слабоагломерирующим топливом, содержащим 5 % алюминия узкой ситовой фракции  $60 \div 80$  мкм, при  $p = 4,0$  МПа и тех же длинах охранной трубки (10, 86 и 190 мм) мы получали распределения оксидных частиц, аналогичные приведенным на рис. 3.

В случае горящих алюминийсодержащих частиц, в частности агломератов, одновременное протекание процессов химической конденсации и коагуляции в окрестности частицы, по-видимому, является основным механизмом «доставки» массы оксидных частиц во 2-ю глобальную моду в районе  $2 \div 6$  мкм (см. рис. 1) или в «главный» пик, расположенный в интервале  $2,4 \div 3,9$  мкм. Для удобства дальнейшего рассмотрения присвоим этому механизму номер 1.

В [10] исследованы оксидные частицы, образующиеся при горении топлив, содержащих  $1 \div 18$  % алюминия АСД-4. По времени пребы-

вания частиц в пламени условия отбора в [10] соответствовали экспериментам [22] при длинах охранной трубки  $0 \div 30$  мм. Авторы [10] отмечают, что в экспериментах с топливами, содержащими  $10 \div 18$  % алюминия, при  $p = 3,0$  и  $7,5$  МПа «распределения носят неустойчивый характер без ярко выраженных максимумов (в отличие от работы [22])». В [10] проведена аппроксимация экспериментальных функций распределения в виде суммы четырех нормальных распределений. Примечательно, что выявленные в результате такой обработки моды-составляющие в ряде случаев совпадают с локальными модами, зарегистрированными в настоящей работе. Так, например, для топлива с 18 % алюминия и давлением 7,3 МПа в результате обработки получены следующие моды: 1,67; 1,86; 4,54; 7,11 мкм. При этом надо иметь в виду, что экспериментальные гистограммы в [10] имели ширину интервалов 0,64 мкм, так что погрешность приведенных значений может быть оценена величиной  $\pm 0,32$  мкм.

Авторы [10] предполагают возможность существования пяти механизмов образования оксидных частиц и соответственно пяти мод на функции распределения оксида по размерам. Ожидается, что размеры частиц, образовавшихся по разным механизмам, будут близки между собой и в действительности максимумов будет меньше. Следуя [10], приведем эти механизмы и размеры порождаемых частиц, продолжая начатую нумерацию:

- 2) сброс с частицы оксидной пленки, накопленной в процессе гетерогенной реакции, при переходе к парофазному горению, с образованием единственной оксидной частицы ( $D \leq 15$  мкм);
- 3) аналогичный процесс с фрагментацией, т. е. с образованием нескольких оксидных частиц ( $D \approx 2 \div 3$  мкм);
- 4) парофазное горение алюминия в окрестности частицы ( $D \approx 1$  мкм);
- 5) конденсация продуктов парофазного горения на поверхности частицы ( $D \leq 3 \div 4$  мкм);
- 6) аналогичный процесс на недогоревшей из-за недостатка окислителя металлической частице ( $D \leq 5$  мкм).

В [18] исследовали топлива с 5, 20 и 30 % монодисперсного алюминия с размером

частиц 48 мкм. Образцы топлива сжигали при  $p = 8,0$  МПа и определяли распределение частиц КПП по размерам в диапазоне от 0,5 мкм до максимального ( $100 \div 1000$  мкм). Особенности топлив и методики отборов [18] были таковы, что алюминий из агломератов полностью выгорал, так что отобранные частицы представляли собой оксид алюминия двух мод. По мнению авторов [18], частицы левой моды с размером  $\approx 1$  мкм образуются по парофазному механизму (механизм 4 в принятой нумерации), а правая мода образуется вследствие накопления оксида на поверхности горящих частиц. Для топлива с 5 % алюминия (слабая агломерация) размер частиц правой моды был близок к размеру частиц металла, заложенного в топливо. При увеличении содержания алюминия в топливе левая мода почти не изменялась, а правая мода по мере усиления агломерации становилась шире и смещалась вправо. Этот факт позволяет предположить, что частицы правой моды появлялись в результате полного выгорания алюминия агломератов и являются так называемыми «крупными» оксидными частицами.

В отличие от частиц мелкодисперсного «дымового» оксида, крупные оксидные частицы образуются не в процессе, а в результате выгорания алюминия агломератов. По исчерпанию металлического алюминия горение агломерата прекращается, а оксид, накопленный на агломерате в процессе горения, стягивается в сферу, образуя крупную частицу, которая является конечным продуктом эволюции агломерата. Детальное изучение крупных оксидных частиц было предпринято в [6] для топлива Thiokol 1780-1 (16 % алюминия). Методика исследования состояла в следующем. Для гашения и отбора частиц КПП использовали сосуд со спиртом. Расстояние от образца топлива до поверхности гасящей жидкости варьировали от 15 до 150 мм, давление — от 0,1 до 7,0 МПа. Отобранные частицы КПП просеивали на ситах, затем в каждой из ситовых фракций крупнее 2 мкм визуально под микроскопом находили оксидные частицы, определяли их число по отношению к числу агломератов и вычисляли массовую долю в предположении одинаковой плотности частиц. В результате анализа полученных массовых распределений было установлено, что крупные оксидные частицы — остатки горения агломератов — составляют  $5 \div 20$  % массы всего оксида, имеют

размер  $5 \div 130$  мкм, а их распределение по размерам коррелирует с распределением агломератов. При увеличении дистанции замораживания масса крупных оксидных частиц возрастает, одновременно увеличивается их максимальный размер. Это вполне объяснимо тем обстоятельством, что при увеличении дистанции гашения все большее число агломератов успевает выгореть полностью.

Все вышесказанное относится к оксидным частицам белого цвета. Кроме таких частиц, в продуктах горения находили прозрачные оксидные частицы размером  $20 \div 25$  мкм. Прозрачные оксидные частицы в небольшом количестве присутствуют при всех дистанциях гашения от 15 до 150 мм, поэтому авторы [6] связывают образование этих частиц с фрагментацией агломератов.

На основании результатов, приведенных в [6, 18], в список возможных механизмов образования КПП следует внести механизмы:

- 7) образование крупных оксидных частиц в результате полного выгорания агломератов (белый оксид);
- 8) образование прозрачных оксидных частиц размером  $20 \div 25$  мкм в результате выгорания фрагментов агломерата.

Принципиальное отличие механизма 7 от механизмов 1–6 состоит в том, что размер порождаемых частиц зависит как от процесса агломерации (через распределение агломератов по размерам), так и от структуры и закономерностей выгорания агломератов. Иначе говоря, возможность превращения имеющейся на поверхности горящего агломерата оксидной нашлапки в частицу крупного оксида может реализоваться при наличии благоприятных условий для выгорания алюминия агломератов. Для топлива, исследованного в настоящей работе, количество частиц крупного оксида в КПП пренебрежимо мало.

Для полноты картины к приведенному списку механизмов образования оксидных частиц, следует добавить по меньшей мере еще один механизм [15]:

- 9) если особенности топлива таковы, что некоторая доля алюминия не агломерирует, то полное сгорание частиц металла с исходным размером  $D_{Al}$  приведет к образованию оксида с размером частиц  $D_{ox} =$

$0,6D_{Al}$ . Данная оценка выводится из геометрических соотношений на основе экспериментальных данных о горении алюминиевых частиц [23, 24], согласно которым  $\approx 17\%$  массы образуемого оксида остается на горячей частице (остальной оксид уходит во внешний поток).

По сути, этот механизм аналогичен механизму 7, но отличается тем, что размер образуемых оксидных частиц зависит от распределения исходного алюминия в топливе, а вклад механизма 9 определяется относительным количеством алюминия, не участвующего в агломерации.

Резюмируя сказанное об оксидных частицах, выделим главное.

- Обнаруженная в настоящей работе многомодовая структура массовых распределений оксидных частиц в диапазоне размеров  $1,2 \div 40$  мкм свидетельствует о сложности процесса формирования распределения оксидных частиц вследствие многообразия механизмов их образования.

- Для исследованного топлива распределение оксидных частиц в диапазоне  $D = 1,2 \div 40$  мкм характеризуется положением наиболее выраженной моды в интервале  $2 \div 4$  мкм, а также возрастанием размера частиц со временем в условиях, когда генерация вновь образованного оксида замедлена.

- Соответствие полученных результатов известным литературным данным позволяет говорить о независимости основных процессов генерации дисперсного оксида от состава топлива, а также от размера и структуры горящих алюминийсодержащих частиц.

## ЧАСТИЦЫ-АГЛОМЕРАТЫ

Рассмотрим характеристики частиц КПП с  $D > 60$  мкм. Для исследованного топлива количество частиц крупного оксида пренебрежимо мало и большинство частиц с  $D > 60$  мкм — типичные агломераты. Форма частиц близка к сферической, особенности морфологии агломератов аналогичного топлива при низких (0,6 МПа) и высоких (2,0 ÷ 7,5 МПа) давлениях описаны в [25].

На рис. 4 представлены примеры массовых распределений КПП  $f_i(D)$  и несгоревшего алюминия в КПП  $f_i^{Al}(D)$  для частиц с  $D > 60$  мкм. Плотность распределения относительной массы металлического алюминия в КПП в каж-

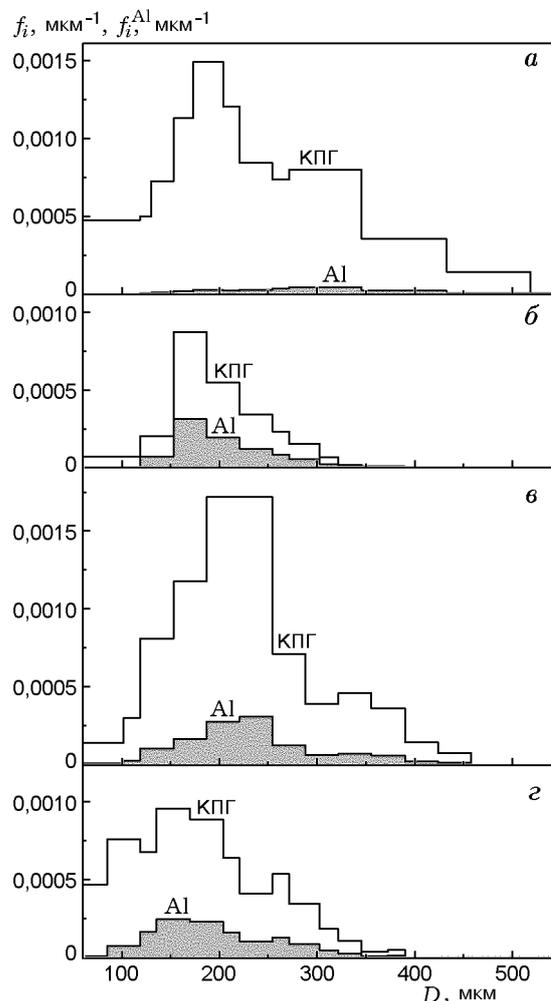


Рис. 4. Массовые распределения конденсированных продуктов горения (гистограмма КПП) и металлического алюминия в конденсированных продуктах горения (затемненная гистограмма Al):

представлены фрагменты гистограмм, соответствующие частицам с  $D > 60$  мкм, отобранным при  $p = 4,0$  МПа при вариации длины охранной трубки  $L_T$ , мм: 190 (а), 86 (б), 10 (в), 0 (г)

дом  $i$ -м интервале гистограммы рассчитывали по формуле  $f_i^{Al}(D) = f_i(D)\varepsilon_j$ , где  $\varepsilon_j$  — массовое содержание алюминия в той ситовой фракции  $j$ , в которую попадает  $i$ -й интервал гистограммы [21]. Наблюдаемые на распределениях локальные максимумы имеют стохастическую природу и обусловлены, в частности, фракционированием частиц в процессе обработки. Следует отметить, что в литературе имеются примеры многомодовых распределений агломератов по размерам и наличие мод обычно свя-

Таблица 2

Средние размеры  $D_{mn}$  частиц КПП,  
вычисленные в диапазоне размеров от 60 мкм до максимального

$p$ , МПа	$L_T$ , мм	$D_{mn}$ , мкм						
		$D_{10}$	$D_{20}$	$D_{30}$	$D_{21}$	$D_{32}$	$D_{43}$	$D_{53}$
0,6	0	164	181	199	199	240	281	299
0,6	10	155	178	202	205	260	316	344
0,6	86	147	166	186	189	232	270	287
0,6	190	172	195	220	223	277	328	351
2,0	0	154	165	178	178	205	232	244
2,0	10	158	168	178	179	200	222	232
2,0	86	156	173	190	191	229	277	308
2,0	190	127	144	163	164	208	250	268
4,0	0	108	117	128	127	152	182	200
4,0	10	153	165	177	179	203	227	238
4,0	86	147	155	164	164	182	203	218
4,0	190	127	142	159	158	200	247	270
7,5	0	98	104	111	110	126	147	158
7,5	10	132	138	144	143	157	176	190
7,5	86	92	98	107	104	127	178	222
7,5	190	114	125	138	137	167	205	230

зывают с особенностями процесса формирования агломератов, выделяя карманный, докарманный и межкарманный механизмы [5]. Однако только многократное проведение экспериментов с последующим рассевом частиц на разных наборах сит может позволить статистически обоснованно отделить истинные «физические» моды от случайных.

Несмотря на «негладкий» вид распределений (см. рис. 4), их статистические характеристики, включая средние диаметры высоких рядков  $D_{43}$  и  $D_{53}$ , при повторении экспериментов воспроизводятся с относительным отличием не хуже 14 %, что не превышает абсолютной погрешности измерения размеров частиц под микроскопом [21]. Статистические характеристики распределений представлены в табл. 2 в виде средних размеров  $D_{mn}$ , вычисленных в диапазоне размеров  $60 \text{ мкм} < D < D_{\max}$ . Погрешность приведенных величин, оцененная как половина ширины интервала гистограммы, составляет  $\approx 9 \text{ мкм}$  для частиц с  $D < 120 \text{ мкм}$  и  $\approx 22 \text{ мкм}$  для частиц с  $D > 120 \text{ мкм}$ . Принято считать, что эти средние характеризуют распределение агломератов по размерам.

Анализ распределений на рис. 4 и данных табл. 2 показывает следующее.

- Для исследуемого топлива разделение КПП на агломераты ( $D > 60 \text{ мкм}$ ) и оксидные частицы ( $D < 60 \text{ мкм}$ ) несколько искусственно,

поскольку функция распределения массы КПП не опускается до нуля в районе 60 мкм. В то же время, несгоревший алюминий действительно сосредоточен в частицах с  $D > 60 \text{ мкм}$ , так что содержание алюминия в них можно отождествить с содержанием алюминия в агломератах.

- Горение агломератов на расстоянии  $86 \div 190 \text{ мм}$  от поверхности все еще продолжается, что видно по уменьшению массы металлического алюминия и накоплению оксида.

- Накопление оксида в области  $D > 60 \text{ мкм}$  происходит не только за счет окисления металла, но и за счет прихода оксида из области размеров  $D < 60 \text{ мкм}$ , что видно по соотношению площадей под кривыми распределения массы КПП и алюминия в КПП.

- Размер частиц-агломератов, отобранных без охранной трубки ( $L_T = 0$ ), уменьшается с ростом давления. Например, средний диаметр  $D_{43}$  в диапазоне  $p = 0,6 \div 7,5 \text{ МПа}$  монотонно убывает с 281 до 147 мкм. Зависимости подобного вида характерны для топлив на основе ПХА [3]. В случае замораживания КПП вблизи поверхности горения размер  $D_{43}$  характеризует агломерационные свойства топлива.

- Выраженной тенденции в трансформации распределений при увеличении длины охранной трубки не наблюдается — изменения имеют скорее случайный, чем закономерный ха-

рактически. Подобное поведение распределений было отмечено ранее в [6, 14, 16]. Так, в [6] при увеличении дистанции замораживания форма кривой распределения агломератов почти не изменялась, несмотря на уменьшение суммарной массы частиц (площади под кривой). В [14, 16] наблюдали неизменность средних размеров агломератов на расстоянии более  $17 \div 27$  мм от поверхности горения, а также большую вариацию (разброс от опыта к опыту) средних размеров агломератов на расстоянии менее  $17 \div 27$  мм.

**Плотность агломератов.** Литературные данные о плотности частиц КПП весьма скудны, несмотря на очевидную важность этого параметра для расчета движения частиц дисперсной фазы. Результаты измерения плотности замороженных агломератов приведены в [1, 3, 26, 27]. В [18] дана аппроксимационная зависимость плотности оксидных частиц (остатков горения агломератов) от размера. В [28] оценена плотность ( $2,1 \text{ г/см}^3$ ) оксидных частиц с  $D < 8$  мкм, отобранных на высоте 4,6 км из выхлопного облака твердотопливных ускорителей стартового Space Shuttle. В данной работе выполнено 58 определений средней плотности частиц-агломератов во фракциях частиц КПП крупнее 120 мкм по методике [21]. Для частиц размером  $130 \div 730$  мкм плотность слабо убывает при возрастании размера и аппроксимируется зависимостью  $\rho = 2,29 - 0,00014D_{10}$ , где плотность  $\rho$  измеряется в  $\text{г/см}^3$ , размер частиц  $D_{10}$  — в мкм. Вопрос о соответствии плотностей замороженных частиц КПП и горячих частиц в факеле не рассматривали.

#### ВЫГОРАНИЕ АЛЮМИНИЯ ИЗ ЧАСТИЦ КПП ПРИ ИХ УДАЛЕНИИ ОТ ПОВЕРХНОСТИ ГОРЕНИЯ

В предыдущих параграфах показано, что эволюция дисперсных продуктов горения происходит в результате одновременного протекания множества процессов. Вследствие этого реализуются весьма сложные и немонотонные зависимости средних размеров  $D_{10} - D_{53}$  от длины охранной трубки  $L_T$  (см. табл. 1, 2). Существенная полидисперсность частиц и отсутствие монотонного изменения размеров  $D_{mn}$  делает весьма проблематичным извлечение из экспериментальных данных закона горения индивидуальной частицы в виде функциональной зависимости размера частицы от времени.

Поэтому в данной работе выгорание алюминия из всей совокупности агломератов описывали зависимостью  $\eta(t)$ , где  $\eta$  — неполнота сгорания алюминия агломератов, определяемая как отношение массы алюминия в частицах КПП с  $D > 60$  мкм к начальной массе алюминия в топливе;  $t$  — время пребывания агломератов в пламени горящего топливного образца. Ограничения такого подхода очевидны: зависимость связана с горением конкретного топлива в определенных экспериментальных условиях. Тем не менее зависимость дает оценочную информацию о динамике выгорания агломератов, экспериментальные данные о которой весьма дефицитны. Очевидно также, что неполнота сгорания алюминия, определяемая в экспериментах с небольшими образцами топлива, завышена по отношению к процессу в двигателе, где условия близки к адиабатическим, а также возможно дробление агломератов с последующим быстрым выгоранием фрагментов [29].

В соответствии с [21] считали, что дистанция, пройденная частицами-агломератами до замораживания, складывается из длины охранной трубки и длины начального участка смещения струи продуктов горения топливного образца со спутным потоком газа-разбавителя. Предполагали, что частицы стартуют с поверхности горения с нулевой скоростью и движутся под действием силы тяжести и стоковской силы. Время пребывания частиц в потоке рассчитывали по уравнению движения как среднее арифметическое двух расчетных величин — времени прохождения дистанции замораживания и времени прохождения расстояния, равного сумме дистанции замораживания и длины образца топлива. Тем самым косвенно учитывали некоторую разницу во временах пребывания для частиц, покидающих поверхность горения в начальный момент, когда поверхность топлива заподлицо со стенками стаканчика, и для частиц, вылетающих с поверхности в конце горения, когда поверхность углубилась внутрь стаканчика. При вычислении времени пребывания в качестве характерного размера частиц использовали значения  $D_{43}$ , полученные в экспериментах без охранной трубки:  $D_{43} = 281, 232, 182$  и  $147$  мкм соответственно для  $p = 0,6; 2,0; 4,0$  и  $7,5$  МПа. Значения других параметров, участвующих в расчете, были следующие: плотность частиц  $2,3 \text{ г/см}^3$ , молекулярная масса продуктов горения  $22 \text{ г/моль}$ ,

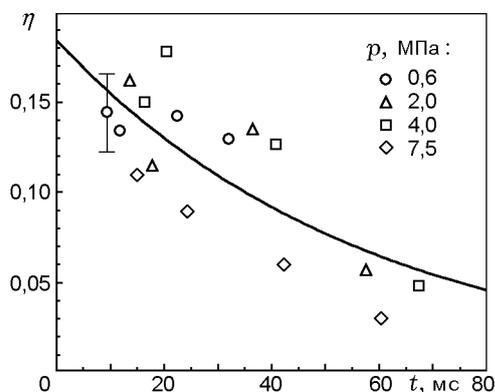


Рис. 5. Неполнота сгорания алюминия агломератов в зависимости от времени их пребывания в струе горячих газообразных продуктов горения топливного образца

динамическая вязкость  $0,000074$  Па·с, плотность топливной матрицы (газифицирующейся части топлива)  $1,61$  г/см<sup>3</sup>, температура факела  $3000$  К. Длина начального участка смешения в проведенных экспериментах была  $\approx 1,6$  см.

На рис. 5 показана зависимость экспериментально определенной неполноты сгорания алюминия агломератов от расчетного времени их пребывания в горячей струе продуктов горения топливного образца. Полученную зависимость можно аппроксимировать экспоненциальной функцией  $\eta = 0,184 \exp(-0,0175t)$ , где  $t$  — время пребывания частиц в потоке продуктов сгорания, мс.

Относительная погрешность величины  $\eta$  не превышает 15 %. Экспериментальная оценка этой погрешности проведена с помощью теста на воспроизводимость, который заключается в следующем. В одинаковых условиях проводят повторные серии экспериментов с последующей полной обработкой, включающей фракционирование, гранулометрический и химический анализы. Полученные в результате значения  $\eta$  рассматриваются как независимые реализации случайной величины, для которой можно вычислить математическое ожидание (среднее арифметическое), среднее квадратичное отклонение, среднее квадратичное отклонение среднего, а также доверительный интервал, соответствующий заданному уровню надежности. Доверительный интервал, изображенный на рис. 5 в виде «усов» у одной из точек, оценен для уровня надежности 68 % по двум независимым сериям экспериментов. Со-

гласно принципам математической статистики [30, с. 125], в данном случае доверительный интервал равен среднее квадратичному отклонению среднего, умноженному на коэффициент Стьюдента.

Необходимо отметить, что разброс значений  $\eta$ , реализуемый при повторении экспериментов в одинаковых условиях, существенно превышает вариацию значений  $\eta$ , вычисленную с учетом погрешностей результатов химического анализа отдельных фракций КППГ.

Как видно на рис. 5, только при  $p = 7,5$  МПа неполнота сгорания алюминия монотонно снижается со временем. В других случаях точки не образуют монотонной последовательности даже с учетом разброса экспериментальных данных.

Безусловно, неопределенность в расчете времени  $t$  оказывает влияние на вид зависимости  $\eta(t)$ , однако причина ее аномального поведения обусловлена тем, что более полное сгорание металлического алюминия реализуется в экспериментах с меньшей длиной охранной трубки. Обсуждению возможных причин возникновения такой аномалии уделено значительное внимание в работе [31], целиком посвященной проблемам интерпретации результатов отборов КППГ. Здесь же обратим внимание на следующее обстоятельство. Подобное аномальное поведение зависимости неполноты сгорания алюминия от дистанции гашения (или расстояния от поверхности горения до поверхности замораживания) можно обнаружить при анализе данных, полученных с использованием иных методов отбора частиц КППГ [6, 14, 16]. Примеры таких результатов представлены в табл. 3 и на рис. 6 в виде зависимостей  $\eta_s(l)$ , где  $\eta_s$  — суммарная неполнота сгорания алюминия, определяемая как отношение массы алюминия во всех отобранных частицах КППГ к начальной массе алюминия в топливе,  $l$  — дистанция гашения. Для единообразного представления данных за дистанцию гашения приняты следующие величины.

В случае экспериментов с охранной трубкой дистанция гашения есть сумма длины трубки, длины начального участка смешения и половины длины образца.

В случае отборов в жидкость дистанция гашения равна расстоянию от образца до поверхности жидкости до опыта плюс половина длины образца.

Анализируя приведенные данные, можно

Таблица 3

Условия наблюдения немонотонной зависимости  
неполноты сгорания алюминия от дистанции гашения

Номер кривой на рис. 6	Ссылка	Название топлива (основные компоненты, связующее)	$p$ , МПа	Метод гашения и отбора
1	[6]	УТР3001 (16 % Al, 84 % твердых компонентов, связующее РВАН — сополимер бутадиена, акриловой кислоты и акрилонитрила)	0,1	Ж
2	[14]	— (17 % Al, 49,6 % ПХА, 21,4 % гексогена, 12 % связующего НТРВ — полибутадиена с концевыми гидроксильными группами)	6,9	ВБ
3	[32]	— (18 % Al, 64 % ПХА, 18 % связующего — маслонеполненный изопреновый каучук)	2,2	Г
4	Данная работа	— (23,4 % Al, ПХА, энергетическое связующее)	2,0	Г
5	[16]	XLDB-A — двухосновное с поперечными связями (19 % Al, 75 % твердых компонентов, связующее PEG/NG — полиэтиленгликоль с нитроглицерином)	6,9	ВБ
6	[32]	— (18 % Al, 52 % ПХА, 30 % связующего — бутадиен-нитрильный каучук, пластифицированный диэтиленгликольдинитратом)	2,2	Г

Примечание. Состав топлива УТР3001 взят из [33]. Обозначения методов гашения и отбора: Ж — отбор в неподвижную жидкость; ВБ — отбор в жидкость, помещенную во вращающийся барабан; Г — гашение посредством разбавления продуктов инертным газом, отбор на металлические сетки и фильтр АФА.

видеть, что anomальное поведение наблюдается для топлив со связующими различного типа — инертными и энергетическими (в том числе двухосновное металлизированное топливо XLDB-A [16]), при низком (0,1 МПа) и повышенном (2,0 ÷ 6,9 МПа) давлении. В большинстве случаев anomальное поведение имеет место в экспериментах с минимальными дистанциями замораживания (до 30 мм). Во всех случаях отклонение от ожидаемого хода зависимости  $\eta_s(l)$  невелико, хотя часто не укладывается в доверительный интервал погрешности. Это позволяет предположить, что anomальные значения  $\eta_s$  в экспериментах с гашением частиц вблизи поверхности горения обусловлены повышенным (по сравнению с другими точками) разбросом экспериментальных данных. В [14, 16] отмечено, что размер агломератов претерпевает значительные изменения на расстоянии до 17 ÷ 27 мм от поверхности горения, а при отборах на больших дистанциях остается неизменным. Размер агломерата — один из

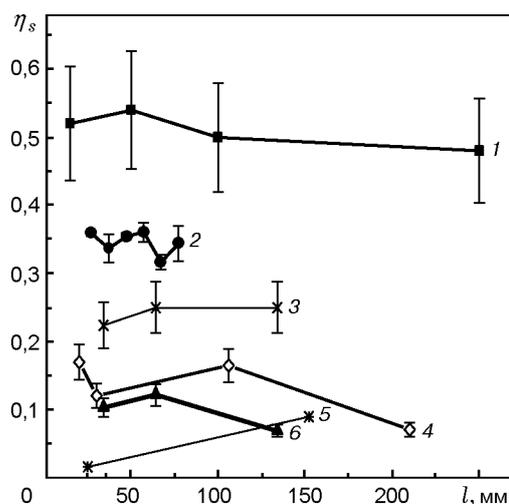


Рис. 6. Примеры немонотонной зависимости неполноты сгорания алюминия от дистанции гашения:

обозначения кривых см. в табл. 3

ключевых параметров. От него зависит эффективная плотность агломерата, характеристики движения и обтекания и т. д. Поэтому представляется логичным ожидать большего разброса всех регистрируемых характеристик в тех случаях, когда возмущения, вносимые гашением, произведены вблизи поверхности горения, поскольку именно здесь наиболее энергично протекают процессы, обеспечивающие эволюцию агломератов.

Заметим, что зарегистрированное в [14] на дистанции  $17 \div 27$  мм изменение среднего размера агломератов с 300 до 200 мкм ( $p = 6,9$  МПа) трудно объяснить только выгоранием алюминия. Столь значительное изменение размера, вероятно, вызвано раздуванием и схлопыванием газовых пузырей внутри агломерата с соответствующим изменением эффективной плотности агломерата.

Таким образом, аномальное поведение неполноты сгорания алюминия от дистанции гашения может быть связано с особенностями поведения агломератов вблизи поверхности горящего топлива и в процессе гашения. Приведенное объяснение является гипотетическим и требует экспериментальной проверки. Например, было бы весьма полезно провести визуализацию агломератов на всем пути от поверхности горения до расстояния  $\approx 30$  мм, а также проследить процесс гашения агломератов в инертном газе или в замораживающей жидкости.

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 за рекомендации по улучшению текста статьи.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Горение** порошкообразных металлов в активных средах / П. Ф. Беляев, Ю. В. Фролов и др. М.: Наука, 1972.
2. **Price E. W.** Combustion of metallized propellants // *Fundamentals of Solid Propellant Combustion* / К. К. Kuo, М. Summerfield (Eds). (Progress in Astronautics and Aeronautics, V. 90). New York: Amer. Inst. of Aeronautics and Astronautics, 1984. Ch. 14. P. 479–514.
3. **Гладун В. Д., Фролов Ю. В., Кашпоров Л. Я. и др.** Агломерация частиц порошкообразного металла при горении смесевых конденсированных систем. Черногоровка, 1977. (Препринт / АН СССР. ОИХФ).
4. **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.
5. **Бабук В. А., Белов В. П., Ходосов В. В., Шелухин Г. Г.** Исследование агломерации частиц алюминия при горении в составе смесевых конденсированных систем // *Физика горения и взрыва*. 1985. Т. 21, № 3. С. 20–25.
6. **Price E. W., Sigman R. K., Sambamurthi J. R., Park C. J.** Behavior of aluminum in solid propellant combustion. AFOSR-TR-82-0964. Georgia Inst. of Techology, 1982. Имеются переводы ЦООНТИ: М-13176, 1985; М-13217, 1985.
7. **Glotov O. G., Zarko V. E., Karasev V. V., Beckstead M. W.** Aluminum agglomeration in solid propellants: Formulation effects // *Propellants, Explosives, Rockets, and Guns: Proc. of the Second Intern. High Energy Materials Conference and Exhibit, December 8–10, 1998*. ИТ Мадрас, Chennai, India. P. 131–137.
8. **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.
9. **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.
10. **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.
11. **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.
12. **Самбамурти Дж. К., Прайс Е. В., Сигмен Р. К.** Агломерация алюминия при горении смесевых твердых ракетных топлив // *Аэрокосмическая техника*. 1985. Т. 3, № 1. С. 65–81.
13. **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. См. также: Liu T. K., Perng H. C., Luh S. P. and Liu F. Aluminum agglomeration in AP/RDX/Al/HTPB propellant combustion // *J. Propulsion and Power*. 1992. V. 8, N 6. P. 1177–1184.
14. **Tai-Kang Liu, Chi-Fa Hsieh.** Analysis of agglomerate size from burning aluminized AP/RDX/HTPB propellants in quench bomb // *J. Propulsion and Power*. 1996. V. 12, N 5. P. 995–998.

15. **Duterque J.** Experimental studies of aluminum agglomeration in solid rocket motors // 4th Intern. Symp. on Special Topics in Chemical Propulsion. Stockholm, Sweden: ONERA TP 1996-48, 1996. Доступно в Internet по адресу: [http://www.onera.fr/RECH/BASIS/public/web\\_fr/document/DDD/243366.pdf](http://www.onera.fr/RECH/BASIS/public/web_fr/document/DDD/243366.pdf)
16. **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.
17. **Salita M.** Quench bomb investigation of aluminum oxide formation from solid rocket propellants. Pt II: Analysis of data // Ibid. P. 185–197.
18. **Гусаченко Е. И., Фурсов В. П., Шевцов В. И. и др.** Особенности формирования агломератов при горении смесевых композиций // Физика аэродисперсных систем. Киев; Одесса: Вища шк., 1981. Вып. 21. С. 62–66.
19. **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; II. Зависимость от размера частиц // Физика горения и взрыва. 1974. Т. 10, № 5. С. 869–676.
20. **Эйзель, Браун, Прайс.** Влияние давления, скорости и геометрии на размеры частиц  $Al_2O_3$ , образующихся при горении алюминизированного твердого топлива // Ракет. техника и космонавтика. 1975. Т. 13, № 7. С. 89–95.
21. **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.
22. **Бахир Л. П., Левашенко Г. И.** Исследование размеров капель окиси алюминия вблизи горячей поверхности топлива // Физика горения и взрыва. 1973. Т. 9, № 6. С. 842–849.
23. **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.
24. **Гремячкин В. М., Истратов А. Г., Колесников-Свинарев В. И. и др.** Зоны реакции при горении капли алюминия в воздухе в условиях невесомости и свободного падения // Химическая физика процессов горения и взрыва. Горение конденсированных систем. Черноголовка: Изд-во ОИХФ АН СССР, 1977. С. 78–81.
25. **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.
26. **Бабук В. А., Белов В. П., Ходосов В. В., Шелухин Г. Г.** Исследование структуры агломератов при горении алюминизированных смесевых конденсированных систем // Физика горения и взрыва. 1988. Т. 24, № 5. С. 52–57.
27. **Брандидж В. Н., Кавени Л.** Медленногорящие алюминизированные топлива в поле перегрузок // Аэрокосмическая техника. 1985. Т. 3, N 1. С. 47–58.
28. **Cofer W.R., Lala G. G., Wightman J. P.** Analysis of midtropospheric space shuttle exhausted aluminum oxide particles // Atmospher. Environ. 1985. V. 21, N 5. P. 1187–1196.
29. **Кавени Л., Гани А.** Дробление агломератов алюминия и окиси алюминия в ускоряющемся потоке // Ракет. техника и космонавтика. Т. 17, N 12. С. 76–80.
30. **Новицкий П. В., Зограф И. А.** Оценка погрешности результатов измерений. Л.: Энергоатомиздат, 1985.
31. **Глотов О. Г., Зарко В. Е., Карасев В. В.** Проблемы и перспективы изучения агломерации и эволюции агломератов методом отборов // Физика горения и взрыва. 2000. Т. 36, № 1. С. 161–172.
32. **Glotov O. G., Zarko V. E., Karasev V. V., Beckstead M. W.** Effect of binder on the formation and evolution of condensed combustion products of metalized solid propellants // Combustion and Detonation. 28th Intern. Annual Conf. of ICT, Karlsruhe, Germany. 1997. Report 75. P. 1–15.
33. **Hermesen R. W.** Aluminum oxide particle size for solid rocket motor performance prediction // J. Spacecraft and Rockets. 1981. V. 18, N 6. P. 483–490.

*Поступила в редакцию 4/IV 1994 г.,  
в окончательном варианте — 13/I 2000 г.*