

КОНДЕНСИРОВАННЫЕ ПРОДУКТЫ ГОРЕНИЯ АЛЮМИНИЗИРОВАННЫХ ТОПЛИВ. IV. ВЛИЯНИЕ ПРИРОДЫ НИТРАМИНОВ НА АГЛОМЕРАЦИЮ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГОРЕНИЯ АЛЮМИНИЯ

О. Г. Глотов

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

Методом отбора исследованы конденсированные продукты горения двух модельных топлив, состоящих из перхлората аммония, алюминия, нитрамина и энергетического связующего. Одно топливо содержало октоген с размером частиц $D_{10} \approx 490$ мкм, другое — гексоген с размером $D_{10} \approx 380$ мкм. Определен гранулометрический состав и содержание металлического алюминия в частицах конденсированных продуктов горения с размерами от 1.2 мкм до максимального в диапазоне давлений 0.1 ÷ 6.5 МПа при вариации местоположения гашения частиц от поверхности горения до 100 мм. Для агломератов получены зависимости неполноты сгорания алюминия от времени пребывания в факеле образца топлива. Топливо с гексогеном характеризуется более сильной агломерацией, чем топливо с октогеном, — размер и масса агломератов больше, выгорание алюминия идет медленнее. Определено отношение массы оксида, аккумулированного на агломератах, к общей массе образованного оксида. Показано, что размер агломерата — основной физический фактор, управляющий накоплением оксида на горящем агломерате.

Ключевые слова: алюминизированное топливо, октоген, гексоген, агломерация, конденсированные продукты горения, полнота сгорания алюминия, эволюция агломератов.

ВВЕДЕНИЕ

Для повышения удельного импульса в состав ракетных топлив вводят металл (алюминий) и высокоэнергетические вещества (в частности, гексоген или октоген) [1, 2]. Например, состав топлива ракет, подлежащих уничтожению по договору ОСНВ, следующий: 46 % ПХА, 20 % алюминия, 25 % октогена, 9 % связующего [3]. Циклические нитрамины гексоген и октоген не только высокоэнергетичны, но и характеризуются высокой плотностью, термостойкостью [4], совместимостью с традиционными компонентами ракетных топлив [5]. Топлива с нитраминами считаются менее дымными и более экологически безопасными вследствие пониженного содержания ПХА. Применение гексогена и октогена в составе топлив вызвало их всестороннее изучение (см., например, обзорные работы [6–8], специальные выпуски журнала «Propulsion and Power» [9, 10], многочисленные статьи в трудах международной ежегодной конференции Института хими-

ческих технологий (ICT, Karlsruhe, Germany). Большинство публикаций, в том числе работы последних лет [11–16], не вошедшие в упомянутые обзоры, посвящено исследованию этих нитраминов как индивидуальных веществ. Существенно меньше публикаций посвящено исследованию горения безметалльных топлив с нитраминами [17–19] и горению алюминизированных топлив с нитраминами [20–26]. Экспериментальные данные [21–24] будут привлечены при обсуждении результатов.

В настоящей работе методом отбора проб исследованы конденсированные продукты горения (КПГ) двух модельных алюминизированных топлив — одно с гексогеном, другое с октогеном. Основное внимание уделено характеристикам грубодисперсной части КПГ — частицам-агломератам. Размер агломератов определяет макрокинетические закономерности выгорания алюминия и в конечном счете эффективность использования алюминия в терминах полноты сгорания металла. Сравнение параметров топлив при замене гексогена октогеном представляет интерес вследствие практического применения обоих нитраминов.

Работа выполнена при финансовой поддержке контракта EOARD F61708-97-W0197, гранта INTAS 93-2560ext и проекта МНТЦ № 2358.

Таблица 1

Компонентный состав модельных топлив

Топливо	Массовое содержание, %					
	ПХА1 $S_{уд} = 6000 \text{ см}^2/\text{г}$	ПХА2 $200 \div 315 \text{ мкм}^1$	Октоген $250 \div 700 \text{ мкм}^1$	Гексоген $250 \div 700 \text{ мкм}^1$	Алюминий ² $10 \div 30 \text{ мкм}$	Связующее ³ (98 %) + добавки (2 %)
Е12	7	18	35	—	20	20
R	7	18	—	35	20	20

Примечания. ¹Ситовая фракция. ²Содержание металлического алюминия, определенное перманганатометрическим методом [30], составляет 99.5 %. ³Энергетическое связующее на основе бутадиев-нитрильного полимера, пластифицированного диэтиленгликольдинитратом (ДЭГДН).

Таблица 2

Средние размеры¹ D_{mn} порошкообразных компонентов топлив

Компонент	Метод анализа	D_{10}	D_{20}	D_{30}	D_{43}	D_{53}
		мкм				
Al	Малверн ²	9.7	11.0	12.6	22.3	26.4
ПХА1	—//—	4.3	4.0	5.1	17.1	22.9
ПХА2	Микроскоп	284	288	292	306	310
Октоген	—//—	486	503	522	601	621
Гексоген	—//—	375	378	381	397	402

Примечания. ¹По приведенным средним размерам при необходимости можно вычислить другие статистические параметры, например: $\sigma^2 = D_{20}^2 - D_{10}^2$, $D_{21} = D_{20}^2/D_{10}$, $D_{32} = D_{30}^3/D_{20}^2$.

²Автоматический гранулометр «Malvern-3600E».

ПРОВЕДЕНИЕ И ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Топлива, образцы, условия экспериментов

Для исследований были изготовлены модельные топлива Е12 и R*, отличающиеся только типом нитрамина (октоген или гексоген), другие компоненты и их соотношения были одинаковы (см. табл. 1). Порошкообразные компоненты были подвергнуты гранулометрическому анализу, как описано в [29], результаты представлены на рис. 1 и в табл. 2. Фракцию $250 \div 700 \text{ мкм}$ октогена и гексогена выделяли на одних и тех же ситах. Однако из-за большой ширины фракции и разной формы частиц (рис. 2) гранулометрические характери-

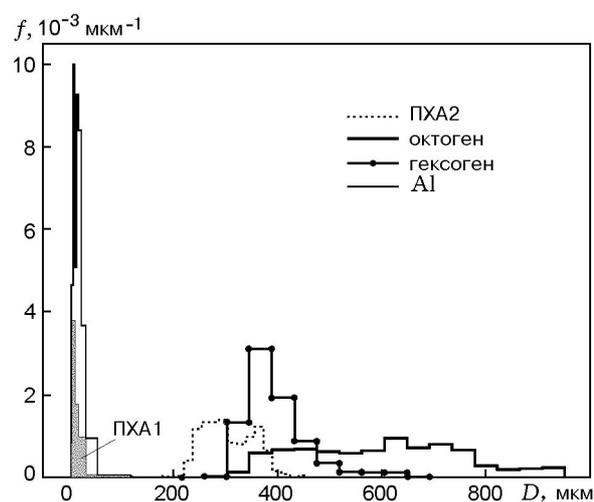


Рис. 1. Гранулометрический состав порошкообразных компонентов топлив:

по оси ординат — плотность распределения относительной массы по размерам, нормированная на массовую долю компонента в топливе, так что площадь под кривой пропорциональна массе соответствующего компонента

стики октогена и гексогена существенно отличались (рис. 1, табл. 2).

Образцы вырезали из отвержденной топливной массы в форме цилиндров высотой 10 мм и диаметром 7 или 11.5 мм. Цилиндры были вставлены в стаканчики из оргстекла, которые служили бронировкой боковой поверхности.

Сжигание образцов и отборы КПГ проводили по методике и на установке [29] (проточная бомба с гашением частиц в спутном потоке инертного газа с последующим улавливанием их на металлические сетки и аэрозольный фильтр), в среде азота при трех уровнях давления. При давлении $p = 0.1 \text{ МПа}$ азот был

* Сохранены обозначения, использованные в [27, 28].

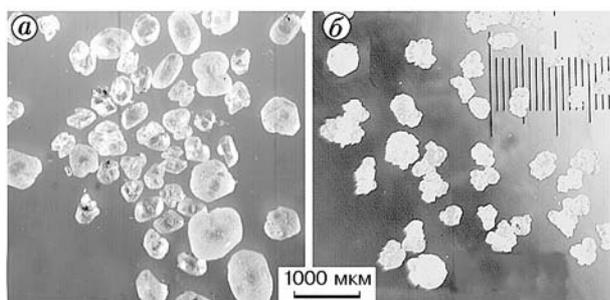


Рис. 2. Вид частиц октогена (а) и гексогена (б) фракции 250 ÷ 700 мкм

неподвижен; при $p \approx 2.5$ и ≈ 6.5 МПа массовый расход азота через бомбу был соответственно 1.1 ÷ 2 и 1.8 ÷ 2 г/с.

В одинаковых условиях сжигали 2–3 образца диаметром 11.5 мм или 5–6 образцов диаметром 7 мм, так что суммарная масса сгоревшего топлива в серии была $\approx 3 \div 6$ г и масса КПП 1 ÷ 2 г.

Для изменения времени пребывания агломератов в горячих продуктах горения топлива, т. е. времени горения агломератов до гашения, использовали три варианта (А, В, С) геометрии (рис. 3).

Представление результатов. Определения параметров

Отобранные частицы КПП фракционировали на ситах и подвергали гранулометрическому и химическому анализам, как описано в [29, 30]. Результаты представляли в виде гистограммы $f(D)$ плотности распределения относительной массы частиц КПП по размерам и условной гистограммы $f^{Al}(D)$ плотности распределения относительной массы непрореагировавшего алюминия в частицах КПП по размерам:

$$f_i(D) = m_i / M_{prop} \Delta D_i, \quad f_i^{Al}(D) = f_i(D) \varepsilon_j^{Al},$$

где D — размер (диаметр) частиц, m_i — масса частиц в i -м гистограммном интервале, M_{prop} — масса топлива (суммарная масса образцов в серии), ΔD_i — ширина i -го гистограммного интервала, ε_j^{Al} — массовая доля непрореагировавшего алюминия в той фракции j , в которую попадает i -й гистограммный интервал. В дальнейшем индекс i опускаем, а

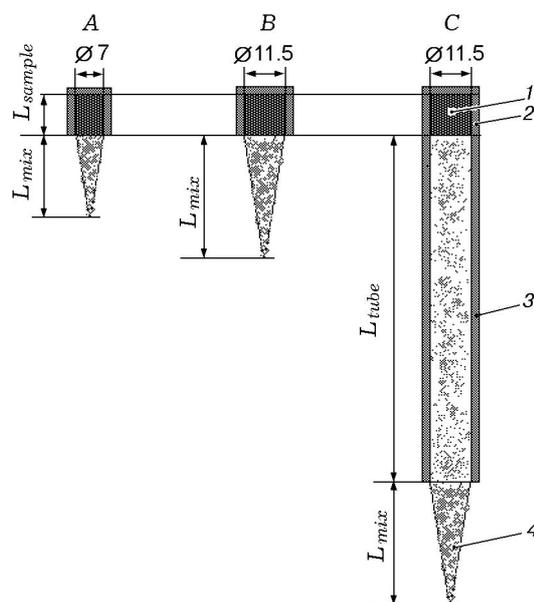


Рис. 3. Варианты геометрии опытов для изменения времени пребывания агломератов в пламени:

1 — образец топлива; 2 — стаканчик из оргстекла для образца, глубина стаканчика равна длине образца L_{sample} ; 3 — охранный трубка из оргстекла длиной L_{tube} ; 4 — начальный участок смешения длиной L_{mix} ; размеры в мм.

Геометрия	L_{sample}	L_{tube}	L_{mix}
A	10	—	≈ 20
B	10	—	≈ 30
C	10	100	≈ 30

функции $f(D)$ и $f^{Al}(D)$ для краткости будем называть массовыми распределениями.

Наименьший размер агломератов D_L , ограничивающий мелкие частицы и крупные частицы-агломераты, определяли как размер, при котором массовое распределение КПП имеет локальный минимум, $f(D) \approx 0$. Для топлив с сильной агломерацией (к каковым, как будет показано ниже, относятся исследуемые топлива) установление размера D_L таким способом естественно и не представляет труда [27]. Далее по тексту частицы с размером $D < D_L$ будем называть мелкими, частицы с $D > D_L$ — агломератами.

Распределения агломератов по размерам количественно характеризовали набором средних размеров D_{mn} [29], вычисленных в диапазоне $D_L \div D_R$. Здесь D_R — условный «наибольший» размер агломератов, начиная с которого массовое распределение $f(D)$ теряет непрерывность (в гистограмме появляются интервалы, не содержащие частиц).

По функциям $f(D)$ и $f^{Al}(D)$ вычисляли ряд интегральных параметров для всего диапазона размеров частиц, отдельно для мелких частиц и для агломератов. Параметры обезмеривали путем деления на массу топлива. Например, безразмерная масса агломератов $m_{ag} = M_{ag}/M_{prop}$, где M_{ag} — масса агломератов, M_{prop} — масса топлива, г.

В данной работе использовали следующие параметры: m_f — масса мелких частиц, m_f^{Al} — масса несгоревшего алюминия в мелких частицах, m_{ag} — масса агломератов, m_{ag}^{Al} — масса несгоревшего алюминия в агломератах, $m_{ссп} = m_f + m_{ag}$ — общая масса КППГ, $m_{ссп}^{Al} = m_f^{Al} + m_{ag}^{Al}$ — общая масса несгоревшего алюминия в КППГ, m_{prop}^{Al} — начальная масса алюминия в топливе ($m_{prop}^{Al} \equiv 0.20$), $m_{ссп}^{Al}/m_{prop}^{Al}$ — общая неполнота сгорания алюминия, m_f^{Al}/m_{prop}^{Al} — неполнота сгорания алюминия в мелких частицах, $\eta = m_{ag}^{Al}/m_{prop}^{Al}$ — неполнота сгорания алюминия агломератов, $\xi = 1 - \eta$ — полнота сгорания алюминия агломератов, $\varphi = 1/[1 + (m_f - m_f^{Al})/(m_{ag} - m_{ag}^{Al})]$ — отношение массы оксида, аккумулированного на агломератах, к общей массе образованного оксида.

Оценка времени пребывания частиц в пламени

Время пребывания t_{res} агломератов в пламени рассчитывали по методике [29]. Это время отождествляли со временем горения, предполагая, что частицы мгновенно гаснут на расстоянии L_{mix} от среза стаканчика или охранной трубки (см. рис. 3). L_{mix} — длина начального участка смешения коаксиальных турбулентных струй — продуктов горения, оттекающих от образца и окружающего газаразбавителя. Время t_{res} считали равным полусумме времен, затраченных на прохождение дистанции $L_{tube} + L_{mix}$ и дистанции $L_{sample} + L_{tube} + L_{mix}$, учитывая таким образом изменение точки старта частиц вследствие перемещения поверхности горения. Для определения времен решали задачу о движении сферической частицы под действием сил тяжести и Стокса (коэффициент сопротивления в форме $C_d = 24/Re$). Особенности расчетов в данной работе по отношению к [29] были следующие.

- Параметры газовой фазы (температуру T_{gp} , молярную массу M_{gp} , динамическую вязкость μ) брали из термодинамических расчетов равновесного состава продуктов горения

по программе АСТРА. Расчеты проводили для каждой серии экспериментов с учетом того, что в ходе опыта вместе с образцом топлива сгорает некоторая масса материала бронировки и охранной трубки (оргстекла). Массу сгоревшего оргстекла определяли взвешиванием до и после опыта. Присутствие продуктов горения оргстекла изменяет параметры газа. Например, если для продуктов горения топлива Е12 при $p = 6.7$ МПа расчет дает $T_{gp} = 3772$ К, $M_{gp} = 19.9$, $\mu = 0.82 \cdot 10^{-4}$ Па·с, то при использовании 100-миллиметровой трубки (геометрия С) вместе с ≈ 3.4 г топлива сгорело ≈ 0.9 г оргстекла и параметры газа стали соответственно $T_{gp} = 2433$ К, $M_{gp} = 18.1$, $\mu = 0.59 \cdot 10^{-4}$ Па·с.

- В качестве размера частиц использовали средний диаметр D_{30} , определенный в геометрии А.

- С учетом имеющихся экспериментальных данных плотность частиц принимали равной 2.16 г/см³.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Сценарий агломерации и размеры агломератов

Результаты определения содержания несгоревшего алюминия в отдельных фракциях КППГ представлены в табл. 3, средние размеры агломератов D_{mn} — в табл. 4, интегральные массовые параметры — в табл. 5.

На рис. 4 приведены примеры массовых распределений частиц КППГ и несгоревшего алюминия в КППГ топлива Е12 в случае гашения у поверхности при $p = 0.1$ МПа.

Данные табл. 3–5 показывают, что поведение исследованных топлив следует «сценарию сильной агломерации» алюминия [27, 28], который характеризуется следующими особенностями.

- Размеры агломератов велики. В примере на рис. 4 $D_{max} = 2540$ мкм. При этом почти вся масса КППГ находится в диапазоне от 0 до $D_R = 800$ мкм и лишь небольшое число особо крупных агломератов имеют размер, превышающий D_R .

- Функция массового распределения $f(D)$ имеет локальный минимум, разделяющий мелкие частицы и агломераты (на рис. 4 $D_L = 119$ мкм).

Таблица 3

Содержание металлического алюминия в ситовых фракциях КПП

p , МПа	Геометрия	Массовое содержание, %, в фракциях, мкм						
		< 130	130 ÷ 300	300 ÷ 450	450 ÷ 600	600 ÷ 900	900 ÷ 960	> 960
Топливо E12								
0.1	A	1.76 ± 0.14	49.2 ± 0.2	46.8 ± 1.0	53.1 ± 0.9	46.9	49.3	
0.1	B	0.49 ± 0.02	51.2 ± 0.2	45.0 ± 0.3	41.6 ± 1.0	36.4	≈ 40.2	Нет фракции
0.1	C	2.3 ± 0.1	45 ± 2	44.8 ± 0.1	45.0 ± 1.5	39.9	24.6	
2.2	A	0.30 ± 0.06	47.8 ± 0.5	47.8 ± 1.3	≈ 47.3	≈ 40	33.7	
2.4	B	1.20 ± 0.03	45.7 ± 0.5	49.9 ± 0.3	≈ 44.5			
2.4	C	0.93 ± 0.06	38.0 ± 0.2	40.9 ± 0.2	≈ 36.8	≈ 27	≈ 27	
6.4	A	0.46 ± 0.04	22.8 ± 1.0	37.0 ± 0.4	≈ 27.0	≈ 26.3	≈ 27.5	
6.6	B	0.87 ± 0.08	26.6 ± 1.6	34.9 ± 0.1	≈ 26.8	≈ 29	≈ 10.6	
6.7	C	0.47 ± 0.02	23.8 ± 0.1	30.4 ± 0.1	≈ 24.4	≈ 23.2	27.2	
Топливо R								
0.1	A	0.83 ± 0.02	46.4 ± 0.8	41.3 ± 0.9	38.0 ± 0.1	36.8 ± 0.4	31.1	37.1
0.1	B	1.36 ± 0.01	49 ± 2	42.9 ± 0.2	38 ± 2	37.5 ± 0.5	36.6 ± 0.5	38.1 ± 0.9
0.1	C	0.82 ± 0.02	50.0 ± 0.7	42 ± 2	34.5 ± 0.1	35.8 ± 0.4	31.2 ± 0.7	31 ± 3
2.3	A	0.34 ± 0.01	44.4 ± 0.6	40.6 ± 0.7	41.5 ± 0.1	39.5 ± 0.8	≈ 9	
2.5	B	0.33 ± 0.04	43 ± 2	45.0 ± 0.1	42.2 ± 0.1	24.2 ± 0.1	≈ 9	Нет фракции
2.5	C	0.36 ± 0.02	36.8 ± 0.4	33.8 ± 0.2	34.2 ± 0.2	34.2 ± 0.2	≈ 26	29.8
6.5	A	0.77 ± 0.01	35.5 ± 0.1	33.5 ± 0.4	32.9 ± 0.4	30.0		
6.6	B	0.96 ± 0.01	27.3 ± 0.3	30.9 ± 0.3	33.3 ± 0.3	27.1	≈ 2.1	
6.7	C	0.34 ± 0.01	15.4 ± 0.2	17.8 ± 0.1	20.3 ± 0.5	18.0	15.7	

Примечания. Объединение ячеек таблицы соответствует объединению фракций с малой массой до проведения анализа.

В большинстве случаев представлены средние значения по двум-четырем независимым определениям. Если не указана величина стандартной ошибки, это означает, что масса фракции мала и анализ проведен лишь один раз.

Знак \approx означает низкую точность анализа вследствие малой массы фракции.

• Содержание несгоревшего алюминия в мелких частицах мало, так что они представляют собой преимущественно оксидные частицы. Во всех случаях частицы КПП фракции мельче 130 мкм содержат не более 2 % несгоревшего алюминия (см. табл. 3). Масса несгоревшего алюминия в мелких частицах m_f^{Al} (графа 7 в табл. 5) мала по отношению ко всей массе несгоревшего алюминия $m_{\text{ссп}}^{\text{Al}}$ (графа 4). Основная масса несгоревшего алюминия находится в агломератах, так что соотношение масс несгоревшего алюминия в агломератах $m_{\text{аг}}^{\text{Al}}$ (графа 10) и в мелких частицах m_f^{Al}

(графа 7) варьируется от 99 : 1 до 95 : 5 (графа 13). Это позволяет характеризовать эффективность горения алюминия полнотой сгорания агломератов ξ .

Сравним параметры КПП вблизи поверхности (отборы в геометрии A). Данные табл. 4 показывают, что для топлива E12 средний размер агломератов $D_{43} = 290 \div 405$ мкм, для топлива R существенно больше — $444 \div 800$ мкм. Масса агломератов топлива R больше ($m_{\text{аг}} = 0.16 \div 0.20$ для R, $m_{\text{аг}} = 0.11 \div 0.17$ для E12, графа 9 в табл. 5), и они в большинстве случаев (кроме $p = 0.1$ МПа) содержат больше

Таблица 4
Скорость горения и средние размеры агломератов D_{mn} ,
вычисленные в диапазоне $D_L \div D_R$, в зависимости от условий сжигания

p , МПа	Геометрия	r , мм/с	$D_L \div D_R$, мкм	D_{10}	D_{20}	D_{30}	D_{43}	D_{53}
				мкм				
Топливо E12								
0.1	A	1.0±0.1	119 ÷ 800	260	280	302	405	430
0.1	B		119 ÷ 779	275	294	314	404	426
0.1	C		127 ÷ 806	252	269	288	380	405
2.2	A	7.9±1.8	87 ÷ 790	238	249	260	311	325
2.4	B		95 ÷ 771	234	243	253	301	316
2.4	C		87 ÷ 662	222	231	241	290	306
6.4	A	13±2	127 ÷ 671	225	234	244	286	297
6.6	B		119 ÷ 671	207	215	224	272	288
6.7	C		44 ÷ 696	223	234	246	303	320
Топливо R								
0.1	A	1.0±0.1	55 ÷ 1978	331	383	445	800	889
0.1	B		55 ÷ 2087	317	368	433	807	907
0.1	C		55 ÷ 2081	304	350	409	755	846
2.3	A	6.2±0.5	55 ÷ 1385	300	328	357	499	538
2.5	B		24 ÷ 1329	303	329	356	487	525
2.5	C		11 ÷ 1382	301	329	360	502	540
6.5	A	10±2	55 ÷ 1017	282	306	330	444	473
6.6	B		24 ÷ 1343	270	288	308	400	429
6.7	C		18 ÷ 1581	305	325	347	457	496

Примечание. Абсолютная погрешность D_{mn} составляет $\pm(22 \div 40)$ мкм в зависимости от размера и обусловлена точностью измерения частиц под микроскопом [29].

несгоревшего алюминия ($m_{ag}^{Al} = 0.07$ для R, $m_{ag}^{Al} = 0.03 \div 0.05$ для E12, графа 10). Соотношение масс агломератов и мелких частиц для топлива E12 при $p = 2.5$ и 6.5 МПа составляет соответственно 30:70 и 32:68, а для топлива R — 46:54 и 57:43 (графа 12). Совокупность данных позволяет с уверенностью говорить о более сильной агломерации в случае топлива R.

Отметим, что в литературе имеются данные о том, что гексоген может вызывать более сильную агломерацию, чем октоген (например, для топлив Al/НТРВ/ПХА/нитрамин [21]). Размер агломератов для топлив E12 и R в среднем больше, чем для топлив с нит-

раминами в работах [22–24], где $D_{43} = 190 \div 510$ мкм. Однако в работах [21–24] в топливах использовано инертное связующее НТРВ, в данной работе — энергетическое на основе полибутадиен-нитрильного каучука, пластифицированного ДЭГДН. В [32] установлено, что природа связующего может оказывать существенное влияние на агломерацию. Так, замена инертного связующего изопреновый каучук + трансформаторное масло на указанное энергетическое вызвала снижение агломерации, однако замена части ПХА октогеном в топливе с этим связующим приводила к усилению агломерации [27, 28]. Фактически, мож-

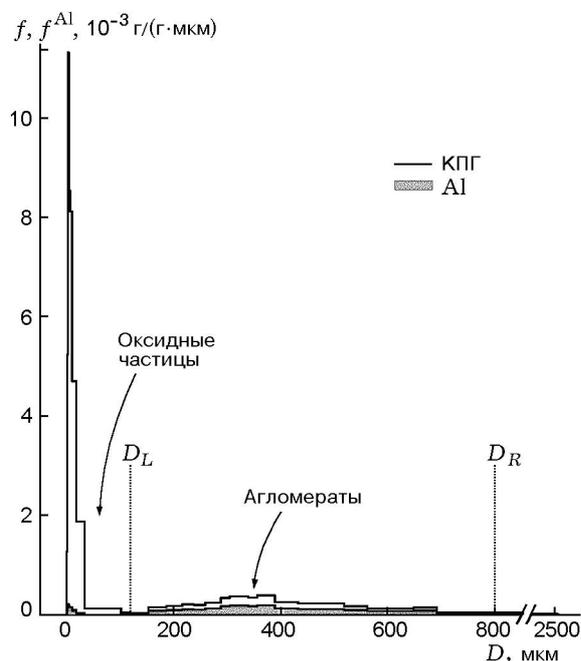


Рис. 4. Массовые распределения КПГ и несгоревшего алюминия в КПГ (затемненная область) по размерам в диапазоне от 0.5 мкм до максимального:

топливо E12, $p = 0.1$ МПа, геометрия A; размер D_L — левая граница распределения агломератов (условная граница между оксидными частицами и агломератами); размер D_R — правая граница распределения агломератов

но говорить о неблагоприятном сочетании октогена со связующим на основе полибутадиеннитрильного каучука и ДЭГДН.

Другая особенность рецептур топлив в данной работе по сравнению с [21–24] — большая массовая доля нитрамина (35 %), причем довольно крупного ($D_{10} \approx 490$ мкм у октогена, $D_{10} \approx 380$ мкм у гексогена). Поэтому можно было ожидать, что агломерация при горении топлив E12 и R будет сильной, но предсказать ее количественные характеристики и их изменение при замене октогена на гексоген, не проводя экспериментов, невозможно.

Для обоих топлив E12 и R наблюдается тенденция снижения размера агломератов с давлением, более выраженная для топлива R, что иллюстрирует рис. 5. Во всех случаях размер агломератов D_{43} для топлива с гексогеном больше, чем для топлива с октогеном, несмотря на обратное соотношение размеров частиц гексогена и октогена. Изменение размера агломератов в зависимости от давления обычно связывают со скоростью горения. Действительно,

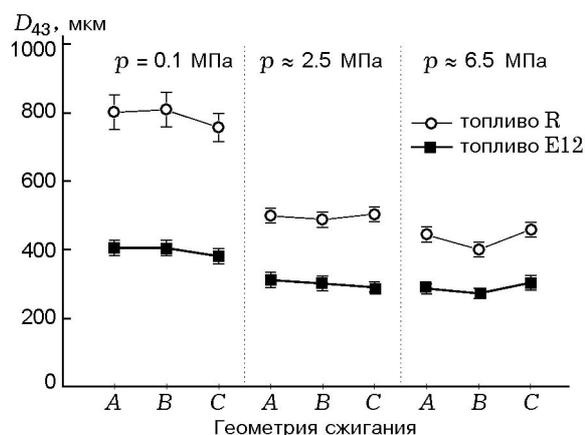


Рис. 5. Сравнение средних размеров D_{43} агломератов топлив E12 и R, отобранных при вариации давления и геометрии сжигания

чем выше скорость горения, тем тоньше прогретый слой топлива и меньше время пребывания частиц алюминия в этом слое. Однако при $p = 0.1$ МПа скорости горения топлив E12 и R близки ($r \approx 1$ мм/с), а размер агломератов D_{43} в геометрии A составляет соответственно 405 и 800 мкм. Этот факт указывает на влияние иных факторов, кроме геометрической структуры топлив и скорости горения.

В [23] для топлив ПХА/Al/НТРВ/нитрамин предложена корреляционная зависимость, связывающая размер агломератов D_{43} [мкм] со скоростью горения r [мм/с] и массовым содержанием ПХА в топливе α_{ap} : $D_{43} = 118.8/r\alpha_{ap}^2 + 146.5$. Эта зависимость удовлетворительно (коэффициент детерминации* $R^2 = 0.575$) аппроксимирует всю совокупность данных [22, 23] (83 точки для топлив с октогеном и гексогеном в следующем диапазоне параметров: содержание нитрамина $0 \div 20$ %, ПХА $54 \div 71$ %, Al $16 \div 20$ %; $r = 3.4 \div 14.5$ мм/с). Топлива E12 и R не подчиняются этой зависимости, по-видимому, из-за особенностей их рецептуры (35 % крупного нитрамина, энергетическое связующее). При этом для каждого из них имеется корреляция между величиной $1/r$ и размером агломератов D_{43} .

Геометрическую структуру исследуемых топлив можно представить в виде касающихся друг друга частиц нитрамина — самого крупного порошкообразного компонента, меж-

*Определение коэффициента детерминации см., например, в [33, с. 167].

Таблица 6
Некоторые свойства и параметры горения гексогена и октогена

Нитрамин	ρ , г/см ³ [5]	T_m , °С*, [5]	Q , кал/г [5]	r , мм/с [34]	L , мкм [34]
Гексоген C ₃ H ₆ N ₆ O ₆	1.82	205	-66	0.5 (0.1 МПа) 5 (2 МПа) 18 (9 МПа)	120 (0.1 МПа) 20 (2 МПа) 15 (9 МПа)
Октоген C ₄ H ₈ N ₈ O ₈	1.9	285	-61	0.35 (0.1 МПа) 4 (2 МПа) 10 (7 МПа)	70 (0.1 МПа) 20 (2 МПа) 15 (7 МПа)

Примечание. *Совпадает с температурой начала разложения [5].
 ρ — плотность, T_m — температура плавления, Q — стандартная теплота образования, r — скорость горения, L — толщина расплавленного слоя.

ду которыми заключено связующее с наполнителем — частицами алюминия и ПХА меньшего размера. Следуя [2], предположим, что частицы нитрамина и связующее с наполнителем горят со своей скоростью, а скорость горения топлива есть некоторое среднее этих скоростей. Скорость горения чистых нитраминов (табл. 6) при соответствующих давлениях меньше скорости горения исследуемых топлив (см. табл. 4), что указывает на определяющую роль скорости горения связующего с наполнителем. Согласно данным [34] (см. табл. 6) толщина расплавленного слоя при горении чистых нитраминов при $p = 0.2 \div 0.7$ МПа составляет $20 \div 15$ мкм, а при $p = 0.1$ МПа — 70 мкм у октогена и 120 мкм у гексогена. При горении нитрамина в составе топлив E12 и R эта толщина может быть меньше, так как скорость горения топлив выше, чем у нитраминов. Во всяком случае, толщина расплавленного слоя составляет долю диаметра частицы. Частицы нитрамина могут выступать над поверхностью горения и частично диспергироваться. Это подтверждается наличием таких частиц среди отобранных КПП. В итоге образование крупных агломератов при горении топлив E12 и R нельзя объяснить наличием расплавленного слоя нитрамина, как это сделано в [23] для топлив с нитраминами размером $20 \div 255$ мкм.

Выгорание и эволюция агломератов

На рис. 6 показаны зависимости неполноты сгорания алюминия от времени пребывания агломератов в пламени. На рис. 7 в качестве примера представлены массовые распределения агломератов, отобранных при вариации

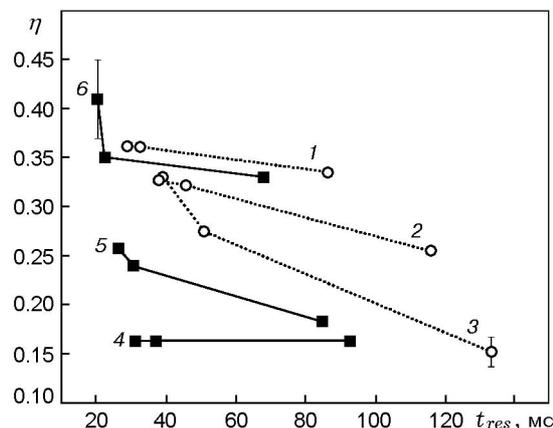


Рис. 6. Динамика выгорания алюминия из совокупности агломератов топлив E12 и R: зависимости неполноты сгорания алюминия η от времени пребывания t_{res} :

1 — топливо R, $p = 0.1$ МПа; 2 — топливо R, $p = 2.3 \div 2.5$ МПа; 3 — топливо R, $p = 6.5 \div 6.7$ МПа; 4 — топливо E12, $p = 6.4 \div 6.7$ МПа; 5 — топливо E12, $p = 2.2 \div 2.4$ МПа; 6 — топливо E12, $p = 0.1$ МПа

ции геометрии сжигания при $p \approx 2.4$ МПа. Средние размеры агломератов даны в табл. 4, поведение средних размеров D_{43} иллюстрирует рис. 5.

Анализ данных показывает, что во всех случаях массовые распределения агломератов не претерпевают значительных изменений при удалении от поверхности горения. Масса агломератов m_{ag} (графа 9 в табл. 5) сильнее меняется с давлением, чем при вариации геометрии сжигания при фиксированном давлении. Вместе с тем количество металлического алюминия в агломератах убывает со временем (см. рис. 6). Слабое изменение массы агломератов

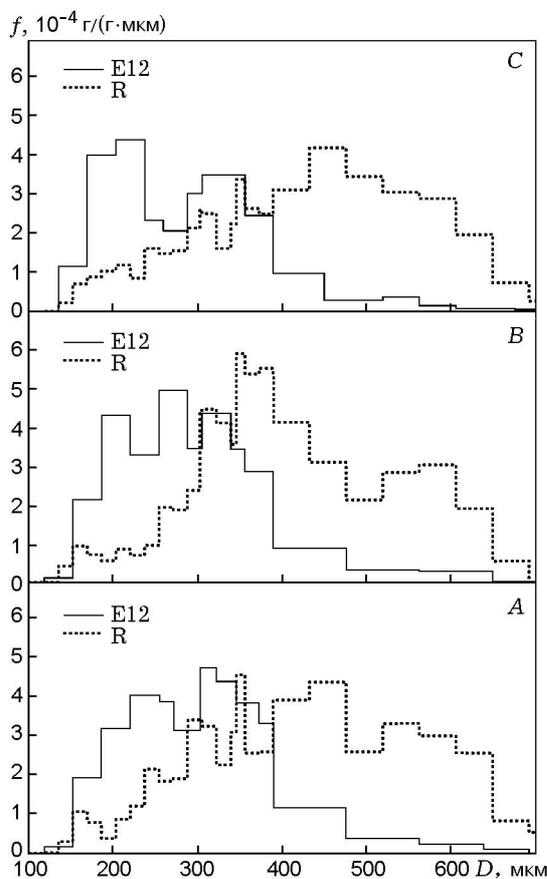


Рис. 7. Массовые распределения агломератов топлив E12 и R в диапазоне размеров 100 ÷ 700 мкм при вариации геометрии опытов:

$p \approx 2.5$ МПа, время пребывания увеличивается в последовательности A → B → C

при выгорании объясняется тем, что происходит замещение металлического алюминия оксидом. Иными словами, часть образованного оксида не удаляется во внешний поток, а остается на агломерате. Это явление будет рассмотрено ниже.

Приведем некоторые данные [24], где методом отбора в бомбе с вращающимся барабаном [35] изучали эволюцию горящих агломератов топлива, состоящего из 49.5 % ПХА, 21.4 % гексогена, 12 % НТРВ и 17 % Al. Диаметр образцов в [24] составлял 6.28 мм, длина — 10 мм, в экспериментах варьировали давление (2.3 или 7 МПа), размер частиц алюминия (7, 17 или 30 мкм) и дистанцию гашения частиц (7, 17, ... , 77 мм).

Авторы [24] обнаружили, что размер агломератов существенно уменьшается на сравнительно небольшом расстоянии от поверхности

горения, а затем практически не изменяется. Так, при $p = 2.3$ МПа для дистанции гашения 7 мм размер D_{43} был равен 510 мкм, а для дистанций 17 ÷ 77 мм $D_{43} = 338 \div 405$ мкм. При $p = 7$ МПа $D_{43} = 303 \div 312$ мкм для дистанций 7 и 17 мм и $D_{43} = 191 \div 217$ мкм для дистанций 27 ÷ 77 мм. В обоих случаях речь идет о разбросе данных в указанных диапазонах, а не о монотонном изменении размера D_{43} . Изменение полноты сгорания алюминия ξ при увеличении дистанции гашения в [24] также имело характер разброса, а не монотонного увеличения. Осредненные значения составляют $\xi = 0.637 \pm 0.031$ для $p = 2.3$ МПа и дистанций 17 ÷ 77 мм и $\xi = 0.655 \pm 0.023$ для $p = 7$ МПа и дистанций 27 ÷ 77 мм. Результаты для более коротких дистанций в [24] не приведены.

Сравнивая результаты [24] с нашими, отметим следующее.

- Гашение частиц в [24] осуществлялось в жидкости, а в данной работе — в спутном потоке газа. С учетом длины начального участка смешения L_{mix} (см. рис. 3) минимальную дистанцию гашения в наших экспериментах можно оценить значением 20 ÷ 30 мм. По данным [24] размер агломератов D_{43} после удаления от поверхности на 17 ÷ 27 мм уже не изменяется. По нашим данным изменение D_{43} на дистанции 20 ÷ 130 мм также незначительно (в пределах погрешности).

- Зарегистрированное в [24] изменение D_{43} с 300 до 200 мкм (при $p = 7$ МПа) на расстоянии 17 ÷ 27 мм нельзя объяснить только выгоранием алюминия. Столь значительное изменение размера, вероятно, связано с изменением эффективной плотности агломератов [35].

- В [24] не наблюдалось изменения содержания непрореагировавшего алюминия при удалении от поверхности горения. В совокупности с данными о размере частиц это свидетельствует о прекращении горения агломератов в условиях работы [24]. Напротив, в условиях нашей работы в большинстве случаев агломераты продолжают гореть, о чем свидетельствуют данные на рис. 6. Единственный случай, когда содержание металлического алюминия наименьшее и не изменяется со временем, реализуется при горении топлива E12 при $p = 6.5$ МПа в условиях, способствующих выгоранию металла — максимальное давление, минимальный размер агломератов. Данный факт согласуется с результатами [36], где показано,

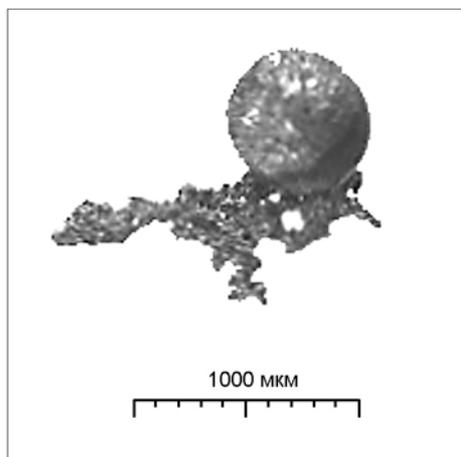


Рис. 8. Агломерат с примыкающими образованиями из полуспеченных частиц металла, обеспечивающими его удержание на поверхности горения:

топливо R, геометрия A, $p = 0.1$ МПа, частица из фракции $450 \div 600$ мкм

что увеличение давления способствует выгоранию алюминия и что агломераты меньшего размера за один и тот же промежуток времени достигают большей глубины превращения, чем крупные (содержат меньше непрореагировавшего алюминия).

• В работе [24] размер агломератов D_{43} был в диапазоне $190 \div 510$ мкм и их выгорание закончилось. В наших экспериментах закончилось выгорание агломератов с $D_{43} = 290$ мкм, а агломераты с $D_{43} = 310 \div 800$ мкм продолжали гореть. Кроме того, имеется очевидное (см. рис. 6) различие в динамике выгорания совокупности агломератов топлив E12 и R. Это подтверждает вывод о том, что процесс выгорания зависит от давления и размера агломерата. Можно предположить, что процесс выгорания зависит еще и от структуры агломерата. Один из основных параметров, характеризующих состояние (структуру) агломерата — соотношение масс непрореагировавшего алюминия и оксида алюминия. Разумно полагать, что это соотношение изменяется в процессе выгорания агломерата и его начальное значение определяется процессом агломерации, т. е. зависит от свойств топлива и условий горения. Анализируя данные табл. 3 для геометрии A, можно заметить, что содержание металлического алюминия во фракциях в диапазоне $130 \div 600$ мкм изменяется с давлением, но для каж-

дого уровня давления имеет близкие значения. Например, для топлива E12 при $p = 2.2$ МПа содержание алюминия во фракциях $130 \div 300$, $300 \div 450$, $450 \div 600$ мкм составляет соответственно 47.8, 47.8, 47.3 %. Гипотетическое объяснение близости величин содержания алюминия в покидающих поверхности агломератах разного размера состоит в следующем. Предположим, что приповерхностный слой топлива обогащен металлом и в этом слое происходит гетерогенное окисление алюминия продуктами разложения связующего, ПХА и нитрамина [26]. Степень превращения алюминия зависит от давления и структуры топлива. Отрыв фрагментов этого слоя приводит к формированию агломератов с содержанием металлического алюминия, соответствующим состоянию слоя. Вследствие гетерогенности топлива слой неоднороден и поверхность горения негладкая. При достижении температуры плавления алюминия на каком-либо участке слоя, например, на выступающем в газовую фазу, последний приобретает сферическую форму, продолжая удерживаться на поверхности «корнями» из спеченных частиц алюминия (рис. 8). В это время возможен рост агломерата за счет поглощения новых порций металла. Условие отрыва агломерата — разрушение удерживающей связи со слоем. Воспламенение агломерата, т. е. переход от гетерогенного окисления к парофазному горению, приводит к немедленному отрыву агломерата. Однако отрыв может произойти и до воспламенения, если аэродинамическая сила, действующая на агломерат со стороны оттекающего газа, превысит силу, удерживающую агломерат на поверхности. Удерживающая сила определяется прочностью перемычки, состоящей из спеченных частиц алюминия. Анализ баланса сил в описанной ситуации проведен в [37]. Естественно задать вопрос: чем определяется прочность перемычки для исследуемых топлив? Парно сравнивая данные табл. 3 для топлив E12 и R при $p = 0.1$ и 2.5 МПа в геометрии A, видим, что в одних и тех же фракциях в большинстве случаев у топлива R содержание металлического алюминия меньше, чем у топлива E12. Это свидетельствует о более интенсивном окислении алюминия в конденсированной фазе в случае топлива R, что, вероятно, обусловлено тем, что гексоген начинает реагировать при более низкой температуре, чем октоген (см. табл. 6). В то же время при $p = 6.5$ МПа, напротив, содержа-

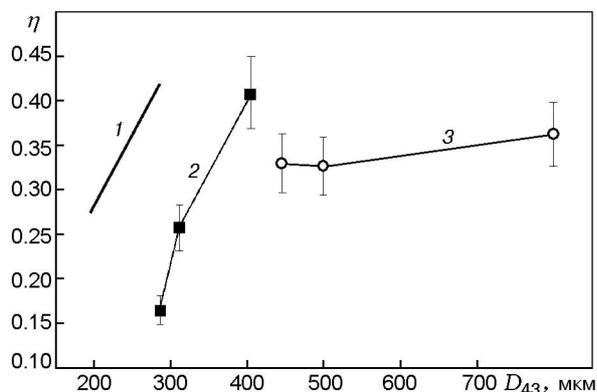


Рис. 9. Зависимость неполноты сгорания алюминия от размера агломератов:

1 — корреляция из [24], $p = 0.1 \div 7$ МПа; 2, 3 — данные настоящей работы, отборы в геометрии A, точки соответствуют давлениям $p = 6.4, 2.2, 0.1$ МПа, кривая 2 — топливо E12, кривая 3 — топливо R; для всех кривых давление возрастает справа налево (при увеличении давления η убывает)

ние алюминия во фракциях КППГ $130 \div 900$ мкм несколько выше у топлива E12. Возможно, это связано с различием в скорости горения топлив ($r = 13$ мм/с для E12, $r = 10$ мм/с для R). При прочих равных условиях, чем больше скорость горения, тем больше величина отрывающей аэродинамической силы, что может приводить к более раннему отрыву агломерата с большим содержанием несгоревшего алюминия.

Представленные данные позволяют предположить, что прочность удерживающей связи возрастает с увеличением полноты окисления металла в приповерхностном слое. Тогда можно ожидать, что размер агломератов будет тем больше, чем больше содержание оксида в агломератах. Действительно, соответствующая корреляция имеет место в [23] для топлив, состоящих из 54 % ПХА, 18 % гексогена, 16 % Al и 12 % НТРВ. В [23] исследовано 13 топлив указанного состава при вариации размера ПХА (частичная замена частиц 400 мкм на 225, 90, или 25 мкм), размера гексогена (полная замена частиц 100 мкм на 50 или 15 мкм), размера алюминия (5 или 15 мкм).

Корреляция из [23] в виде зависимости неполноты сгорания η от размера агломератов D_{43} представлена на рис. 9 наряду с данными для топлив E12 и R. Обратим внимание, что диапазон вариации η и D_{43} для топлив E12 и R намного шире, чем для 13 топлив в [23]. Напомним, что при вычислении η используют-

ся не только данные химического анализа (см. табл. 3), но и массовые распределения. Масса агломератов m_{ag} в большинстве случаев у топлива R больше, чем у топлива E12 (см. графу 9 в табл. 5), т. е. при горении топлива R большая доля металла участвует в образовании агломератов. Поэтому для топлив E12 и R реализуются разные зависимости $\eta(D_{43})$, что связано с особенностями поведения нитрамино в волне горения.

Продолжая анализ данных табл. 3, отметим, что при удалении от поверхности горения (отборы в геометрии B и C), содержание металлического алюминия в агломератах во фракциях $130 \div 300, 300 \div 450, 450 \div 600$ мкм становится различным. Очевидно, это связано с выгоранием агломератов. Стартуя с поверхности горения с примерно одинаковым содержанием алюминия, агломераты разных размеров в дальнейшем эволюционируют по-разному. С одной стороны, крупные агломераты медленно ускоряются и больше времени находятся на дистанции гашения, с другой стороны — скорость выгорания (расходования) алюминия у них меньше [36].

Эволюция агломерата и накопление оксида на его поверхности

Накопление конденсированного оксида в форме колпачка на поверхности — важная особенность процесса горения алюминиевой частицы (и агломерата). Эту особенность обычно характеризуют параметром φ , равным отношению массы оксида, аккумулированного на горячей частице, к общей массе оксида, образованного при горении этой частицы [36].

В данной работе представительность отборов близка к 100 %, что дает возможность рассчитать среднюю величину φ для совокупности агломератов (графа 14 в табл. 5).

Следуя [36], будем рассматривать полноту сгорания ξ как параметр, характеризующий состояние агломерата, абстрагируясь от факторов, под действием которых достигнута измеренная величина ξ . На рис. 10 представлена зависимость $\varphi(\xi)$. Точки на графике соответствуют всем проведенным экспериментам (топлива E12 и R, $D_{10} \approx 210 \div 330$ мкм; $p = 0.1 \div 6.5$ МПа; геометрии A, B, C), прямая 1 — аппроксимация совокупности данных линейной зависимостью $\varphi(\xi) = (0.91 \pm 0.18) - (0.79 \pm 0.24)\xi$, коэффициент детерминации $R^2 = 0.40$. На рис. 10 также приведены

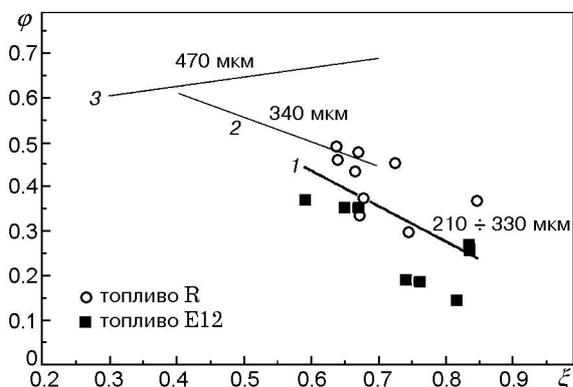


Рис. 10. Влияние размера агломератов на зависимость $\varphi(\xi)$:

кружки — топливо R, квадраты — топливо E12; 1 — аппроксимация всего набора точек для топлив E12 и R (отборы в геометрии A, B, C; $p = 0.1 \div 6.7$ МПа; $D_{10} \approx 210 \div 330$ мкм); 2, 3 — аппроксимационные зависимости из [36] для монодисперсных агломератов с $D_{10} \approx 340$ и 470 мкм соответственно

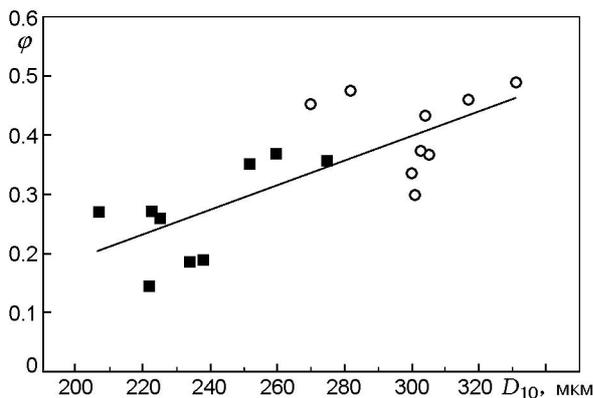


Рис. 11. Зависимость $\varphi(D_{10})$:

квадраты — топливо E12, кружки — топливо R, прямая — аппроксимация всего набора точек

аппроксимационные зависимости $\varphi(\xi)$ для монодисперсных агломератов с $D \approx 340$ мкм при $p = 0.19 \div 6.2$ МПа (прямая 2) и с $D \approx 470$ мкм при $p = 0.1 \div 7$ МПа (прямая 3) из [36]. Сравнение зависимости 1–3, можно заключить, что размер агломератов является ключевым физическим фактором, управляющим соотношением масс накопленного и удаленного оксида.

На рис. 11 представлены зависимости параметра φ от размера агломератов D_{10} . Размеры агломератов для топлив E12 и R существенно различны ($D_{10} \approx 210 \div 280$ мкм для E12 и $D_{10} \approx 270 \div 330$ мкм для R). Расположение точек на рис. 11 таково, что можно говорить о единой зависимости $\varphi(D_{10})$ для обо-

их топлив. Линейная аппроксимация зависимости $\varphi(D_{10})$ для всего набора точек (прямая на рис. 11) имеет вид $\varphi(D_{10}) = -(0.22 \pm 0.12) + (0.0020 \pm 0.0004)D_{10}$, коэффициент детерминации $R^2 = 0.58$.

Полученный результат указывает на то, что эволюция агломератов топлив E12 и R подчиняется одним и тем же закономерностям. Иными словами, если бы они имели один и тот же размер, то и их выгорание в одинаковых условиях было бы одинаково.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диапазоне давлений $0.1 \div 6.5$ МПа топлива E12 и R характеризуются сильной агломерацией алюминия, что связано с особенностями их рецептуры (35 % крупного нитрамина в сочетании с активным связующим).

Несмотря на то, что скорости горения топлив в одинаковых условиях сопоставимы и размер частиц октогена в топливе E12 примерно в полтора раза больше, чем у частиц гексогена в топливе R, топливо с гексогеном характеризуется более сильной агломерацией: размер и масса агломератов больше, полнота сгорания алюминия меньше. Формирование агломератов большего размера при меньшем размере частиц нитрамина не соответствует представлениям о карманном механизме агломерации и связано с особенностями поведения октогена и гексогена в волне горения. Реагирование гексогена начинается при меньшей температуре. Предположительно, это приводит к более активному окислению алюминия в гетерогенном режиме в конденсированной фазе и образующийся при этом оксид способствует удержанию агломератов на поверхности.

Макрокинетические закономерности выгорания совокупности агломератов (т. е. скорости расходования алюминия в процессе превращения в оксид) для топлив E12 и R различны. В условиях проведенных экспериментов при давлении 6.5 МПа для обоих топлив реализуется достаточно высокая полнота сгорания алюминия $\xi \approx 0.85$. Однако в случае топлива E12 указанное значение достигается примерно за 30 мс, а для топлива R — за 130 мс. Наблюдаемые отличия в динамике выгорания обусловлены различиями начальных параметров агломератов — размера и содержания алюминия в момент отрыва от поверхности.

При горении агломератов образующийся оксид алюминия частично остается на агло-

мерате. Вследствие замещения алюминия оксидом массовые распределения агломератов в исследованном диапазоне параметров слабо меняются во времени, несмотря на существенное изменение полноты сгорания алюминия. Отношение массы оксида, аккумулированного на горячей частице, к общей массе образованного оксида зависит от размера горячей частицы.

Автор выражает благодарность О. Н. Житницкой, Т. Д. Федотовой и А. Г. Кирьяновой за проведение гранулометрического и химического анализов, а также В. Е. Зарко, Л. К. Гусаченко и А. Г. Терещенко за плодотворные дискуссии.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Комаров В. Ф., Шандаков В. А.** Твердые топлива, их особенности и области применения // Физика горения и взрыва. 1999. Т. 35, № 2. С. 30–34.
2. **Lengellé G., Duterque J.-R., Godon J.-C., Trubert J.-F.** Solid propellant combustion — physical aspects // AGARD Lecture Series 180 — Combustion of Solid Propellants. NATO Edition. 1991. P. 3-1–3-25.
3. **Забелин Л. В., Гафиятуллин Р. В., Гусева Л. Р.** Экологические аспекты проблемы утилизации зарядов твердотопливных ракетных двигателей (РДТТ) // Химия в России. 1999, февраль. С. 4–7.
4. **Октоген** — термостойкое взрывчатое вещество. М.: Недра, 1975.
5. **Chan M. L., Reed R. Jr, Ciaramitaro D. A.** Advances in solid propellant formulations // Solid Propellant Chemistry, Combustion, and Motor Interior Ballistics (Progress in Astronautics and Aeronautics; V. 185) / V. Yang, T. B. Brill, Wu-Zhen Ren (Eds). Reston, VA: AIAA Inc., 2000. Ch. 1.7. P. 185–206.
6. **Boggs T. L.** The thermal behavior of RDX and HMX // Fundamentals of Solid Propellant Combustion (Progress in Astronautics and Aeronautics; V. 90) / K. K. Kuo, M. Summerfield (Eds). New York: AIAA, 1984. P. 121–175.
7. **Fifer R. A.** Chemistry of nitrate ester and nitramine propellants // Ibid. P. 177–237.
8. **Ермолин Н. Е., Зарко В. Е.** Механизм и кинетика термического разложения циклических нитраминов (обзор) // Физика горения и взрыва. 1997. Т. 33, № 3. С. 10–31.
9. **J. Propulsion and Power.** 1995. V. 11, N 4.
10. **J. Propulsion and Power.** 1999. V. 15, N 6.
11. **Симоненко В. Н., Кискин А. Б., Зарко В. Е., Свит А. Г.** Особенности горения нитраминов при атмосферном давлении // Физика горения и взрыва. 1997. Т. 33, № 6. С. 68–71.
12. **Ермолин Н. Е., Зарко В. Е.** Исследование свойств кинетического механизма для описания химической структуры пламени гексогена. II. Построение укороченной кинетической схемы // Физика горения и взрыва. 2001. Т. 37, № 3. С. 3–11.
13. **Зенин А. А., Пучков В. М., Финяков С. В.** Характеристики волн горения октогена при различных давлениях и начальных температурах // Физика горения и взрыва. 1998. Т. 34, № 2. С. 59–66.
14. **Коробейничев О. П., Куйбида Л. В., Мадирбаев В. Ж.** Исследование химической структуры пламени октогена // Физика горения и взрыва. 1984. Т. 20, № 3. С. 43–46.
15. **Ермолин Н. Е., Коробейничев О. П., Куйбида Л. В., Фомин В. М.** Анализ химических процессов в пламени гексогена // Физика горения и взрыва. 1988. Т. 24, № 4. С. 21–29.
16. **Glotov O. G., Karasev V. V., Zarko V. E., Svit A. G.** Burning of single crystals and pressed tablets of RDX // Energetic Materials: Reactions of Propellants, Explosives and Pyrotechnics. 34th Intern. Annual Conf. of ICT. Karlsruhe, Germany, 2003. P. 47-1–47-15.
17. **Duterque J., Lengellé G.** Combustion mechanisms of nitramine-based solid propellants with additives // J. Propulsion and Power. 1990. V. 6, N 6. P. 718–726.
18. **Hsieh W. H., Li W. Y.** Combustion behavior and thermochemical properties of RDX-based solid propellants // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. 1998. V. 23, N 3. P. 128–136.
19. **Денисюк А. П., Шепелев Ю. Г., Русин Д. Л., Шумский И. В.** Влияние гексогена и октогена на эффективность действия катализаторов горения баллистических порохов // Физика горения и взрыва. 2001. Т. 37, № 2. С. 77–83.
20. **Muthiah Rm., Varghese T. L., Rao S. S., et al.** Realization of an eco-friendly solid propellant based on HTPB-HMX-AP system for launch vehicle applications // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. 1998. V. 23, N 2. P. 90–93.
21. **Брандидж В. Н., Кавени Л.** Медленногорящие топлива в поле перегрузок // Ракетная техника и космонавтика. 1985. Т. 3, № 1. С. 47–58.
22. **Suzuki S., Chiba M.** Combustion efficiency of aluminized propellants // AIAA Paper. 1989. N 89-2309. P. 1–8.
23. **Liu T.-K., Perng H.-C., Luh S.-P., Liu F.** Aluminum agglomeration in AP/RDX/Al/HTPB propellant combustion // J. Propulsion and Power. 1992. V. 8, N 6. P. 1177–1184.
24. **Liu T.-K., Hsieh C.-F.** 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.
25. **Luh S.-P., Liu T.-K., Perng H.-C., Liu F.** Pocket model application to the combustion of

- AP/RDX/Al/HTPB propellant // AIAA Paper. 1995. N 95-3110. P. 1–6.
26. **Zhu Ji, Li Shufen.** Aluminum oxidation in nitramine propellant // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. 1999. V. 24, N 4. P. 224–226.
 27. **Glotov O. G., Zarko V. E., Karasev V. V., Beckstead M. W.** Aluminum agglomeration in solid propellants: Formulation effects // Propellants, Explosives, Rockets, and Guns. 2nd Intern. High Energy Materials Conf. and Exhibit, December 8–10, 1998. IIT Madras, Chennai, India. P. 131–137.
 28. **Glotov O. G., Zarko V. E.** Condensed combustion products of aluminized propellants // Trans. of the Aeronaut. and Astronaut. Soc. of the Republic of China. 2002. V. 34, N 3. P. 247–256.
 29. **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.
 30. **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.
 31. **Глотов О. Г.** Конденсированные продукты горения алюминизированных топлив. II. Эволюция частиц при удалении от поверхности горения // Физика горения и взрыва. 2000. Т. 36, № 4. С. 66–78.
 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. P. 75-1–75-14.
 33. **Афифи А., Эйзен С.** Статистический анализ. Подход с использованием ЭВМ. М.: Мир, 1982.
 34. **Zenin A.** HMX and RDX: Combustion mechanism and influence on modern double-base propellant combustion // J. Propulsion and Power. 1995. V. 11, N 4. P. 752–758.
 35. **Фролов Ю. В., Похил П. Ф., Логачев В. С.** Воспламенение и горение порошкообразного алюминия в высокотемпературных газовых средах и в составе гетерогенных конденсированных систем // Физика горения и взрыва. 1972. Т. 8, № 2. С. 213–236.
 36. **Глотов О. Г., Зарко В. Е., Карасев В. В. и др.** Макрокинетика горения монодисперсных агломератов в факеле модельного твердого топлива // Физика горения и взрыва. 2003. Т. 39, № 5. С. 74–85.
 37. **Зырянов В. Я.** Модель для прогнозирования агломерации при горении металлизированных систем // Горение конденсированных систем. Черногловка: Изд-во ОИХФ АН СССР, 1986. С. 59–62.

*Поступила в редакцию 5/VII 2004 г.,
в окончательном варианте — 6/III 2006 г.*