

ции (33) и

$$v_2 v_F F + v_1 v_P P = (v_1 + v_2) \cdot v_R R. \quad (35)$$

Поэтому, если окислитель реагирует в диффузионном режиме, то в (16)

$$S = Q_1 Y_O^\infty + Q_p Y_p^\infty, \quad (36)$$

причем из уравнений (34), (35) вытекает, что

$$Q_p = (\mu_0 v_2 / \mu_F v_P) \cdot (Q_1 - Q_2). \quad (37)$$

Здесь Q_1 и Q_2 — тепловые эффекты на единицу массы окислителя реакций (33) и (34) соответственно, Q_p — тепловой эффект на единицу массы окисла P , рассчитанный по уравнению (35). Выражения (36) и (37) показывают, что в данном случае в зависимости от соотношения между тепловыми эффектами реакций (33) и (34) присутствие в атмосфере окисла P увеличивает или уменьшает величину скорости горения. Отсюда видно, что полученные в работе общие результаты позволяют в ряде случаев определить влияние на скорость горения отдельных факторов, минуя детальное рассмотрение механизма этого влияния.

В заключение автор благодарит Б. И. Хайкина и В. Г. Абрамова за ценные советы и обсуждения.

Поступила в редакцию
13 III 1973

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. А. Варшавский. Диффузионная теория горения капли. М., БНТ МАП, 1945.
2. Ф. А. Вильямс. Теория горения. М., «Наука», 1971.
3. Л. Лиц. В сб. «Газодинамика и теплообмен при наличии химических реакций». Под ред. В. П. Мотуловича и В. П. Ионова. М., ИЛ, 1962.
4. И. М. Гельфанд. Лекции по линейной алгебре. М., «Наука», 1966.
5. J. Loggel, H. Wise, R. E. Clegg. J. Chem. Phys., 1965, 25, 2, 325.
6. F. A. Williams. Combustion and Flame, 1961, 5, 2, 207.
7. Ф. А. Агафонова, М. А. Гуревич, И. И. Палеев. ЖТФ, 1957, 27, 8, 1818.
8. М. А. Гуревич, А. М. Степанов. ФГВ, 1970, 6, 2, 243.

УДК 629.194.362.1 : 536.46

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗМЕРОВ КАПЕЛЬ ОКИСИ АЛЮМИНИЯ ВБЛИЗИ ГОРЯЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ТОПЛИВА

Л. П. Бахир, Г. И. Левашенко

(Минск)

Частицы окиси алюминия, образующиеся при горении алюминизированных конденсированных систем, характеризуются очень широкими распределениями частиц по размерам [1—3]. Ранее было показано [3, 4], что для расчета спектральных характеристик излучения пламен алюминизированных топлив в видимой и инфракрасной областях спектра необходимы точные сведения о форме кривой распределения по размерам частиц Al_2O_3 не только вблизи максимума числовых функций распределения, но и во всей области определения весовой функции, где количество частиц на 4—6 порядков меньше, чем в максимуме.

Для получения необходимой информации о размерах частиц окислов металлов в пламени при изучении влияния дисперсного состава частиц на спектральные характеристики излучения пламен был разработан способ отбора частиц при сжигании небольших образцов металлизированных топлив в камере постоянного давления [5]. Поскольку способ обеспечивает улавливание с помощью металлокерамического фильтра почти всех частиц, образовавшихся при горении, вопрос о представительности в отобранный пробе частиц окислов различных размеров был решен однозначно. В настоящей работе с помощью указанного способа отбора, с последующими измерениями размеров частиц на электронном и оптическом микроскопах, исследовано изменение гранулометрического состава капель Al_2O_3 вблизи поверхности образца по высоте пламени, а также в зависимости от концентрации алюминия в исходной смеси. Полученные с целью расчета спектральных характеристик пламени данные о гранулометрическом составе капель представляют определенный интерес для понимания процессов коагуляции, происходящих при горении алюминия в конденсированных системах.

Исследования были выполнены для двух составов, содержащих перхлорат аммония, каучук и алюминиевый порошок АСД-1 в количестве 5 и 15%. Использовались образцы топлив диаметром 20 мм и высотой 10 мм, бронированные шестью слоями 3%-го раствора органического стекла в дихлорэтане и помещенные в цилиндрические втулки из органического стекла с толщиной стенок 2 мм. Для изменения времени пребывания частиц в пламени и отбора частиц с различных высот пламени на втулку из оргстекла надевались керамические трубы с внутренним диаметром 20 мм, высотой 30 и 60 мм. Коэффициенты избытка окислителя α для указанных составов были достаточно высокими — 0,51 и 0,46, что обеспечивало практически полное сгорание алюминия уже в непосредственной близости от поверхности образца.

Химический анализ пробы продуктов сгорания, отобранный при горении состава с 15% АСД-1 без поправки, показал, что в ней содержится 96% $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, 2% $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, 1% Al и углерод, т. е. недогорание не превышает 3%. Температуры горения для указанных составов существенно превышали температуру плавления Al_2O_3 и составляли 2460 и 2980° К.

Образцы сжигались с торца в камере постоянного давления в среде азота при давлении 40 атм. Для равномерного воспламенения и горения образцов параллельными слоями на их торцевой поверхности наносились радиальные риски. При горении образца продукты сгорания охлаждались в результате турбулентного смешивания с азотом и затем пропускались через металлокерамический фильтр, установленный на высоте 200 мм над образцом. В качестве фильтрующего элемента использовалась металлокерамическая пластинка диаметром 75 мм, толщиной 2,5 мм, изготовленная прокаткой из порошка титана. Путем улавливания частиц на коллоидную пленку, установленную после фильтра, и просмотра ее под электронным микроскопом было установлено, что через фильтр проходили только частицы диаметром меньше 0,07 мкм. Следует заметить, что фильтрующие элементы, изготовленные из никеля и особенно из нержавеющей стали, были недостаточно химически стойкими к продуктам сгорания, быстро окислялись и становились непригодными для дальнейшего использования. Частицы из фильтра извлекались ультразвуком в спирт, который затем сжигался, а твердый остаток прокаливался. Отобранные пробы приобретали белый цвет, их вес составлял не менее 90% от расчетного.

Учитывая возможные потери частиц при отборе, полагаем, что отличие между распределениями частиц в продуктах сгорания перед фильтром и в пробе в диапазоне размеров $0,07 \div 10$ мкм не превышает 5%.

Таблица 1

Параметры	Единицы измерения	# проб			
		1	2	3	4
g_{Al}	%	5	15	15	15
T_r	°К	2460	2980	2980	2980
$G_{\text{Al}_2\text{O}_3}$	мг/см³	0,45	1,57	1,57	1,57
u	мм/с	7,1	7,3	7,3	7,3
w_r	м/с	2,30	2,4	2,4	2,4
h_{tp}	мм	0	0	30	60
$\bar{t}_{\text{пр}}$	мс	6,4	6,3	19	31

Пробы были взяты для четырех случаев, приведенных в табл. 1, где указаны высоты керамических трубок h_{tp} , весовые содержания Al в топливе g_{Al} и Al_2O_3 в продуктах сгорания $G_{\text{Al}_2\text{O}_3}$, температуры горения составов T_r , линейные скорости горения образцов u , скорости оттока газов от поверхности горения и средние времена пребывания частиц в пламени

$\bar{t}_{\text{пр}}$, рассчитанные по формуле

$$\bar{t}_{\text{пр}} = \frac{1}{\omega_r} \left(h_{\text{tp}} + \frac{h_{\text{обр}} + h_k}{2} \right),$$

где $h_{\text{обр}}$ — высота образца; h_k — высота изотермического конуса над оправкой или керамической трубкой, равная диаметру оправки или трубы.

Отобранные пробы исследовались с помощью электронного УЭМВ-100Б и оптического МБИ-11 микроскопов. Для электронного микроскопа препарирование проб проводилось аналогично [3]. Частицы фотографировались при увеличении 2500 на пластины типа МР. На рис. 1 приведена типичная электронно-микроскопическая фотография исследуемых проб. Из рисунка видно, что частицы имеют сферическую форму, распределены достаточно плотно и равномерно. Следует отметить, что в пробах присутствовали в незначительных количествах частицы неправильной формы, образовавшиеся, по-видимому, в результате доокисления в пробе несгоревшего алюминия, а также частицы в виде разрушенных сфер. Размеры частиц определялись по пластинкам с помощью спектропроектора СП-18. Для каждой пробы было замерено 25–26 тысяч частиц с размерами от 0,06 до 2 мкм с интервалом 0,04 мкм и точностью 0,01 мкм. Измерения частиц с размерами выше 0,6 мкм проводи-

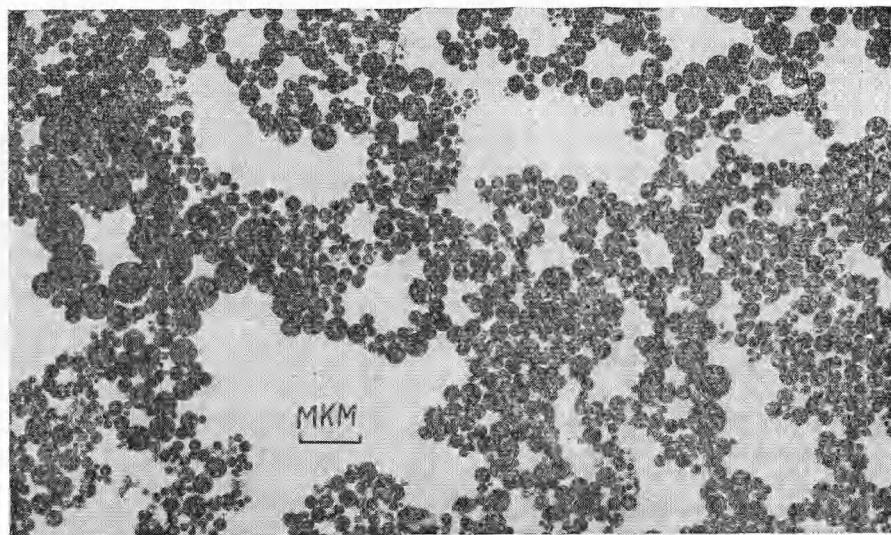


Рис. 1. Типичная электронно-микроскопическая фотография исследованных проб.

лись на оптическом микроскопе при увеличении $2700\times$, при этом для каждой пробы было замерено $1,5 \div 2$ тысячи частиц с интервалом 0,64 мкм и точностью 0,32 мкм.

Стыковка данных электронного и оптического микроскопов проводилась по точкам, расположенным в областях перекрытия данных, а именно на участках $0,64 \div 0,96$; $0,64 \div 1,28$; $0,64 \div 1,28$ и $1,28 \div 1,92$ мкм соответственно для проб 1, 2, 3, 4. Переход от размеров частиц в пробе к размерам капель в пламени осуществлялся по формуле

$$d(T_r) = d(293^\circ\text{K}) \sqrt[3]{\frac{\gamma_{\text{Al}_2\text{O}_3}(293^\circ\text{K})}{\gamma_{\text{Al}_2\text{O}_3}(T_r)}},$$

причем плотности окиси алюминия находились, согласно [6], по зависимости

$$\gamma_{\text{Al}_2\text{O}_3}(T) = 5,632 - 1,127 \cdot 10^{-3} T.$$

Для исследуемых составов с 5 и 15% Al размеры частиц в пламени были больше, чем в пробе в 1,23 и 1,32 раза. По числу частиц $N_{\Delta d}$ в интервале Δd рассчитывались вероятности пребывания частиц в заданном интервале в зависимости от диаметра в относительных единицах

$$f^0(d) = \frac{N_{\Delta d}}{\Delta d}(d) \left| \frac{N_{\Delta d}}{\Delta d}(d_0), \right.$$

где d и d_0 — текущий и наивероятнейший диаметры капель в пламени. Примененный способ определения гранулометрического состава частиц дает распределение частиц Al_2O_3 по размерам, усредненное за время горения образца, в течение которого пребывание частиц в пламени изменяется примерно на 4 мс. Погрешность в определении гарнгулометрического состава частиц в пробах $1 \div 4$ не превышает 15% для частиц размерами 0,08 \div 1,5 мкм и 25% для 1,5 \div 10 мкм. Общая погрешность полученных распределений с учетом погрешностей отбора в указанных интервалах размеров частиц не превышает 20 и 30% соответственно.

Результаты измерений представлены на рис. 2 и 3 в виде относительных числовых $f^0(d)$ и весовых $g^0(d)$ функций распределения. Цифры у кривых соответствуют номерам опытов табл. 1. Прежде всего, обращает на себя внимание тот факт, что весовые функции имеют два максимума. В первом максимуме веса частиц с диаметрами меньше 1,2; 1,4; 1,6 и 1,8 мкм соответственно для кривых 1, 2, 3 и 4 составляют заметную часть от общего веса частиц, а именно: 12, 11, 15 и 13%.

Весовые функции распределений хорошо описываются суммой двух функций вида:

$$g^0(d) = A_1 \left(\frac{d}{d_{m_1}} \right)^{t_1} e^{-\alpha_1 \left(\frac{d}{d_{m_1}} - 1 \right)} + A_2 \left(\frac{d}{d_{m_2}} \right)^{t_2} e^{-\alpha_2 \left(\frac{d}{d_{m_2}} - 1 \right)},$$

где A_1 , A_2 и d_{m_1} , d_{m_2} — значения амплитуд и диаметры частиц в первом и во втором максимумах весовых функций. Параметры t_1 , t_2 , α_1 и α_2 для первой функции распределения равны соответственно 4,5; 3,0; 3,9 и 2,75. С увеличением размеров частиц параметры функций уменьшаются и для четвертой кривой равны соответственно 3,5; 2,7; 3,6 и 2,8. Переход к относительным числовым функциям может быть легко осуществлен по формуле

$$f^0(d) = \left(\frac{d}{d_m} \right)^{-3} f^0(d_m) g^0(d),$$

где d_m — диаметр частиц при $g^0(d) = 1$. Абсолютные значения функций

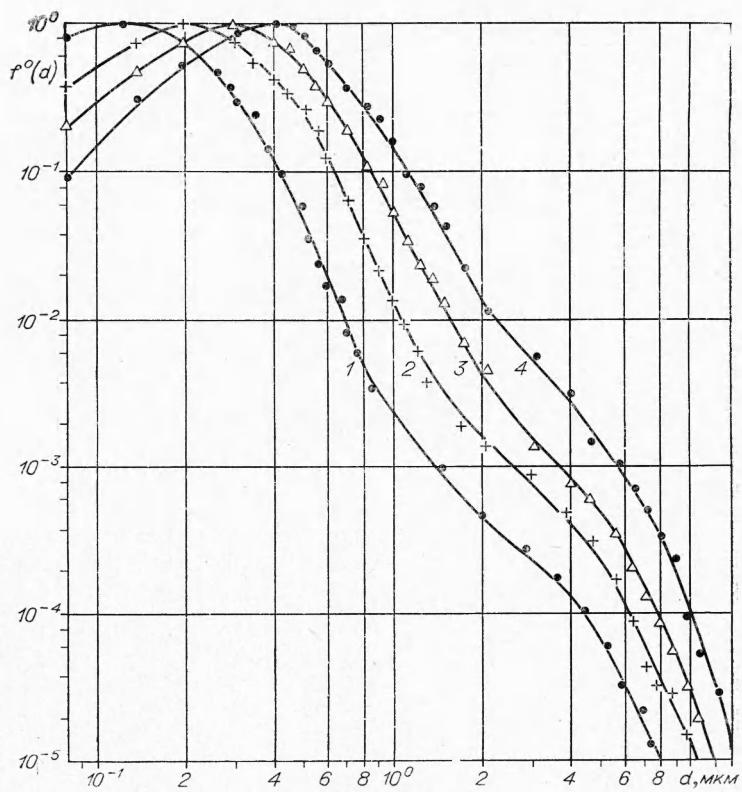


Рис. 2. Относительные числовые распределения капель Al_2O_3 по размерам в пламени.

$G(d)$ и $f(d)$ могут быть найдены из соотношений

$$G(d) = G(d_m) \cdot g^0(d),$$

$$f(d) = f(d_0) \cdot f^0(d),$$

$$G(d_m) = \gamma_{\text{Al}_2\text{O}_3}(T_r) \frac{\pi}{6} f^0(d_m) d_m^3,$$

$$f(d_0) = \frac{G_{\text{Al}_2\text{O}_3}}{\gamma_{\text{Al}_2\text{O}_3} \frac{\pi}{6} \sum_0^{np} d^3 f^0(d) \Delta d}.$$

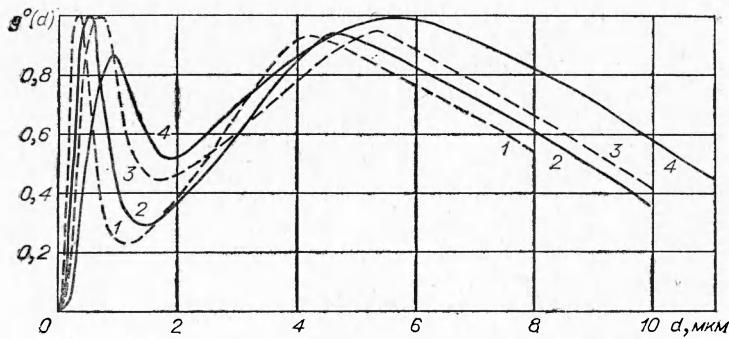


Рис. 3. Относительные весовые распределения капель Al_2O_3 по размерам в пламени.

Весовое содержание частиц Al_2O_3 в пламени рассчитывали по формуле

$$G_{\text{Al}_2\text{O}_3} = \frac{Z_k p M_{cp}}{(1 - Z_k) RT_r},$$

где Z_k — доля конденсата в продуктах сгорания; p — давление, атм; R — газовая постоянная, равная $82,05 \text{ см}^3 \cdot \text{атм} \cdot \text{град}^{-1} \cdot \text{моль}^{-1}$; M_{cp} — средний молекулярный вес продуктов сгорания, $\text{г} \cdot \text{моль}^{-1}$; T_r — температура горения, $^\circ\text{К}$.

Общее число частиц в единице объема пламени

$$N = f(d_0) \sum_{0,08}^{d_{\text{пр}}} f^0(d) \Delta d.$$

Среднемассовый диаметр D_m , D_{43} и D_{32} рассчитывались по формулам

$$\sum_{0,08}^{D_m} g^0(d) \Delta d \left| \sum_{0,08}^{d_{\text{пр}}} g^0(d) \Delta d = \frac{1}{2}, \right.$$

$$D_{43} = \sum_{0,08}^{d_{\text{пр}}} d^4 f^0(d) \Delta d \left| \sum_{0,08}^{d_{\text{пр}}} d^3 f^0(d) \Delta d, \right.$$

$$D_{32} = \sum_{0,08}^{d_{\text{пр}}} d^3 f^0(d) \Delta d \left| \sum_{0,08}^{d_{\text{пр}}} d^3 f^0(d) \Delta d. \right.$$

Верхние пределы интегрирования $d_{\text{пр}}$ для функций 1, 2, 3 и 4 равнялись соответственно 8, 10, 10 и 11 мкм. В табл. 2 приведены основные характеристики кривых распределения.

Из сравнения кривых $g^0(d)$ видим, что при увеличении весового содержания алюминия в топливе наибольшие изменения наблюдаются в районе первого максимума. Положение максимума сдвигается с 0,3 на 0,5 мкм, полуширина его возрастает от 0,45 до 0,65 мкм. Происходит укрупнение капель, в результате чего при увеличении весового содержания капель в пламени в 3,5 раза число частиц модального диаметра $f(d_0)$ увеличилось только в 1,05 раз, а общее число частиц в единице объема увеличилось от $0,17 \cdot 10^{10}$ до $0,22 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$, согласно табл. 2. Все это свидетельствует о том, что в непосредственной близости от горящей

Таблица 2

Параметры	Единицы измерения	# проб			
		1	2	3	4
d_0	мкм	0,12	0,18	0,31	0,4
θ/d_0	—	1,6	1,55	1,25	1,15
d_{m_1}	—	0,3	0,5	0,7	0,9
d_{m_2}	—	4,2	4,7	5,2	5,7
$f^0(d_{m_1})$	—	$3 \cdot 10^{-1}$	$2,5 \cdot 10^{-1}$	$2,1 \cdot 10^{-1}$	$2,00 \cdot 10^{-1}$
$f^0(d_{m_2})$	—	$1 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$8,2 \cdot 10^{-4}$
$G(d_m)$	$\text{мг}/\text{см}^3 \cdot \text{мкм}$	0,076	0,254	0,244	0,191
$f(d_0)$	$\text{см}^{-3} \cdot \text{мкм}^{-1}$	$0,67 \cdot 10^{10}$	$0,70 \cdot 10^{10}$	$0,30 \cdot 10^{10}$	$0,095 \cdot 10^{10}$
$N \cdot 10^{-10}$	см^{-3}	0,17	0,229	0,134	0,054
D_m	мкм	4,4	5,0	5,3	5,6
D_{43}	»	4,4	5,0	5,2	5,6
D_{32}	»	2,3	2,5	2,8	3,3

поверхности образца происходит интенсивный процесс слияния наиболее мелких капель в результате столкновений друг с другом. Количество же частиц в максимуме $f(d_{m_2})$ не уменьшилось, а увеличилось в 2,5 раза, т. е. почти пропорционально весовому содержанию алюминия. Относительный сдвиг второго максимума вправо существенно меньше, а именно в 1,1 вместо 1,67 раза. Все это говорит в пользу того, что образование второго максимума связано с принципиально другим процессом роста капель, обеспечивающим значительно большие скорости роста, чем слияние капель при столкновениях.

Наиболее вероятным процессом образования более крупных капель является процесс химической конденсации, обусловленный гетерогенной реакцией доокисления парообразных низких окислов алюминия на поверхности капель до жидкой окиси алюминия [7, 8]. Именно в этом случае количество центров конденсации, определяющих количество крупных капель, должно возрастать с увеличением содержания алюминия в топливе. Это подтверждается также тем, что для кривой 1 второй максимум совпадает по форме с распределением Фейна (параметр $t_2=3$), выведенном им в предположении химической коагуляции частиц окислов без учета столкновений [7, 8]. Поскольку, согласно данным химического анализа, горение алюминия практически полностью завершается в условиях опыта № 2, то изменение формы кривых 2—4, соответствующих различным временам пребывания капель в пламени, происходит исключительно за счет слияния капель при столкновениях. При этом параметры распределений для второго максимума t_2 и α_2 уменьшаются. Уже в условиях опыта № 2 процесс слияния капель при столкновениях заметно сказывается на форме кривой в районе второго максимума. Абсолютные значения весовых функций в максимумах при этом уменьшаются, составляя 0,254; 0,244; 0,164 в первом максимуме и 0,239; 0,233; 0,191 $\text{мг}/\text{см}^3\text{мкм}$ — во втором. У кривой 4 первый максимум становится даже несколько ниже второго. Оба максимума кривых смешаются вправо, составляя соответственно 0,5; 0,7; 0,9 и 4,7; 5,2; 5,7 мкм. Общее количество частиц в единице объема уменьшается, составляя $0,229 \cdot 10^{10}$; $0,134 \cdot 10^{10}$; $0,054 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ в основном за счет частиц первого максимума, где содержится не менее 90% всех капель.

Так же, как и в работах [1, 2], среднемассовый диаметр капель D_m находится в экспоненциальной зависимости от времени пребывания их в пламени. Функция $D_m=f(\bar{t}_{\text{пр}})$ имеет вид

$$D_m = 4,3e^{0,01\bar{t}_{\text{пр}}}.$$

Измеренные абсолютные значения D_m примерно на 30–40% выше данных [1, 9] при соответствующих давлениях и содержании алюминия. Это обусловлено, по-видимому, применением другой связки (каучука вместо уротропина), а также погрешностями экспериментов. Из табл. 2 видим, что значения D_{43} практически совпадают с D_m . Диаметры D_{32} более чувствительны к изменению времени пребывания частиц, чем D_m и D_{43} . При увеличении содержания алюминия в 3 раза D_m , D_{43} и D_{32} возрастают всего лишь в 1,1 раз.

Следует отметить, что значения D_{43} , найденные по данным оптического микроскопа без учета частиц, меньших 0,6 мкм, отличаются от D_{43} , определенных по полным данным (оптического и электронного микроскопов), всего лишь в 1,07; 1,06; 1,04 и 1,00 раза соответственно для распределений 1—4. Таким образом, для определения D_{43} при оценке двухфазных потерь нет необходимости в использовании электронного микроскопа. Без учета данных электронного микроскопа значение D_{32} для распределений 1—4 в 1,3; 1,28; 1,2 и 1,13 раза выше приведенных в табл. 2. Следовательно, при достаточно больших содержаниях алюминия и временах пребывания частиц в пламени при определении D_{32} также

можно обойтись без электронного микроскопа. Отношение D_m/D_{32} для проб 1—4 колеблется в пределах ошибок измерений и равно $1,85 \pm 0,15$. Следовательно, по величине D_{32} , измеренной независимым способом, скажем, по коэффициенту ослабления частиц [10], диаметр D_{43} может быть определен с удовлетворительной точностью.

В заключение авторы выражают благодарность Н. Г. Поляковой за препарирование и фотографирование частиц на электронном микроскопе и Л. И. Буглаевой за измерение частиц на оптическом микроскопе.

Поступила в редакцию
14/V 1973

ЛИТЕРАТУРА

1. R. Sehgal. Jet. Propulsion Labs., Tech. Report, 1962, 32.
2. E. Bauer and D. J. Carlson. J. Quant. Spectr. Rad. Trans., 1964, 363.
3. Л. П. Бахир, Г. И. Левашенко, Н. Г. Полякова. ЖПС, 1973, 18, 6.
4. Л. П. Бахир, В. В. Таманович. ЖПС, 1973, 18, 5.
5. Г. И. Левашенко, Л. П. Бахир. ФГВ, 1973, 9, 2.
6. А. Д. Кирченбаум, Й. А. Сагил. J. of Liarg. Nuclear Chem., 1960, 14, 283.
7. Фейн. Ракетная техника и космонавтика, 1966, 4, 1.
8. Дж. Хоггунд. Вопросы ракетной техники, 1970, 2.
9. Х. Ченг, Н. С. Коэн. Ракетная техника и космонавтика, 1965, 2, 84.
10. Р. А. Доббинс. Ракетная техника и космонавтика, 1963, 1, 221.

УДК 621.454 : 662.612.324

ИСПАРЕНИЕ КАПЛИ ТОПЛИВА В ЛАМИНАРНОМ ПОТОКЕ ГАЗА

C. B. Анаников, A. B. Талантов

(Казань)

При сжигании распыленного жидкого топлива в камерах сгорания двигателей одновременно протекает несколько процессов, определяющих развитие факела, а именно: испарение капель, их горение с образованием отдельных факелов вокруг поверхности испарения; смешение паров топлива с окислителем и их последующее диффузионное горение.

Характер испарения топливно-воздушной смеси оказывает немаловажное влияние на формирование границ факела и устойчивость его горения. В связи с этим возникает необходимость получения надежных данных по испаряемости топливной смеси до ее воспламенения. Исходным моментом при расчете испарения факела в целом является рассмотрение условий движения и массообмена отдельной капли топлива. Для камер сгорания одним из возможных режимов движения капель топлива является ламинарный режим их обтекания. Указанный случай может иметь место в конце участка неуставновившегося движения, когда скорости обтекаемого газа и капель становятся близкими между собой.

При анализе параметров испаряющейся капли, как правило, пре-небрегают реактивной силой (силой Мещерского), возникающей вследствие неравномерного оттока паров с ее поверхности [1, 2], не обосновывая этого. Каких-либо оценок, касающихся влияния силы Мещерского, в литературе не приводится, и вопрос о величине реактивной силы