

близкие к адиабатическим. Так, например, в работе [7] при исследовании воспламенения мелкого порошка алюминия ПАК-4 получено $p_{\max} \sim 9$ атм при $\rho_m^0 \approx 900$ г/м³, тогда как приведенные выше термодинамические расчеты при той же концентрации дают $p_{\max} \sim 10,8$ атм. Тем самым в некоторых случаях можно ожидать, что реальный процесс воспламенения и горения аэрозвеси металла может протекать в условиях, близких к адиабатическим, для которых применимы приведенные выше результаты.

Авторы благодарят Л. Ф. Афанасьеву за помощь в проведении термодинамических расчетов и В. В. Барзыкина за ценные замечания к проделанной работе.

Поступила в редакцию
1/X 1979

ЛИТЕРАТУРА

1. Предупреждение внезапных воспламенений порошков и взрывов газодисперсных систем. Сб. статей. Киев, Наукова думка, 1975.
2. Взрывоопасность металлических порошков. Киев, Наукова думка, 1971.
3. А. Г. Алексеев, Е. С. Костина, В. В. Недиц.— В сб.: Предупреждение внезапных воспламенений порошков и взрывов газодисперсных систем. Киев, Наукова думка, 1975.
4. П. Кофстад. Высокотемпературное окисление металлов. М., Мир, 1969.
5. А. Г. Мержанов, М. М. Китаини др. Докл. АН СССР, 1977, 237, 2.
6. В. И. Крылов. Приближенное вычисление интегралов. М., Наука, 1967.
7. В. В. Недиц, А. Г. Алексеев, А. Ф. Шаповал.— В сб.: Предупреждение внезапных взрывов газодисперсных систем. Киев, Наукова думка, 1971.

ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА МЕТАЛЛИЗИРОВАННЫХ ТОПЛИВ НА ДИСПЕРСНЫЙ СОСТАВ, ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЧАСТИЦ ОКИСЛОВ И ИЗЛУЧАТЕЛЬНУЮ СПОСОБНОСТЬ ПЛАМЕНИ

Л. П. Бахир, Г. И. Левашенко, В. В. Таманович
(Минск)

Настоящая работа — продолжение выполняемых авторами исследований влияния дисперсного состава частиц окиси алюминия в пламенах алюминизированных твердых топлив на их спектральные характеристики и излучательную способность в области спектра 0,63—8 мкм [1, 2]. Для топлив на основе перхлората аммония с 5 и 15% алюминия, горящих при давлении 40 атм, показано, что величину полидисперсных коэффициентов поглощения и рассеяния во всей спектральной области определяют наиболее крупные частицы с размерами 2—10 мкм. При этом вклад частиц различных размеров в суммарные коэффициенты пропорционален их объемной концентрации c_v . Мелкие частицы с $d < 1$ мкм вносят заметный вклад только в полидисперсные коэффициенты рассеяния при длинах волн меньше 2 мкм [1]. Укрупнение частиц, обусловленное столкновительной коагуляцией при удалении от горячей поверхности топлива, приводит к заметному уменьшению коэффициентов рассеяния (до 35%) и некоторому увеличению (до 15%) коэффициентов поглощения и излучательной способности пламени также только в коротковолновой области спектра [2].

В настоящей работе исследованы дисперсный состав частиц окислов в области размеров 0,04—12 мкм, их оптические характеристики и излучательная способность пламен топлив на основе перхлората аммония с по-

Таблица 1

Характеристика топлив и продуктов их сгорания

Топливо	Содержание металла, %	T, К	z _к	c _v ^{MgO} · 10 ³	c _v ^{Al₂O₃} · 10 ³	G ^{Al₂O₃} , мг/см ³	p, атм			
							H ₂ O	CO ₂	CO	HCl
1	Al —24	3360	0,4	—	0,93	1,71	1,1	0,08	5,6	1,2
2	Сплав —24	2990	0,26	0,034	0,36	0,81	2,41	0,25	5,16	1,9
3	Al —28	3620	0,42	—	1,07	1,66	0,92	0,09	5,5	1,08
4	Сплав —30	3150	0,31	0,033	0,48	1,00	2,14	0,29	5,15	0,47

вышенным содержанием алюминия и алюминиево-магниевого сплава при давлении 20 атм.

В табл. 1 приведены содержание металла в топливах, расчетные температуры пламен T , массовая доля конденсата в продуктах горения z_k , массовое содержание G и объемная концентрация c_v частиц окиси алюминия и магния, парциальные давления газообразных продуктов сгорания. Порошки алюминия и сплава (50% Al + 50% Mg) имели одинаковый дисперсный состав. Для обеспечения полноты сгорания металла в топливах применялись активные связки с высоким содержанием кислорода. В топливах 3 и 4 применена наиболее активная связка, благодаря чему содержание металла доведено до значений, при которых температура пламен максимальна.

Образцы топлив диаметром 17 и высотой 10 мм сжигались с торца в среде азота в камере постоянного давления. Отбор частиц из пламени и обработка отобранных проб производились по методике, описанной в [3, 4]. В пробах для алюминизированных топлив присутствовали только сферические частицы Al_2O_3 , тогда как в пробах топлив 2 и 4 наряду со сферическими наблюдалось около 1% (от общего числа) частиц кубической формы с размерами 0,5—6 мкм, что составляло примерно 0,5% общей массы частиц окислов в пламени. Образование некоторого количества твердых кубических частиц MgO за пределами зоны реакции горения магния обусловлено тем, что температура плавления окиси магния (3070 К) близка к средней температуре исследуемых пламен [5].

Согласно данным термодинамического расчета, массовая доля окиси магния в пламени по отношению к общей массе частиц Al_2O_3 и MgO невелика и составляет всего 10 и 13% для топлив 2 и 4 в связи с образованием соединений магния с хлором, присутствующих в пламени в виде паров. Следовательно, основная часть частиц MgO в пламени имеет сферическую форму и в пробах их нельзя было отличить от частиц окиси алюминия. В связи с изложенным при обработке проб частицы кубической формы не учитывались, а измеренное распределение частиц сферической формы по размерам приписывалось частицам окиси алюминия. Для каждой пробы измерено с шагом $0,1d$ по 25 тысяч частиц в области размеров 0,1—1 мкм под электронным микроскопом и 4—5 тысяч в области размеров 1—10 мкм под оптическим микроскопом. Погрешность измеренных функций распределения в пламенах топлив 1 и 3 составляла 10% для частиц с $d < 1$ мкм и 20% для частиц с $d = 1 \div 8$ мкм. Для топлив 2 и 4 погрешность возрастала на 10%.

Результаты эксперимента представлены на рис. 1 в виде массовых функций распределения $g(d) = G(d)/G$. Все распределения имеют два максимума. Согласно общепринятой точке зрения, первый максимум обусловлен механизмом конденсации паров окислов на зародышах в пламени, а второй — на поверхности горячей капли металла. Для всех составов характерно резкое увеличение первого максимума функции $g(d)$ по сравнению с топливом с 15% Al, горящим при давлении 40 атм (распределение 2, [6]). Отношение значения функции в первом максимуме к значению функции во втором максимуме составляет 2,9; 4,5; 2,3; 1,8 для составов



Рис. 1. Массовые функции распределения частиц Al_2O_3 по размерам в пламени топлив 1—4.

1—4 соответственно, в то время как для распределения 2 в работе [6] оно равно 1. Положение первого максимума одинаково для всех составов ($d_{m_1} = 0,4$ мкм) и сдвинуто в сторону меньших размеров по сравнению с [6]. Несмотря на то, что частицы в первом максимуме становятся мельче, их массовая доля по отношению к общей массе частиц Al_2O_3 в пламени возрастает от 18% для топлива, горящего при давлении

40 атм, до 29, 33, 28 и 22% соответственно для составов 1—4.

В соответствии с формулой Френкеля [7] наблюдаемое увеличение первого максимума может быть объяснено увеличением скорости образования зародышей, вызванным для топлив с алюминием более высокой температурой пламени, а для топлив со сплавом — более высоким поверхностным натяжением капель Al_2O_3 с примесями MgO . Поскольку пламена топлив 1, 3 характеризуются наибольшим объемным содержанием капель ($c_v \approx 1 \cdot 10^{-3}$), скорости роста и агломерации капель в них значительно больше, чем в топливах 2, 4, а зависимость величины первого максимума от объемного содержания капель более слабая.

Из рис. 1 видно, что частицы Al_2O_3 , образующиеся при горении топлив со сплавом, во втором максимуме крупнее частиц, образующихся при горении топлив с алюминием. В результате замены алюминия на алюминиево-магниевый сплав второй максимум массовой функции d_{m_2} смещается с 5 до 6,6 мкм для топлив 1 и 2 и с 4 до 5,2 мкм для топлив 3 и 4. Среднемассовый диаметр частиц D_m в пламени топлив 3 и 4 также возрастает от 3,8 до 4,6 мкм. Для составов 1 и 2 среднемассовый диаметр не изменяется ($D_m = 4,3$ мкм), так как наряду с укрупнением частиц во втором максимуме распределения для топлива 2 происходит увеличение первого максимума. Наблюдаемое укрупнение частиц может быть объяснено двухстадийным характером горения сплава, вызванным резким отличием температур кипения алюминия и магния, составляющих при 20 атм 2940 и 1680 К соответственно. В связи с этим первоначально сгорает Mg , пары которого диффундируют через твердую рыхлую окисную пленку MgO на поверхности капли [8] и реагируют с кислородом и хлором. Одновременно, но более медленно окисляется и алюминий. При этом происходит усиление гетерогенных реакций окисления алюминия на поверхности капли, приводящее к увеличению массовой доли наиболее крупных частиц Al_2O_3 .

Поскольку изменения содержания металла в топливах невелики (см. табл. 1), то нельзя было ожидать существенного усиления процесса агломерации капель металла на горячей поверхности топлива и увеличения исходных размеров частиц металла и окислов. Однако наблюдается обратная картина — уменьшение размеров частиц Al_2O_3 . Положение второго максимума функции $g(d)$ сместилось с 5 до 4 мкм для топлив 1 и 3 и с 6,6 до 5,2 мкм для топлив 2 и 4. Это можно объяснить тем, что в топливах 3 и 4 с более активной связкой капли металла сгорают быстрее.

Для измеренных распределений частиц Al_2O_3 по размерам рассчитаны полидисперсные характеристики и излучательная способность пламени по методике, обсуждавшейся в [2, 9, 10]. Во всех случаях расчет выполнялся для значений мнимой части комплексного показателя преломления жидкой окиси алюминия κ , измеренной при температуре 2950 К [9], хотя для топлив 1 и 3 температуры пламен существенно выше. Это позволило выявить влияние дисперсного состава частиц на оптические характеристики и излучательную способность пламени, хотя действительные значе-

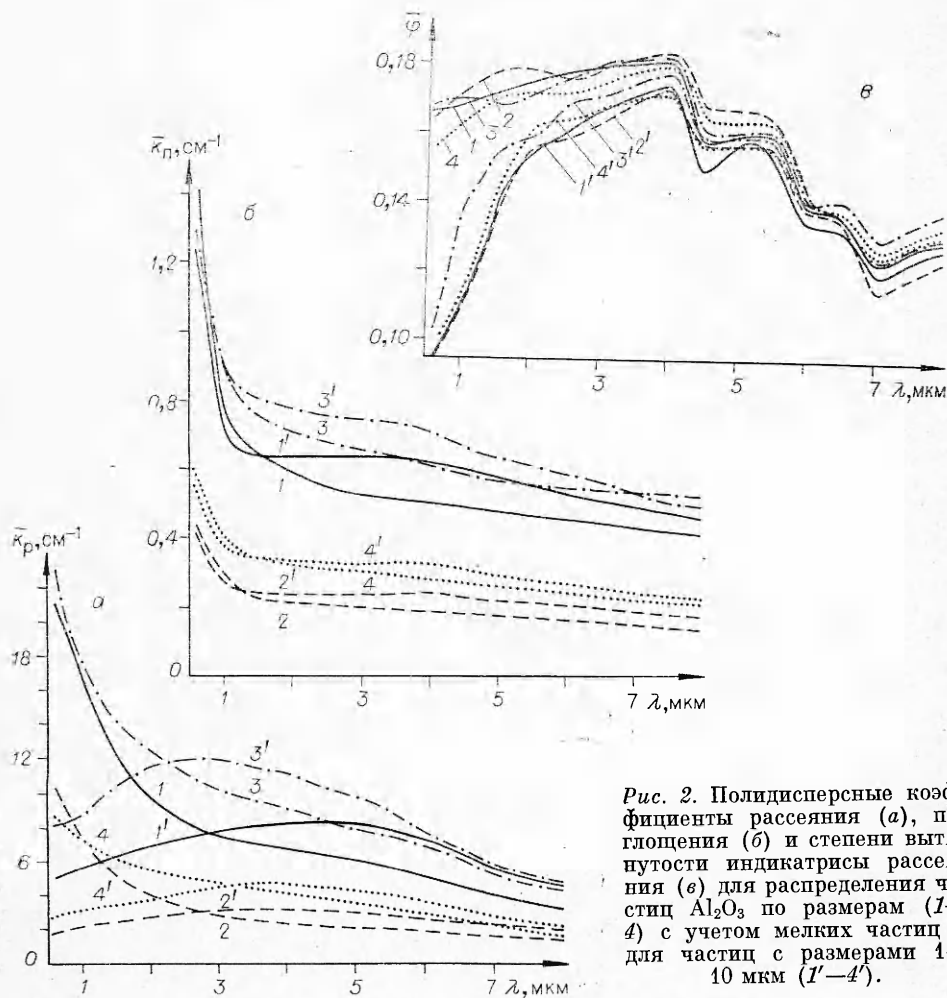


Рис. 2. Полидисперсные коэффициенты рассеяния (а), поглощения (б) и степени вытянутости индикатрисы рассеяния (в) для распределения частиц Al_2O_3 по размерам (1—4) с учетом мелких частиц и для частиц с размерами 1—10 мкм (1'—4').

ния этих величин для топлив 1 и 3 должны быть несколько выше в связи с ростом κ при увеличении температуры.

Поскольку для построения массовой функции распределения в области первого максимума требуется значительно более трудоемкая статистическая обработка проб в области диаметров меньше 1 мкм с применением электронного микроскопа, чем в области второго максимума (1—10 мкм), практически важно оценить, насколько сильно различаются полидисперсные коэффициенты, рассчитанные для полного распределения частиц по размерам и по данным только оптического микроскопа. Результаты расчета для указанных диапазонов размеров частиц представлены на рис. 2. Из сопоставления данных видно, что общий ход спектральной зависимости коэффициентов поглощения сохраняется. Учет мелких частиц приводит к уменьшению коэффициентов поглощения на 10—20% при $\lambda > 1,5$ мкм и увеличению до 10% при $\lambda < 1—1,5$ мкм. В то же время ход спектральной зависимости коэффициентов рассеяния резко изменяется. При $\lambda < 1,5$ мкм коэффициенты рассеяния увеличиваются (до 4—5 раз при $\lambda = 0,63$ мкм), а при $\lambda > 2,5—3$ мкм — уменьшаются на 15—40%. Степень вытянутости индикатрисы рассеяния назад увеличивается до 1,5 раз при $\lambda = 0,63$ мкм.

Чтобы проследить за влиянием дисперсного состава частиц в пламени на величину полидисперсных коэффициентов, определены удельные значения коэффициентов рассеяния и поглощения (табл. 2). Как видно,

Таблица 2

Удельные полидисперсные коэффициенты рассеяния и поглощения

$\frac{\bar{k}_p \cdot 10^{-3}}{c}$ (I), $\frac{\bar{k}_n \cdot 10^{-3}}{c_v}$ (II)	λ , мкм	Топливо					
		1	2	3	4	2[6]	2[4]
I	0,63	22,8	28,2	21,5	18,3	14,0	5,7
	1,0	18,5	20,9	16,3	15,4	12,5	6,2
	2,0	10,6	11,2	11,7	11,8	9,3	6,6
	4,0	7,3	6,9	8,5	8,7	8,2	6,8
	6,0	5,6	5,2	6,4	6,0	6,7	7,0
	8,0	3,6	3,4	4,0	3,7	4,3	5,2
II	0,63	1,52	1,23	1,20	1,21	1,27	1,77
	1,0	0,83	0,84	0,84	0,85	0,79	0,73
	2,0	0,64	0,61	0,68	0,69	0,68	0,63
	4,0	0,56	0,56	0,58	0,60	0,64	0,66
	6,0	0,46	0,45	0,51	0,48	0,50	0,56
	8,0	0,40	0,42	0,48	0,44	0,46	0,48

\bar{k}_n/c_v в области $\lambda = 1 - 8$ мкм для всех исследуемых распределений различаются между собой не более чем на 10% и только при $\lambda = 0,63$ мкм отличие достигает 20%. Удельные коэффициенты рассеяния в области $\lambda = 2 - 8$ мкм отличаются на 25%. При $\lambda < 2$ мкм влияние дисперсного состава более заметно. При этом, чем выше значение первого максимума массовой функции распределения, тем больше значение удельного коэффициента рассеяния в коротковолновой области спектра. Так, для составов 2, 1, 3, 4 значения функции в первом максимуме и удельные коэффициенты рассеяния при $\lambda = 0,63$ мкм составляют соответственно 0,9; 0,68; 0,56; 0,44 и $28 \cdot 10^3$; $22,8 \cdot 10^3$; $21,6 \cdot 10^3$; $18,2 \cdot 10^3$.

Эта зависимость распространяется и на составы с 15 и 10% Al, горящие при давлении 40 атм. Значение массовой функции в первом максимуме распределения 2 работы [6] равно 0,3, т. е. в 3 раза меньше, чем для состава 2. Удельный коэффициент рассеяния при $\lambda = 0,63$ мкм при этом вдвое меньше. Топливо с 10% Al горело по каналу. Характерной особенностью распределения частиц окислов по размерам, образующихся при таком способе сжигания топлива, является малое массовое содержание частиц с размерами меньше 1 мкм (распределение 2 из работы [4]). Значение функции распределения в первом максимуме, расположенном при $d_{m1}^* = 0,4$ мкм, составляет всего 0,06. Значения удельных коэффициентов \bar{k}_p/c_v для этого распределения в области длин волн $\lambda < 2$ мкм наименьшие.

Отличие \bar{k}_p/c_v при длинах волн $\lambda > 1$ мкм не превосходит 20% для всех исследованных топлив, горящих по торцу, и несколько выше для топлива, горящего по каналу. Удельные коэффициенты поглощения во всех рассматриваемых случаях различаются между собой не более чем на 10%, изменяясь от $\sim 0,8 \cdot 10^3$ при $\lambda = 1$ мкм до $\sim 0,5 \cdot 10^3$ при $\lambda = 8$ мкм. На длине волны 0,63 мкм отличие достигает 20%, а для топлива с 10% Al — 40%.

Из рис. 3 видно, что для составов с меньшим содержанием частиц Al_2O_3 в пламени в спектре поглощения наблюдаются полосы молекулярных составляющих продуктов горения: 2,7 мкм — H_2O , CO_2 , 4,6 мкм — CO ,

4,3 мкм — CO_2 и крыло полосы 6,3 мкм — H_2O . При увеличении содержания частиц в пламени вклад частиц в излучение увеличивается не только в связи с ростом коэффициентов поглощения частиц, но в значительной степени в связи со снижением содержания газов. Так, в максимуме основной полосы CO_2 (4,3 мкм) при $\lambda = 4,5$ мкм коэффициенты поглощения частиц и газов составляют 0,18 и 0,86 см^{-1} для топлива 2 и 0,59 и 0,68 см^{-1} для топлива 3, излучательные способности пламен для этих топлив равны соответственно 0,9 и 0,77. В максимумах полос H_2O 2,7 и 6,3 мкм коэффициенты поглощения частиц выше коэффициентов поглощения газов для составов 1 и 3 примерно в 10 раз, а для составов 2 и 4 в 1,6 и 5,5 раза при $\lambda = 2,8$ мкм и в 1,3 и 2 раза при $\lambda = 6,7$ мкм.

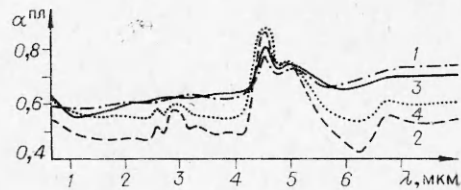


Рис. 3. Излучательные способности пламен топлив.

За пределами основных полос поглощения CO и CO_2 излучательная способность пламени растет пропорционально объемному содержанию частиц и при $c_v \geq 10^{-3}$ в основном определяется частицами. В области длин волн 0,63—4 мкм излучательная способность практически не зависит от длины волны, составляя при толщине пламени $z = 1,7$ см $\sim 0,6$, несмотря на то, что коэффициенты поглощения частиц уменьшаются в 2—3 раза. Это обусловлено резким уменьшением рассеяния на частицах (см. рис. 1), ограничивающим излучательную способность пламени в коротковолновой области спектра. В области 5,5—8 мкм наблюдается небольшой подъем излучательной способности от $\sim 0,65$ до $\sim 0,7$. Излучательная способность пламени при $c_v \cdot z \sim 2 \cdot 10^{-3}$ см во всей области спектра практически совпадает с предельным значением для бесконечно толстого слоя $\alpha_\infty = 1 - R_\infty$ (табл. 3).

За влиянием дисперсного состава частиц на их излучательную способность можно проследить по предельным значениям α_∞ при $\lambda = 0,63$; 1, 2 и 4 мкм, где излучение газов мало. Наблюдается общая тенденция роста излучательной способности частиц с уменьшением значения массовых функций в первом максимуме $g(d_{m_1})$, наиболее четко проявляющаяся при $\lambda = 0,63$ мкм. Здесь для распределения 2, характеризующегося наибольшим значением $g(d_{m_1}) = 0,9$, $\alpha_\infty = 0,56$, а для распределения 2 из работы [4] с наименьшим значением $g(d_{m_1}) = 0,06$, $\alpha_\infty = 0,9$.

Таким образом, в исследуемых пламенах частицы Al_2O_3 с $d < 1$ мкм составляют ~ 20 — 30% общей массы частиц и определяют рассеивающие свойства пламени при $\lambda < 1$ мкм. Для обеспечения точности расчета полидисперсных коэффициентов и индикатрис рассеяния частиц $\pm 5\%$ необходима статистическая обработка проб в объеме 20—30 тысяч частиц в диапазоне 0,04—10 мкм с шагом $0,1d$ с использованием, наряду с оптическим, электронного микроскопа. В то же время при расчете коэффици-

Таблица 3

Топливо	Предельные значения излучательной способности пламени						
	λ , мкм						
	0,63	1	2	4	4,5	6	8
1	0,63	0,56	0,61	0,65	0,80	0,70	0,78
2	0,56	0,54	0,60	0,68	0,90	0,74	0,86
3	0,60	0,58	0,62	0,63	0,77	0,69	0,77
4	0,64	0,60	0,61	0,64	0,82	0,71	0,82
2 [6]	0,70	0,58	0,63	0,66	0,88	0,69	0,81
2 [4]	0,90	0,89	0,82	0,81	0,91	0,84	0,89

ентов поглощения по данным оптического микроскопа получаем вполне приемлемую точность $\pm 10\%$.

Наибольшее влияние на величину полидисперсных коэффициентов частиц Al_2O_3 в пламени оказывают изменения дисперсного состава частиц в первом максимуме весовой функции распределения, причем только при $\lambda < 1 \div 2$ мкм. При этом наблюдается следующая зависимость: чем выше первый максимум, тем выше удельные коэффициенты рассеяния. Эта зависимость распространяется на рассмотренные в [4, 6] топлива 2. В исследуемых пламенах значения $g(d_{m_1})$ в 2—4,5 раза выше $g(d_{m_2})$. Для распределения 2 с максимальным отношением

$$g(d_{m_1})/g(d_{m_2}) = 4,5$$

удельные коэффициенты рассеяния при $\lambda < 1$ мкм в 5 раз превосходят удельные коэффициенты рассеяния для распределения 2 из [4] с наименьшим отношением

$$g(d_{m_1})/g(d_{m_2}) = 0,06.$$

В то же время при $\lambda = 6—8$ мкм они на 30—40% ниже.

Величина второго максимума массовой функции изменяется незначительно. Однако наблюдаются существенные сдвиги положения второго максимума. В результате замены алюминия на алюминиево-магниевый сплав частицы заметно укрупняются. Увеличение активности связки приводит к уменьшению размеров частиц. Эти изменения почти не сказываются на оптических характеристиках частиц, так как в связи с большой шириной второго максимума происходящие изменения вкладов частиц различного размера в коэффициенты рассеяния и поглощения взаимно компенсируются.

Удельные коэффициенты рассеяния исследуемых пламен в 10—20 раз выше удельных коэффициентов поглощения соответственно при длинах волн 8,0—0,63 мкм. Степени вытянутости индикатрис рассеяния назад невелики и слабо зависят от длины волны, изменяясь в пределах 0,1—0,18. Пламена являются оптически плотными в основном благодаря рассеянию. Оптические плотности падают с ростом длины волны в 5—8 раз, изменяясь от 28 до 4 $см^{-1}$. Благодаря этому уже при геометрических толщах 0,2—1 $см^{-1}$ пламя становится непрозрачным и рассеяние на частицах существенно ограничивает коэффициенты черноты пламени и обуславливает слабую зависимость их от длины волны на участках спектра между полосами поглощения молекулярных составляющих пламени.

*Поступила в редакцию
12/VI 1979*

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. П. Бахир, Г. И. Левашенко, В. В. Таманович. ФГВ, 1976, 12, 3.
2. Л. П. Бахир, Г. И. Левашенко, В. В. Таманович. ФГВ, 1980, 16, 2.
3. Г. И. Левашенко, Л. П. Бахир. ФГВ, 1973, 9, 2.
4. Л. П. Бахир, Г. И. Левашенко, Н. Г. Полякова. ЖПС, 1973, 18, 1047.
5. Е. И. Гусаченко, Л. И. Стесик, В. П. Фурсов, В. И. Шевцов. ФГВ, 1974, 10, 4, 554.
6. Л. П. Бахир, Г. И. Левашенко. ФГВ, 1973, 9, 6.
7. С. А. Френкель. Кинетическая теория жидкостей. М., Изд-во АН СССР, 1945.
8. Е. И. Понов, Л. Я. Каширов, В. М. Мальцев, А. Л. Брейтер. ФГВ, 1973, 9, 2.
9. Л. П. Бахир, Г. И. Левашенко, В. В. Таманович. ЖПС, 1977, 26, 514.
10. Л. П. Бахир, Г. И. Левашенко, В. В. Таманович. ЖПС, 1978, 29, 669.