

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОАГУЛЯЦИИ КАПЕЛЬ Al_2O_3 В ПЛАМЕНИ СМЕСЕВОГО ТВЕРДОГО ТОПЛИВА НА ИХ ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ИЗЛУЧАТЕЛЬНУЮ СПОСОБНОСТЬ

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

Основные механизмы образования и роста капель окислов металлов при горении металлизированных смесевых топлив — конденсация паров окислов на зародышах в пламени и на поверхности горячей капли топлива, а также столкновительная коагуляция [1]. При высоких давлениях горение алюминия почти полностью завершается в диспергированном слое. В связи с этим начальное распределение капель по размерам, связанное с процессами конденсации паров, формируется непосредственно у поверхности топлива. При удалении от горячей поверхности изменение дисперсного состава капель происходит исключительно за счет столкновительной коагуляции.

В работе [2] исследованы числовые $f(r)$ и массовые $g(r)$ функции распределения капель Al_2O_3 по размерам в диапазоне диаметров 0,08—12 мкм в пламени топлива на основе перхлората аммония, содержащего 15% Al, горящего с торца при давлении 40 кг/см². Пробы отбирались с расстояний от поверхности образца в среднем 15; 45 и 75 мм, что соответствовало временам пребывания капель в пламени 6,3; 19 и 31 мс. Анализ показал, что массовые функции распределения имеют два максимума, связанные с двумя механизмами конденсации. По мере удаления продуктов сгорания от поверхности топлива на высоту 75 мм наиболее вероятный диаметр капель Al_2O_3 увеличивается от 0,18 до 0,4 мкм, максимумы массовых функций смещаются с 0,5 и 4,7 мкм до 0,9 и 5,7 мкм. В связи с укрупнением капель число их в единице объема пламени уменьшается от $0,23 \cdot 10^{10}$ до $0,55 \cdot 10^9$ в основном за счет капель диаметром меньше 0,5—1 мкм.

Представляло далее интерес рассмотреть, каким образом наблюдаемое изменение дисперсного состава капель Al_2O_3 сказывается на их оптических характеристиках и излучательной способности пламени. С этой целью в настоящей работе для измеренных в [2] трех распределений капель Al_2O_3 по размерам рассчитаны в области спектра 0,63—8 мкм полидисперсные коэффициенты рассеяния K^p и поглощения K^a , степени вытянутости индикатрисы рассеяния назад φ , а также излучательная способность α^{in} и доли рассеянного излучения S пламен различной толщины. Расчет выполнен для уточненных значений мнимой части комплексного показателя преломления κ жидкой окиси алюминия при температуре 2960 К из [3]. С целью экспериментальной проверки значений κ измерена спектральная излучательная способность исследуемого пламени, имеющего примерно такую же температуру, на тех же расстояниях от горячей поверхности топлива, на которых осуществлялся отбор частиц [2].

Расчет спектральных коэффициентов поглощения и рассеяния и степеней вытянутости индикатрисы рассеяния назад капель Al_2O_3 выполнялся двумя способами, обсуждавшимися ранее: непосредственно по полученным из эксперимента весовым гистограммам и по числовым функциям распределения, представленным в виде суммы гамма-распределений [3, 4].

Для расчета по гистограммам были подготовлены таблицы усредненных коэффициентов M_i и степеней вытянутости индикатрисы рассеяния [5] для 60 значений параметра дифракции $\rho = 2\pi r/\lambda$ в пределах 0,001—60 и для значений действительной части показателя преломления $n = 1,8; 1,7; 1,6; 1,54$ и мнимой части $\kappa = 0,005; 0,01; 0,02; 0,05$. Усреднение про-

изводилось в интервале $\Delta\rho = 0,1\rho$. Таблицы позволяют рассчитывать полидисперсные характеристики капель Al_2O_3 в области длин волн 0,63—8 мкм во всем диапазоне размеров, наблюдавшихся в эксперименте.

Расчет выполнялся с шагом по длине волны $\Delta\lambda = 0,5$ мкм для значений¹ n и k , приведенных ниже, с использованием линейной интерполяции по k :

λ , мкм	0,63	1	2	3	4	5	6	7	8
n	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,7	1,6	1,54	1,54
k	0,003	0,004	0,0055	0,0075	0,0095	0,012	0,014	0,018	0,021

Поскольку при определении функций распределения частиц Al_2O_3 по размерам статистическая обработка 27 тысяч частиц, обеспечившая точность определения $f^0(r)$ 20—30% в диапазоне диаметров 0,08—10 мкм, производилась с достаточно подробным шагом по r ($\Delta r \approx 0,1 r$), использование гистограмм не приводит к потере точности при расчете полидисперсных коэффициентов по усредненным значениям коэффициентов Ми. В этом заключается одно из существенных преимуществ первого способа расчета. Кроме того, гистограммы лучше представляют фактическое распределение капель Al_2O_3 по размерам в пламени.

Дело в том, что реальные распределения капель Al_2O_3 в пламени имеют верхний предел, поскольку образование наиболее крупных капель обусловлено конденсацией на поверхности горячей капли алюминия. В области диаметров, близких к предельному, распределение капель носит прерывистый характер. В связи с этим здесь вообще может быть не оправдано применение плавных функций для описания распределения частиц по размерам.

Аналитические выражения в виде суммы гамма-распределений в [4] воспроизводили сглаженную числовую функцию распределения капель Al_2O_3 по размерам с точностью не хуже 10% в диапазоне диаметров 0,8—8 мкм. В области диаметров 8—20 мкм значения аналитических функций уменьшились приблизительно на 3 порядка и составляли для высоты пламени 75 мм, например, $0,12 \cdot 10^{-3}$; $0,35 \cdot 10^{-4}$ и $0,9 \cdot 10^{-7}$ при диаметрах 8, 12 и 20 мкм соответственно. В то же время предельный диаметр частиц, обнаруженный в исследуемых пробах, с учетом поправки на плотность жидкой Al_2O_3 составил 10—12 мкм. Таким образом, можно было ожидать существенных погрешностей при их использовании для расчета оптических характеристик в связи с указанными отличиями. Тем не менее полидисперсные характеристики, рассчитанные для трех распределений двумя способами, совпали между собой. Следовательно, рассматриваемый способ представления экспериментального распределения по размерам в виде суммы гамма-распределений может быть использован при расчете спектральных характеристик частиц Al_2O_3 в пламенах металлизированных топлив. Однако следует отдать предпочтение способу расчета полидисперсных коэффициентов по массовым гистограммам как более удобному.

Излучательная способность пламени находилась из уравнения лучистого равновесия

$$\alpha^{nl} = 1 - R - T.$$

Входящие в уравнение коэффициенты отражения R и пропускания T рассеивающего слоя пламени рассчитывались по известным формулам двухпараметрического варианта двухпотокового приближения при направленном освещении слоя [3], поскольку измерения излучательной способности проводились при малом апертурном угле. Коэффициент поглощения пламени, входящий в формулы двухпотокового приближения, полагался равным сумме коэффициента поглощения частиц \bar{K}_r^n и общего

¹ Значения n были взяты из работы [6] и приведены к температуре с учетом температурной зависимости [7].

Рис. 1. Спектральные коэффициенты рассеяния, поглощения и степени вытянутости индикатрисы рассеяния, рассчитанные для распределений капелек Al_2O_3 по размерам, измеренным на расстоянии 15 (1), 45 (2) 75 мм (3) от горячей поверхности топлива с 15% Al.

коэффициента поглощения H_2O , CO_2 , CO и HCl K_T^{π} . При расчете \bar{K}_T^{π} использовались коэффициенты поглощения H_2O [8], CO_2 , CO и HCl , усредненные² в интервале $\Delta\nu = 25 \text{ см}^{-1}$, и данные термодинамического расчета, согласно которому температура пламени $T = 2980 \text{ К}$, парциальные давления газов H_2O , CO_2 , CO и HCl составляли соответственно 1,73; 0,20; 13,0 и 4,49 атм, массовая доля частиц Al_2O_3 $G = 1,57 \text{ мг/см}^3$, относительная объемная концентрация $C_v = 0,692 \cdot 10^{-4}$. Расчет осуществлялся с шагом по частоте 25 см^{-1} .

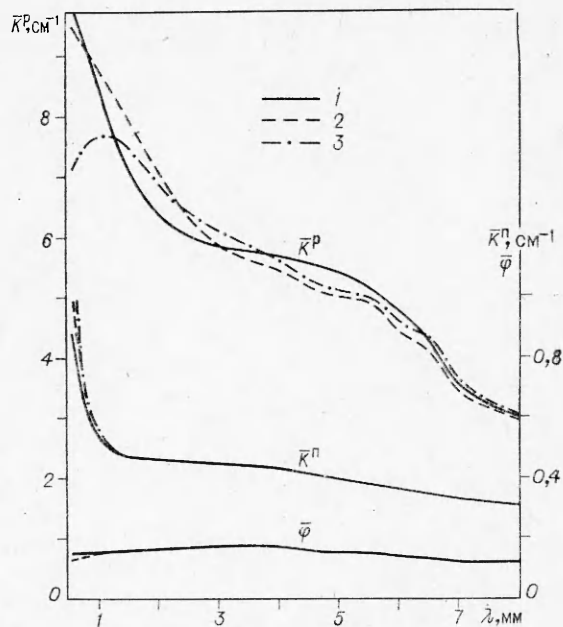
Экспериментальное измерение излучательной способности пламени выполнено при тех же условиях, при которых производился отбор частиц. Образцы топлива диаметром 20 и высотой 10 мм сжигались с торца в камере постоянного давления в среде азота при давлении 40 атм. С помощью скоростного инфракрасного спектропирометра [9] регистрировалось изменение яркости $b_{\lambda}^{\pi\lambda}$ и прозрачности $q_{\pi}^{\pi\lambda}$ пламени во времени по мере сгорания образца. Измерения проводились в направлении, перпендикулярном оси образца, на расстоянии 15, 45 и 75 мм от начальной торцевой поверхности. Чтобы исключить охлаждение продуктов сгорания в результате смешивания с азотом, образцы топлива помещались в керамические трубки соответствующей высоты. Входная щель спектрометра вырезала участок пламени с размерами $0,5 \times 8 \text{ мм}$. Апертурный угол составлял 3° . Измерения проводились в областях минимального поглощения газов на длинах волн 1,5; 2,27; 4,0 и 6,25 мкм. Погрешность определения $b_{\lambda}^{\pi\lambda}$ не превышала 5%. Прозрачность пламени составляла $\sim 0,02 - 0,04$.

Температура пламени определялась по измеренной яркости пламени на длине волны 4,5 мкм, где в связи с сильным поглощением CO_2 и CO рассеяние на частицах минимально, и по рассчитанному коэффициенту черноты при этой длине волны из функции Планка [10]. Измеренная таким образом температура составляла 2930 К и практически совпадала с полученной из термодинамического расчета, что свидетельствовало о достижении высокой полноты сгорания топлива. Обработка осциллограмм производилась на середине участка горения образца.

Спектральная излучательная способность пламени за пределами полос поглощения CO и CO_2 находилась по измеренным яркости и температуре из закона Кирхгофа

$$\alpha_{\lambda}^{\pi\lambda} = \frac{b_{\lambda}^{\pi\lambda}}{b_{\lambda}^0(T^{\pi\lambda})},$$

² Использовались коэффициенты поглощения CO_2 , CO и HCl , полученные Ю. А. Пластининым.



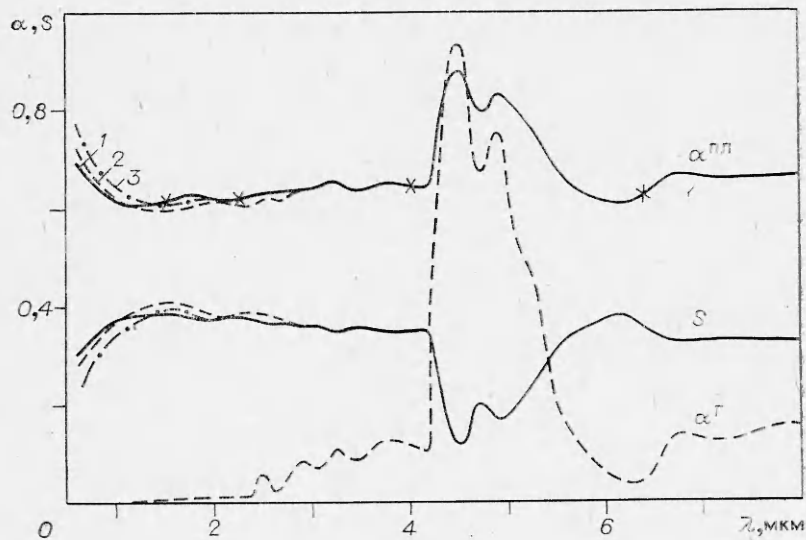


Рис. 2. Спектральная излучательная способность $\alpha^{\text{пл}}$, доля рассеянного излучения S пламени толщиной $Z=1,7$ см и излучательная способность газообразных составляющих пламени α^g . Нумерация линий аналогична рис. 1.

× — экспериментальные точки.

где $b_{\lambda}^0(T^{\text{пл}})$ — функция Планка при температуре пламени. Погрешность определения $\alpha_{\lambda}^{\text{пл}}$ не превышала $\pm 10\%$.

Как показал расчет, полидисперсные коэффициенты рассеяния частиц Al_2O_3 в пламени превосходят коэффициенты поглощения примерно в 10 раз во всей исследуемой области спектра (рис. 1). При изменении длины волны от 0,63 до 8 мкм коэффициент рассеяния уменьшается в 3 раза. Коэффициенты поглощения также уменьшаются с ростом длины волны, несмотря на то, что показатель поглощения κ возрастает. Это кажущееся противоречие объясняется тем, что параметры дифракции крупных частиц, вносящих основной вклад в коэффициенты поглощения [4], приходится на область спада зависимости $\bar{K}^n/C_V \cdot 2\lambda/3\pi = f(\rho_{32})$, когда пропорциональность между \bar{K}^n и κ нарушается [11]. При увеличении ρ_{32} эта зависимость устремляется к виду $K^n/C_V \cdot 2\lambda/3\pi \sim 1/\lambda$, поэтому в области 0,63—1 мкм наблюдается резкий спад коэффициента поглощения.

При укрупнении частиц, вызванном увеличением времени пребывания в пламени от 0,63 до 31 мс, наблюдается уменьшение коэффициентов рассеяния в коротковолновой области спектра (на 35% при $\lambda = 0,63$ мкм). Это обусловлено тем, что коагуляция частиц в пламени приводит к уменьшению количества наиболее мелких частиц, которые, как показано в [4], вносят существенный вклад в полидисперсные коэффициенты рассеяния в коротковолновой области спектра. При длинах волн $\lambda > 1,5$ мкм коэффициенты рассеяния для трех распределений различаются не более чем на 10%. Укрупнение частиц не оказывает заметного влияния на коэффициенты поглощения капель Al_2O_3 . Лишь при $\lambda < 1$ мкм наблюдается увеличение $K^n \sim$ на 15%. Степень вытянутости индикатрисы рассеяния ϕ слабо зависит от длины волны и составляет 0,13; 0,18 и 0,12 при длинах волн 0,63; 4 и 8 мкм соответственно. Наблюдается тенденция к уменьшению величины ϕ в области $\lambda < 1$ мкм при укрупнении частиц.

Частицы Al_2O_3 вносят основной вклад в излучение пламени на всех длинах волн, за исключением области 4—5,5 мкм, где расположены основные полосы поглощения CO и CO_2 (рис. 2). За пределами этих полос на участках 1—4 и 6—8 мкм излучательная способность пламени почти

не зависит от длины волны и составляет при толщине пламени 1,7 см 0,6—0,65 для всех трех распределений. Изменение оптических характеристик в результате коагуляции приводит к незначительному увеличению излучательной способности при $\lambda < 1,5$ мкм.

Таким образом, процесс столкновительной коагуляции оказывает слабое влияние на оптические характеристики капель Al_2O_3 и излучательную способность пламени при длинах волн 1—8 мкм. Лишь при $\lambda < 1$ мкм наблюдается заметное снижение коэффициента

рассеяния и некоторое уменьшение степени вытянутости индикатрисы, а также увеличение коэффициента поглощения и излучательной способности пламени. Характерно, что уже при $Z = 1,7$ см пламя практически непрозрачно в связи с рассеянием на частицах. Доля рассеянного пламенем излучения $S = 0,3—0,4$ за пределами полос CO и CO_2 уменьшается в полосах до 0,12 при $\lambda = 4,5$ мкм. Значения $\alpha^{\text{пл}}$ близки к предельным для бесконечно толстого слоя $\alpha_\infty = 1 - R_\infty$. Как следует из кривых роста $\alpha = f(Z)$ (рис. 3), предельные значения α_∞ равны 0,7; 0,63; 0,66; 0,88 и 0,69 при длинах волн 0,63; 2,2; 4,0; 4,5 и 6 мкм соответственно. Они достигаются при толщине слоя 1 см для $\lambda = 4,5$ мкм, ~ 2 см для $\lambda = 0,63$; 2,2; 4,0 мкм и ~ 3 см для $\lambda = 6$ мкм.

Совпадение экспериментально измеренных и рассчитанных значений излучательной способности пламени (см. рис. 2) свидетельствует о надежности выполненного расчета и измеренных в [3] значений мнимой части комплексного показателя преломления κ .

Поступила в редакцию
4/1 1979

ЛИТЕРАТУРА

1. П. Ф. Похил и др. Горение порошкообразных металлов в активных средах. М., Наука, 1972.
2. Л. П. Бахир, Г. И. Левашенко. ФГВ, 1973, 9, 6.
3. Л. П. Бахир, Г. И. Левашенко, В. В. Таманович. ЖПС, 1977, 26, 514.
4. Л. П. Бахир, Г. И. Левашенко, В. В. Таманович. ФГВ, 1976, 12, 3.
5. Е. К. Науменко, А. П. Пришивалко. Асимметрия индикатрис рассеяния. Препринт Института физики АН БССР. Минск, 1974.
6. G. Plass. Appl. Optics, 1965, 4, 1616.
7. J. H. Malitson. JOSA, 1962, 52, 1377.
8. C. V. Ludwig. Appl. Optics, 1971, 10, 1057.
9. Л. П. Бахир, Г. И. Левашенко. ФГВ, 1976, 12, 6.
10. Л. П. Бахир, Г. И. Левашенко, В. В. Таманович. ЖПС, 1972, 17, 25.
11. Л. П. Бахир, В. В. Таманович. ЖПС, 1973, 18, 894.

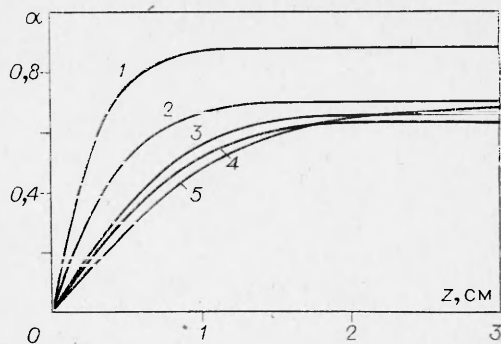


Рис. 3. Кривые роста излучательной способности пламени при длинах волн 0,63(2), 2,2(4), 4,0(3), 4,5(1) и 6 мкм(5).