

4. Алдушин А.П., Мартемьянова Т.М., Мержанов А.Г. и др. Автоколебательное распространение фронта горения в гетерогенных конденсированных средах // ФГВ. — 1973. — 9, № 5. — С. 613—626.
5. Bayliss A., Matkowsky B.J. Two Routes to Chaos in Condensed Phase Combustion // SIAM J. Appl. Math. — 1990. — V. 50, N 2. — P. 437—459.

220728, г. Минск,
Институт тепло- и
массообмена им. А.В. Лыкова

Поступила в редакцию
24/1 1994,
после доработки — 7/VII 1994

УДК 535.36

Г.И. Левашенко, В.В. Симоньков

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ПОСТОЯННЫХ САЖИ В ПРОДУКТАХ СГОРАНИЯ УГЛЕВОДОРОДНОГО ТОПЛИВА ПРИ $\lambda = 10,6$ мкм

Проанализированы литературные данные по оптическим постоянным n и κ сажи в широкой области спектра. Определены значения n и κ при $\lambda = 10,6$ мкм путем измерения размеров и концентрации частиц сажи в продуктах сгорания керосина по ослаблению просвечивающего излучения в коротковолновой области спектра и коэффициента поглощения частиц, который пропорционален объемной концентрации частиц и определяется оптическими свойствами сажи.

При сжигании углеводородного топлива наряду с молекулярными газами образуется полидисперсная сажа, размеры частиц и концентрация которой находятся экспериментально. Для определения параметров и оптических характеристик частиц сажи непосредственно в продуктах сгорания топлив необходимо знать значения показателя преломления n и показателя поглощения κ в широкой области спектра. Обычно n и κ сажи измеряются по интенсивности поляризованного монохроматизированного излучения, отраженного от поверхности таблетки спрессованной сажи. Величины n и κ частиц сажи различного происхождения характеризуются большим разбросом, особенно при длинах волн $\lambda > 2$ мкм (рис. 1).

В [1] получены значения n и κ в области спектра 1—10 мкм для спрессованных таблеток ламповой сажи с содержанием углерода 99,9 % (рис. 1, 3) и сажи, отобранной из потока продуктов сгорания и содержащей 95 % углерода (рис. 1, 3'). В [2] измерения выполнены в области $\lambda = 0,43 \div 10$ мкм для сажи, полученной при сжигании ацетилена (рис. 1, 1) и пропана (рис. 1, 1'), спрессованной при давлении $p = 2800$ кг/см².

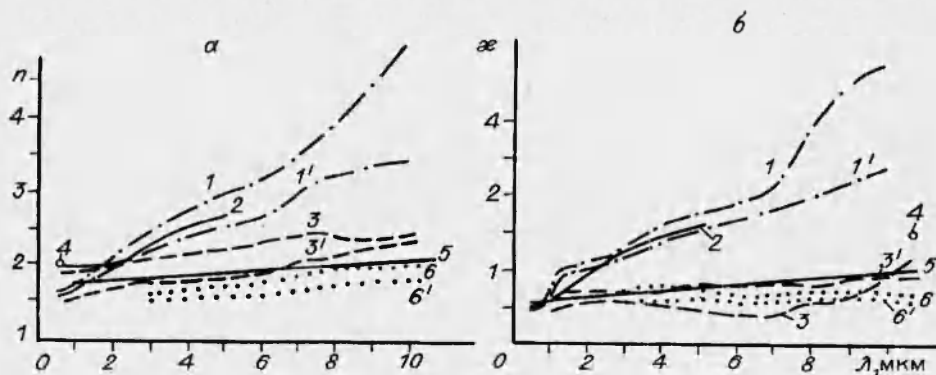


Рис. 1. Оптические постоянные n (а) и κ (б) сажи.

1, 1' — [2]; 2 — [5, 6]; 3, 3' — [1]; 4 — [4]; 5 — данные настоящей работы с экстраполяцией в сторону коротких волн; 6, 6' — [3].

© Г.И. Левашенко, В.В. Симоньков, 1995

Атомарное отношение Н/С для ацетиленовой сажи составляло 0,07, а для пропановой 0,21. В [3] n , κ определены в области спектра 3—14 мкм для черной (рис. 1, б) и ламповой (рис. 1, б') сажи, спрессованной в таблетки при $p = 260$ кг/см². На рис. 1, 4 приведены данные работы [4], полученные для спрессованной ацетиленовой сажи при $\lambda = 0,51$ и 10,6 мкм.

В указанных работах не учитывались пустоты в таблетках, объем которых определялся структурой частиц и давлением прессования и мог достигать 30 %. В [5] расчетным путем учитывалось наличие пустот, приводящих к занижению n и κ , что позволило уточнить n и κ из [2] и получить усредненные для сажи углеводородных топлив значения оптических постоянных, приведенные в [6] (рис. 1, б). Показатель преломления мало чувствителен к отношению Н/С в топливе и к температуре до 1700 К [6, 7]. На измерения n существенно влияет поверхностная структура образца, но слабо — химический состав сажи. Показатель поглощения более чувствителен к различию в химическом составе сажи. Увеличение атомарного отношения Н/С, приводящее к снижению концентрации свободных электронов, вызывает уменьшение κ .

Разброс экспериментальных значений n и κ можно объяснить как различием источников и условий образования сажи, так и отличием используемых методик и условий измерений. Отклонение n и κ от средних значений в коротковолновой области спектра не превышает 15 %, в то время как при $\lambda \sim 10$ мкм оно достигает 50 % (см. рис. 1). Это затрудняет их использование для расчета оптических характеристик продуктов сгорания при больших длинах волн, например в области излучения CO₂-лазеров.

Из анализа литературных данных для сажи выведена простая эмпирическая зависимость

$$\kappa = n - 1,1, \quad (1)$$

которая с удовлетворительной точностью (≈ 15 %) описывает известные экспериментальные значения при $\lambda = 0,5 \div 11$ мкм.

Настоящая работа предпринята для определения оптических постоянных n , κ сажи при $\lambda = 10,6$ мкм с использованием эмпирической зависимости (1) и измерений коэффициента ослабления сажи в продуктах сгорания керосина, а также размеров и объемной концентрации частиц, которые находились независимым способом по ослаблению излучения на трех длинах волн с $\lambda < 2$ мкм.

Параметры частиц сажи в продуктах сгорания керосина измеряли на газодинамической установке в камере диаметром 9 см перед сопловым блоком [8]. Керосин ТС-1 сжигали в атмосфере воздуха, подогретого до 620 К при коэффициенте избытка его $\alpha_1 = 1,15$ с последующим вдувом вторичного воздуха при $\alpha_2 = 1,15$. Время пребывания частиц сажи в потоке составляло 0,02 с. Химический состав сажи Н/С = 0,35. Оптические окна, установленные в карманах измерительной камеры, защищали азотом с помощью специального устройства, обеспечивающего оптимальный обдув [9]. Давление и температуру в исследуемой зоне продуктов сгорания определяли датчиками давления и температуры.

Измерения проводили с помощью инфракрасного фильтрового спектрофотометра "Свирель-М" [10]. В осветителе спектрофотометра применялась вольфрамовая ленточная лампа, а в блоке приемника — двойные интерференционные фильтры с $\lambda_{\max} = 0,65, 1,25$ и 1,65 мкм. Пространственное разрешение спектрофотометра составляло 15 мм, а время измерений на трех длинах волн 0,03 с.

Средние размеры и концентрацию частиц сажи определяли по ослаблению излучения, измеренному при $\lambda = 0,65, 1,25$ и 1,65 мкм (в минимумах поглощения молекулярных газов H₂O, CO₂, CO), и значениям полидисперсных коэффициентов ослабления, рассчитанных по формулам теории Ми [11, 12]. При этом использовали γ -функцию распределения частиц по

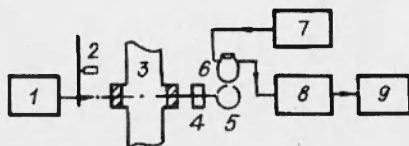


Рис. 2. Схема установки для измерения коэффициента пропускания продуктов сгорания при $\lambda = 10,6$ мкм.

1 — CO₂-лазер ЛГ-23; 2 — модулятор; 3 — измерительная камера; 4 — дисперсионный фильтр с $\lambda_{\max} = 10,6$ мкм; 5 — сфера; 6 — приемник излучения "Свод"; 7 — блок питания; 8 — узкополосный усилитель с детектором и низкоомным выходом; 9 — светолучевой осциллограф.

размерам с параметром полуширины $\mu = 3$ и средние из [1—5] (см. рис. 1) значения n и κ , которые при указанных λ соответственно равны: 1,6 и 0,5; 1,70 и 0,60; 1,80 и 0,70. Значения концентраций H₂O и CO₂ в продуктах сгорания керосина перед сопловым блоком, необходимые для учета поглощения излучения этими газами при $\lambda = 10,6$ мкм, измеряли одновременно с параметрами частиц сажи по методике [8]. В измерительной камере давление $p = 10$ атм, $T = 1200$ К, объемная концентрация сажи $c_v = 0,6 \cdot 10^{-6}$, модальный радиус частиц сажи $r_0 = 0,13$ мкм, концентрации $q_{\text{H}_2\text{O}} = 6\%$, $q_{\text{CO}_2} = 4\%$. Эти результаты получены через 3—5 с работы установки в основном режиме путем усреднения данных за три опыта.

Частицы сажи с модальным радиусом $r_0 = 0,13$ мкм для излучения с $\lambda = 10,6$ мкм являются малыми частицами с релеевским поглощением. Для них спектральный коэффициент ослабления $K_c(\lambda)$ равен коэффициенту поглощения $K_c(\lambda)$, который пропорционален объемной концентрации частиц c_v и определяется оптическими свойствами сажи [2]:

$$K_c(\lambda) = \frac{36n^2 \kappa (\pi/\lambda) c_v}{[n^2(1 - \kappa^2) + 2]^2 + 4n^4 \kappa^2} \quad (2)$$

Коэффициент пропускания исследуемого слоя продуктов сгорания при $\lambda = 10,6$ мкм измеряли по схеме, приведенной на рис. 2, на установке, работающей в том же режиме, что и во время измерения параметров частиц сажи. Он определялся по отношению сигналов от просвечивающего источника при наличии исследуемой среды и без нее непосредственно перед и после пуска установки. Обработывались только те опыты, в которых сигнал без исследуемой среды до пуска и после был одинаковым. В этом случае предполагалось, что во время измерений (10—15 с) мощность излучения лазера постоянна. В качестве просвечивающего источника использовался лазер ЛГ-23, генерирующий в конкурирующих линиях P_{18} ($\lambda = 10,571$ мкм) и P_{20} ($\lambda = 10,591$ мкм) P -ветви.

В продуктах сгорания углеводородного топлива просвечивающее излучение при $\lambda = 10,6$ мкм поглощается не только частицами сажи, но и газами (H₂O и CO₂). Коэффициент пропускания, обусловленный наличием частиц сажи,

$$\tau_c = \tau^s / (\tau_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \tau_{\text{CO}_2}), \quad (3)$$

где τ^s — экспериментальный коэффициент пропускания;

$$\tau_{\text{H}_2\text{O}, \text{CO}_2} = e^{-K_{\text{H}_2\text{O}, \text{CO}_2} p_{\text{H}_2\text{O}, \text{CO}_2} z}, \quad (4)$$

z — толщина исследуемого слоя; $p_{\text{H}_2\text{O}}$ и p_{CO_2} — парциальные давления H₂O и CO₂ в камере, измеренные по ослаблению просвечивающего излучения при $\lambda = 2,53$ и $2,74$ мкм аналогично [8] с использованием коэффициентов поглощения из [13]. Коэффициент поглощения $K_{\text{H}_2\text{O}}$ при $T = 1200$ К, усредненный для линий P_{18} и P_{20} зондирующего лазера, заимствован из [14]. Измеренный на ударной трубе с помощью CO₂-лазера, он значительно ниже значения, полученного в [13] с малым разуршением. Коэффициент поглощения K_{CO_2} при

температуре продуктов сгорания для излучения зондирующего лазера с $\lambda = 10,6$ мкм, усредненный для линий P_{10} и P_{20} , из работы [15].

Коэффициент поглощения частиц сажи находили по формуле $K_c = -\frac{1}{z} \ln \tau_c$, определяемой законом Бугера. В результате получено $K_{H_2O} = 0,005 \text{ см}^{-1}$, $K_{CO_2} = 0,024 \text{ см}^{-1}$, $\tau^s = 0,87$, $\tau_{H_2O} = 0,97$, $\tau_{CO_2} = 0,92$, $K_c = 0,003 \text{ см}^{-1}$.

Оптические постоянные сажи при $\lambda = 10,6$ мкм, $n = 2,2$, $\kappa = 1,1$, определенные с помощью уравнений (1) и (2), приведены на рис. 1, 5. С учетом хода зависимостей $n(\lambda)$ и $\kappa(\lambda)$ (см. рис. 1) можно провести экстраполяцию полученных значений n и κ для $\lambda = 10,6$ мкм в сторону коротких длин волн. Относительные погрешности определения n и κ состоят из погрешностей: эмпирической зависимости (1) — (15 %), измерения объемной концентрации (15 %), а также нахождения коэффициента поглощения сажи (60 %) и не превышают соответственно 25 % и 45 %.

Полученные значения n , κ , а также результаты экстраполяции меньше данных [6] и очень близки к приведенным в [1, 3] (см. рис. 1).

Таким образом, полученные значения n , κ при $\lambda = 10,6$ мкм для сажи, образующейся при сжигании керосина, могут быть использованы при определении оптических свойств продуктов сгорания углеводородного топлива.

ЛИТЕРАТУРА

1. Foster P.Y., Howarth C.R. // Carbon. — 1968, N 5. — P. 719—729.
2. Далзелл, Сарафим. Тр. Амер. общ. инж.-мех. Теплопередача. — 1969. — № 1. — С. 95—102.
3. Tomaselli V.P., Pivera R., Edewaard D.C., Moller K.D. // Appl. Optics. — 1981. — 20, N 22. — P. 3961—3967.
4. Roessler D.M., Faxvog F.R. // Y. Opt. Soc. Amer. — 1980. — 70, № 2. — P. 230—235.
5. Lee S.C., Tien C.L. 18th Symp. (Intern.) on combustion. Ontario. Canada, 1980.
6. Барт, Пагин. Тр. Амер. общ. инж.-мех. Теплопередача. — 1981. — № 2. — С. 205—212.
7. Carmen, Batten E. // Appl. Optics. — 1985. — 24, N 8. — P. 1193—1195.
8. Бахир Л.П., Беляков Ю.М., Левашенко Г.И. и др. Газодинамическая установка с автоматизированной системой диагностики для исследования кинетики процессов в ГДЛ на горение // ФГВ. — 1985. — 21, № 4. — С. 79—87.
9. Левашенко Г.И., Симоньков С.В., Анцулевич В.И. Определение размеров и содержания частиц сажи в продуктах сгорания керосина // ФГВ. — 1986. — 22, № 6. — С. 108—112.
10. Левашенко Г.И., Мазяев Н.В., Немченко В.А. и др. // ОМП. — 1985. — № 4. — С. 18—20.
11. Левашенко Г.И., Анцулевич В.И., Дидюков А.И., Вазюлин В.А. Определение параметров частиц Na в двухфазном потоке // ФГВ. — 1983. — 21, № 6. — С. 67—73.
12. Шифрин К.С. Рассеяние света в мутной среде. — М.: Гостехиздат, 1951.
13. Ludwig C.B., Malkmus W., Reardon Y.E. et al. Handbook of Infrared Radiation from Combustion Lasers. NASA. Washington DC, 1973.
14. Пью Э.Р., Креч Р.Х. // Аэрокосмическая техника. — 1983. — 1, № 1. — С. 150—151.
15. Ачасов С.В., Солоухин Р.И., Фомин Н.А. Диагностика газовых потоков с применением резонансного поглощения / АНБ. Ин-т тепло- и массообмена. — Препр. № 8. — Минск, 1981. — 48 с.

220602, г. Минск,
Институт физики им. Б.И. Степанова
АН Белоруссии

Поступила в редакцию
15/XII 1993,
после доработки — 1/VI 1994