

В.И. Букатый, М.Ю. Свердлов, И.А. Суторихин

ДИНАМИКА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ВОКРУГ ГОРЯЩЕЙ В ПОЛЕ ИЗЛУЧЕНИЯ АЭРОЗОЛЬНОЙ ЧАСТИЦЫ

Оптическое возмущение среды вокруг аэрозольной углеродной частицы, горящей в поле мощного лазерного излучения, обусловлено рядом факторов: процессами тепло- и массопереноса, протекающей гомогенной реакцией догорания окиси углерода, фрагментацией частицы, возникновением конвективных потоков. В работе экспериментально методом сдвиговой интерферометрии исследованы пространственные и временные зависимости показателя преломления в окрестности горящей сажистой частицы. Показано, что в начале процесса горения преобладает термодиффузия и форма оптической неоднородности близка к сферической. Спустя 5–10 мс от начала воздействия, развивается свободная конвекция. Обсуждаются возможности интерференционных методов при изучении оптической неоднородности горящей аэрозольной частицы.

В окрестности твердой аэрозольной частицы, горящей в поле мощного лазерного излучения, существенно изменяются термодинамические и оптические параметры окружающей среды.

При взаимодействии мощного излучения с горючим углеродным аэрозолем типа сажи, дыма, угля и т. п., интерес представляют знания полей температуры и показателя преломления вокруг горящих частиц. Оптическое возмущение среды вокруг частицы, горящей в поле излучения средней интенсивности, обусловлено рядом факторов: процессами тепло- и массопереноса, протекающей гомогенной реакцией догорания окиси углерода, а также фрагментацией частицы. На форму индуцированной оптической неоднородности влияют возникающие конвективные потоки [1]. Теоретические расчеты полей показателя преломления, температуры и парциального давления газовых компонент вокруг горящих частиц представлены в [2, 3].

Наиболее перспективными способами при экспериментальном исследовании подобных явлений являются интерференционные методы, которые не вносят возмущения в исследуемый объект и характеризуются безынерционностью и высокой разрешающей способностью.

Чувствительность интерференционных методов можно оценить из соотношения, связывающего число интерференционных полос N , возникающих при прохождении зондирующего излучения через фазовый объект размером l , с показателем преломления n , отличным от показателя преломления окружающей среды n_0 [4]:

$$N \sim \frac{l}{\lambda} (n_0 - n), \quad (1)$$

где λ — длина волны зондирующего излучения. Подставляя в (1) численные значения l и n , полученные в [2] для случая горения аэрозольных частиц, имеем, что по крайней мере для частиц, радиус которых $a > 10$ мкм.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование пространственно-временной зависимости показателя преломления вокруг сажистой частицы, горящей в поле излучения CO_2 -лазера. Для этой цели использовался интерферометр сдвига [5], в котором интерференционные полосы образуются, благодаря переналожению двух идентичных по форме, одинаково искаженных неоднородностью волновых поверхностей. В качестве объекта исследования были выбраны частицы сажи марки ПМ–100, на которые направлялось сфокусированное излучение CO_2 -лазера. Плотность мощности воздействующего излучения изменялась от 10^2 до $1,7 \cdot 10^3$ Вт/см². Возникающая интерференционная картина регистрировалась скоростной кинокамерой, что позволило проследить динамику оптической неоднородности горящей частицы.

Связь между показателем преломления и температурой газа в случае кинетического режима горения углеродных частиц в поле мощного лазерного излучения с помощью формулы Лоренц–Лоренца показана в [3]. Так как интерференционный метод позволяет определить n , следовательно, и температуру газа вокруг горящей частицы, а не на ее поверхности, интерес представляет измерение температуры поверхности $T_s(t)$ пирометром спектрального отношения [6]. Типичная зависимость $T_s(t)$ приведена на рис. 1.

Исследования проводились с частицами диаметром $d = 20 - 300$ мкм. В результате проведенных экспериментов были получены интерферограммы, отвечающие с высокой степенью точности требованиям осевой симметрии. Это позволило для их расшифровки использовать известное интегральное уравнение Абеля [4, 7]

$$n_0 - n(r) = \frac{\lambda}{\pi} \int_r^R \frac{dK(x)/dx}{\sqrt{x^2 - r^2}} dx, \quad (2)$$

где R — размер области оптической неоднородности; r — радиальная координата в плоскости сечения; $K(x)$ — функция числа полос. Эта функция показывает, сколько возникает интерференционных полос в результате появления оптической неоднородности.

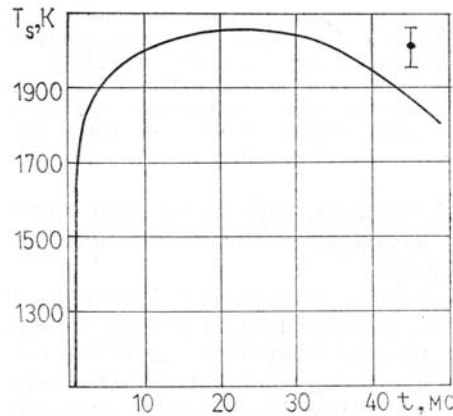


Рис. 1. Динамика температуры поверхности $T_s(t)$ сажиистой частицы радиусом $a = 150$ мкм, интенсивность излучения $I = 1,7 \cdot 10^7$ Вт/м² (В правом верхнем углу показан разброс экспериментальных данных)

Поскольку $K(x)$ задается не аналитически, а в виде экспериментальных кривых, то для решения уравнения (2) обычно используют численные методы [4, 7]. Построение функции $K(x)$ проводилось по точкам, лежащим на серединах интерференционных полос. При исследовании оптического возмущения горячей частицы диаметром $d \leq 150$ мкм на интерферограммах возникают не более одной светлой и двух темных полос, т.е. $K(x)$ задается четырьмя экспериментальными точками — три точки лежат на серединах интерференционных полос и одна — на границе области оптического возмущения.

Малое количество экспериментальных точек приводит к снижению точности расчета численных значений показателя преломления. Предполагая, что на границе области оптической неоднородности показатель преломления n плавно возрастает до значения n_0 , а также используя осевую симметрию, можно записать дополнительные условия на функцию $K(x)$

$$\left. \frac{dK(x)}{dx} \right|_{x=0} = \left. \frac{dK(x)}{dx} \right|_{x=R} = 0, \quad K(0) = K_{\max}, K(R) = 0. \quad (3)$$

Представляя экспериментальную функцию $K(x)$ в виде степенного многочлена $K(x) = \sum_i C_i x^i$ с учетом граничных условий (3), уравнение (2) можно решить аналитически. Результаты обработки интерферограмм приведены на рис. 2.

В результате экспериментов получено, что температура воздуха вокруг горячей частицы радиусом 150 мкм на расстоянии 300 мкм от ее центра, спустя 50 мс от начала горения, составила $\sim 1000^\circ\text{K}$, тогда как на поверхности $T_s \sim 1700^\circ\text{K}$ (рис. 1). Это указывает на резкий спад температуры вблизи частицы.

Интересно сравнивать также данные теории и эксперимента. В работах [2, 3] показано, например, что размеры оптической неоднородности составляют $l \sim 50$ а, а в наших опытах горизонтальный размер $l \sim (60 \div 70)$ а. Более корректное сопоставление провести не удастся ввиду того, что модель [2, 3] не описывает начальную стадию горения, а также не учитывает возникающую конвекцию, что имеет место в экспериментах.

Анализ полученных интерферограмм показал, что скорость роста размеров оптической неоднородности для исследуемых частиц составила $0,1 - 0,6$ м/с. На рис. 3 приведена зависимость размеров оптической неоднородности от времени. Горизонтальный размер l_{\perp} , спустя 20–30 мс после начала воздействия, достигает максимального значения и не изменяется за все время горения. Вертикальный размер l_{\parallel} за счет возникающей свободной конвекции постоянно растет в процессе горения.

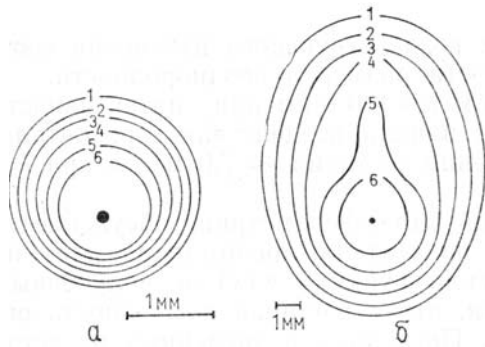


Рис. 2. Карты изолиний $(n-1) \cdot 10^4$ спустя 0,5 мс (а), 50 мс (б) после начала воздействия. Радиус частицы $a = 150$ мкм, $I = 1,7 \cdot 10^7$ Вт/см². Численные значения изолиний соответствуют 1 – 2,65 (окружающая среда), 2 – 2,5; 3 – 2,1; 4 – 1,7; 5 – 1,3; 6 – 0,9

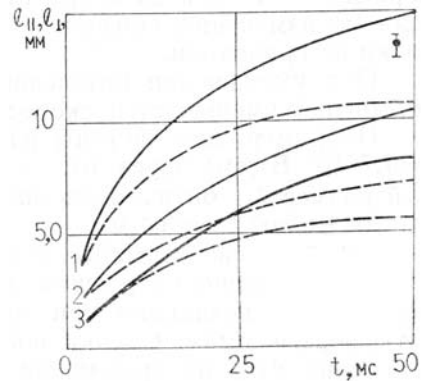


Рис. 3. Зависимость вертикального $l_{||}$ (сплошная кривая) и горизонтального l_{\perp} (пунктирная кривая) размеров оптической неоднородности горящих частиц сажи различных размеров от времени: $I = 1,7 \cdot 10^7$ Вт/м², $a = 150$ мкм (1), 100 мкм (2) и 50 мкм (3)

В начале процесса горения форма оптической неоднородности близка к сферической, а спустя 5–10 мс от начала воздействия, как видно из рис. 3, вертикальный размер увеличивается быстрее, что обусловлено возникающей конвекцией.

Диффузионное проникновение l_d , согласно соотношению Эйнштейна с учетом реальной зависимости коэффициента диффузии D от температуры T [8], зависит от времени t следующим образом:

$$l_d \sim \sqrt{D_0 \left(\frac{T}{T_0}\right)^m \cdot t}, \quad (4)$$

где D_0 – коэффициент диффузии при нормальных давлении и температуре окружающей среды T_0 ; m – эмпирическая константа. Макроскопическое смещение газа, вызванное свободной конвекцией, имеет вид [9]

$$l_k \sim \frac{g}{2} \left(\frac{T}{T_0} - 1\right) t^2, \quad (5)$$

где g – ускорение свободного падения. Соотношение (5) получено при анализе уравнения движения объема газа под действием архимедовой силы при ламинарном режиме и без учета вязкости газа, что реализуется в начале процесса горения.

Как видно из (4) и (5), $l_d \sim \sqrt{t}$, а $l_k \sim t^2$, поэтому оценка дает, что при $t < 5 - 10$ мс $l_d > l_k$. Это объясняет наличие сферической симметрии оптической неоднородности в начале процесса горения.

Специально проведенные эксперименты показали, что после механического удаления горячей частицы из области оптической неоднородности, спустя 30–50 мс, происходит замывание этой области. Также в опытах наблюдалась фрагментация частицы и разлет осколков размерами 5–10 мкм со скоростями $\sim (0,1 - 0,5)$ м/с. Однако к существенному изменению симметрии оптической неоднородности нагретые осколки не приводили.

При уменьшении интенсивности воздействующего излучения соответственно уменьшается скорость роста размеров неоднородности.

Например, для частицы радиусом $a = 130$ мкм при интенсивности $I = 1,7 \cdot 10^3$ Вт/см² через 10 мс после начала воздействия горизонтальный размер l_{\perp} оптического возмущения составил $\sim 7,0$ мм, а при $I = 2,5 \cdot 10^2$ Вт/см² $l_{\perp} = 3,4$ мм.

Ошибки, свойственные сдвиговой интерферометрии, обсуждаются в [5]. Погрешности расчета поля показателя преломления $n(r)$ по формуле (2) возникают при построении функции $K(x)$ по полученным интерферограммам. Оценки показали, что суммарная погрешность определения $n(r)$ не превышает 10%. Погрешность численных расчетов $n(r)$ при обработке интерферограмм горения частиц размером $d < (80 - 100)$ мкм повышается вследствие уменьшения количества экспериментальных точек.

Таким образом, проведенное исследование указывает на то, что интерференционные методы можно успешно применять для изучения оптической неоднородности вокруг горячей аэрозольной частицы. Полученные временные зависимости параметров оптического возмущения позволяют проследить роль свободной конвекции, приводящей к асферичности формы оптической неоднородности.

Показано, что в первые 5–10 мс для частиц радиусом 10–150 мкм форма оптического возмущения имеет сферическую геометрию.

1. Свердлов М. Ю., Букатый В. И. — Тез. докл. III Всес. совещания по распространению лазерного излучения в дисперсной среде. — Обнинск, 1985, ч. IV, с. 154–156.
2. Жданов Е. П., Шайдук А. М. — Тез. докл. II Совещания по атмосферной оптике. — Томск, 1980, ч. III, с. 91–94.
3. Букатый В. И., Шайдук А. М. — Тез. докл. II Всес. совещания по распространению лазерного излучения в дисперсной среде. — Обнинск, 1982, ч. II, с. 137–140.
4. Островский Ю. И., Бутусов М. М., Островская Г. В. Голографическая интерферометрия. — М.: Наука, 1977. — 336 с.
5. Оптические методы исследований в баллистическом эксперименте/Под ред. Г.И. Мишина. — Л.: Наука, 1979. — 232 с.
6. Краснопевцев В. Н., Суторихин И. А. и др. — Распространение мощного оптического излучения в твердом аэрозоле (Межвузовский сборник). Барнаул, 1982, с. 75–82.
7. Вест Ч. Голографическая интерферометрия. — М.: Мир, 1982. — 504 с.
8. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. — М.: Наука, 1972. — 720 с.
9. Кушнырев В. И., Лебедев В. И., Павленко В. А. Техническая термодинамика и теплопередача. — М.: Стройиздат, 1986. — 464 с.

Алтайский госуниверситет,
Барнаул

Поступила в редакцию
4 марта 1988 г.

V. I. Bukaty, M. Yu. Sverdlov, I. A. Sutorikhin. Refractive Index Distribution Dynamics in the Neighbourhood of an Aerosol Particle Being Burnt by a Radiation Field.

Space and time behaviour of the refractive index in the vicinity of a soot particle being burnt by a high-power laser field was studied experimentally using shift interferometry. At the start of the combustion thermal diffusion is shown to dominate over other processes involved and the optical inhomogeneity is close to the spherical shape. Free convection is found to develop 5–10 ms after the laser irradiation. Capabilities of interferometric methods for this kind of investigations are discussed.