

НЕЛИНЕЙНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В АТМОСФЕРЕ И ОКЕАНЕ

УДК 621.373.826.038.823

В.А. Погодаев

ЧАСТИЦА ГРУБОДИСПЕРСНОГО ТВЕРДОГО АЭРОЗОЛЯ В ИНТЕНСИВНОМ СВЕТОВОМ ПОЛЕ: ВЛИЯНИЕ НАЧАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЧАСТИЦЫ НА РАЗВИТИЕ ОБЛАСТИ ВОЗМУЩЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Представлены результаты физического эксперимента в задаче взаимодействия интенсивного лазерного излучения с отдельными частицами твердофазного аэрозоля (сажа, каменный уголь, SiO_2). Показано, что оптически активным ядром в области возмущения среды является светящаяся область, заполненная фрагментированными частицами.

Распространение интенсивного лазерного излучения (ИЛИ) в запыленной атмосфере сопровождается рядом нелинейных оптических эффектов, развивающихся вследствие поглощения энергии излучения аэрозольными частицами. Одним из наиболее низкопороговых нелинейных эффектов, вызывающим термодинамическое возмущение среды при взаимодействии ИЛИ с твердыми аэрозольными частицами, является горение углеродных частиц. В окрестности взаимодействующей с ИЛИ частицы изменяются термодинамические и оптические параметры окружающей среды. Возникающие градиенты показателя преломления обусловлены рядом факторов: процессами тепло- и массопереноса [1, 2], фрагментацией частицы [1, 3–5], гомогенной реакцией горения окиси углерода и водорода [6, 7], возникновением конвективных потоков [8]. Влиянию ореольного рассеяния на коэффициент ослабления аэрозольной среды посвящено большое количество работ (результаты сведены в [2]). Но экспериментальной проработке энергетических порогов, механизмов образования, размеров и формы области оптических возмущений среды вокруг аэрозольных частиц, их динамике уделено недостаточное внимание [9 – 12]. Причина этого заключается в серьезных трудностях методического плана, в невозможности прямыми методами проиллюстрировать процесс развития оптического возмущения в окрестности аэрозольных частиц, преобладающих в реальной атмосфере ($a_0 \approx 10$ мкм).

Данная статья посвящена экспериментальному исследованию влияния начальных микрофизических характеристик частиц грубодисперсного аэрозоля на возникновение области оптического возмущения, инициируемой ИЛИ вблизи частицы.

В качестве регистратора процесса использовались методы скоростной микрокиносъемки при длительном времени взаимодействия излучения и частицы и фотосъемки при временах взаимодействия, не превышающих 2 мс.

Воздействие ИЛИ на аэрозоль осуществлялось либо непрерывным излучением CO_2 -лазера, либо излучением импульсного лазера с длиной волны $\lambda = 1,06$ мкм (длительность импульса излучения $\sim 10^{-3}$ с).

Объектами исследования были выбраны два типа аэрозольных частиц: воспламеняющиеся при облучении мощным световым полем (уголь, сажа) и невоспламеняющиеся, тугоплавкие (SiO_2).

На рис. 1 представлены профили распределения светимости частиц различного состава в плоскости горизонтального сечения. Профили получены фотометрированием кадров скоростной микрокиносъемки по диаметру частицы ($2 a_0$). Величина r определяет границу зоны светимости в окрестности аэрозольной частицы, взаимодействующей с ИЛИ. Выбраны кадры с максимальным свечением, соответствующие квазистационарному состоянию температурного режима поверхности частицы (~ 30 мс от начала воздействия). Стрелкой показано направление

воздействия ИЛИ. Профили обладают достаточно сильной асимметрией. Наибольшая симметричность профилей наблюдается для тугоплавких частиц после оплавления поверхности.

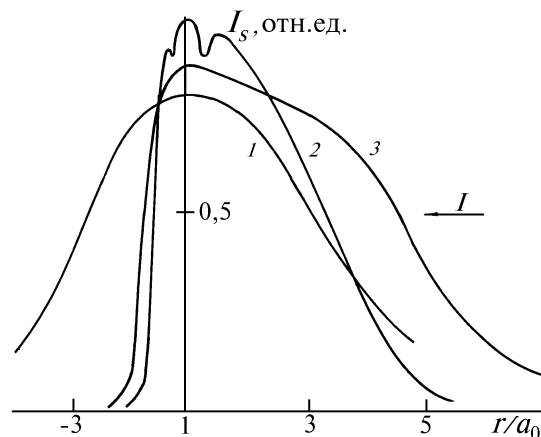


Рис. 1. Распределение границ светящейся области вокруг аэрозольных частиц, взаимодействующих с ИЛИ: $I = 2,5 \cdot 10^2 \text{ Вт/см}^2$; $a_0 = 50 \text{ мкм}$. 1 – частица SiO_2 ; 2 – частица каменного угля; 3 – частица сажи

Модуляция профиля для угольных частиц вызвана наличием в окрестности горящей частицы гомогенных реакций горения CO_2 и H_2 [6, 7]. В процессе выгорания углеродосодержащих частиц величина r/a_0 в теневой полусфере растет, однако симметричность картины не достигается. Профили угольных частиц становятся сравнимыми с профилем для тугоплавких частиц после полного выгорания углерода и образования шлакового остатка. По мере выгорания угольных частиц светимость ореола падает и для шлакового остатка сравнивается со светимостью SiO_2 .

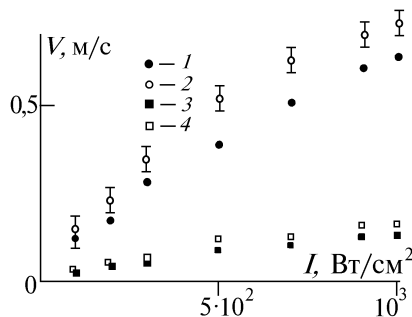


Рис. 2. Скорость распространения границы светящейся области в окрестности горящей частицы сажи: 1, 3 – $t = 5 \cdot 10^{-4} \text{ с}$; 2, 4 – $t = 10^{-3} \text{ с}$; 1, 2 – скорость распространения от освещенной поверхности частицы; 3, 4 – от теневой

Скорость распространения (v) области оптического возмущения среды вокруг горящих частиц на начальном этапе существенно зависит от интенсивности воздействующего излучения I (пример зависимости иллюстрируется на рис. 2). За начало отсчета принято время воспламенения $t_{\text{в}}$ частицы в пучке ИЛИ. Точками нанесены значения, усредненные по 5...10 реализациям. Диапазон разброса полученных значений v показан вертикальными отрезками. Конечный размер светящегося ореола зависит от интенсивности излучения, размеров частицы и пучка ИЛИ. Основными продуктами горения углеродной частицы являются CO и CO_2 , имеющие отличные от воздуха показатели преломления. Значительная доля объема частицы (особенно сажи) в процессе горения фрагментирует ($a_{\text{ф}} \ll a_0$). Оценка возможных механизмов возникновения оптического возмущения в окрестности горящей частицы показывает, что за счет увеличения парциальных давлений газовых продуктов горения изменение значения $(n-1)$ воздуха на расстоянии $r \sim 3 a_0$ ($a_0 \approx 100 \text{ мкм}$) не превышает 5% [6]. Вследствие прогрева окру-

жающей среды ($n-1$) изменяется примерно на 80%. Это позволяет сделать вывод о том, что оптические возмущения в окрестности твердых аэрозольных частиц обусловлены в основном кондуктивным прогревом среды и фрагментацией. Согласно [11] смещение границ температурного фронта от частицы за счет кондуктивного прогрева и свободной конвекции пропорционально \sqrt{t} и t^2 . При $t > 10^{-2}$ с возмущения среды, вызванные свободной конвекцией, преобладают. При импульсном режиме воздействия ИЛИ на аэрозольную среду свободную конвекцию можно не учитывать.

Для углеродных частиц вытянутость профилей навстречу ИЛИ (см. рис. 1) свидетельствует о невыполнении требования теоретической модели о сферически-симметричном выгорании частиц [13] и обусловлена фрагментацией. Если судить о форме области возмущения вокруг частицы сажи по скоростям фрагментированных частиц, то подобие сферической симметрии наблюдалось для крупных частиц ($a_0 \sim 100$ мкм) лишь по прошествии времени, необходимого для нагрева частицы до максимальной температуры $t_n \sim \rho^c C_p^c a_0^2 / \mu(T)$. Здесь C_p^c , ρ^c – теплоемкость и плотность вещества частицы; $\mu(T)$ – теплопроводность воздуха. Согласно экспериментальным данным к моменту времени t_n частица значительно выгорает ($a \sim 0,2 a_0$). Для частиц с $a_0 \sim 10 \dots 20$ мкм t_n практически совпадает с временем воспламенения, т. е. возникновение сферически-симметричного выгорания должно определяться t_n . В экспериментах же наблюдается односторонний разлет вещества частиц и только спустя $t \sim (2 \dots 3) t_n$ разлет переходит на теневую поверхность частицы. При этом скорости фрагментации вещества всегда выше для освещенной поверхности.

Таким образом, оптическая активность области возмущения существенно зависит от наличия в ней горящих фрагментов первоначальной частицы. Рассмотрим условия поддержания горения таких частиц. Известно, что вторичные частицы ($a_\phi \sim 1 \dots 2$ мкм) способны к горению некоторое время и при отсутствии облучения [1]. Тем не менее после прекращения облучения скорость горения фрагментированных частиц сажи падает минимум в 2 раза (с 0,02 м/с до $\leq 0,01$ м/с при $I \sim 2 \cdot 10^3$ Вт/см²).

Оценка скоростей горения малых частиц была получена фотометрированием их следа на фотопленке до и после прекращения облучения. Прекращение облучения осуществлялось выходом фрагмента из пучка ИЛИ за $t \sim 2 \cdot 10^{-4}$ с. Радиус вторичной частицы ($a_\phi \sim 2$ мкм) может при этом измениться на $\sim 30\%$ (при $I \sim 10^5$ Вт/см² [14]). При значениях интенсивности ИЛИ, меньших или равных 10^3 Вт/см², следует ожидать небольшого изменения a_ϕ . Следовательно, уменьшение скорости горения вызвано нарушением теплового баланса частицы (выключение внешнего энергетического источника). Выявлена зависимость времени горения вторичных частиц от a_0 и I . Оценки температурного поля вокруг первоначальной частицы ($a_0 \sim 100$ мкм, $I \sim 2 \cdot 10^3$ Вт/см²) показывают, что на расстоянии радиуса от поверхности температура окружающей среды становится сравнимой с температурой воспламенения углерода. Изменение интенсивности до $(6 \dots 7) \cdot 10^2$ Вт/см² увеличивает прогретую зону до $r \sim 3 a_0$. Скорость горения разлетающихся вторичных частиц после прекращения облучения не изменялась до тех пор, пока не была пройдена прогретая зона.

Условия поддержания горения вторичных частиц угля ($a_0 \sim 3 \dots 5$ мкм) аналогичны условиям, приведенным выше для сажи.

Начальный этап развития области оптического возмущения для угольных частиц определяется их минеральным составом. Нагрев угольных частиц приводит к разрыву связей макромолекул органической массы угольного вещества, что приводит к образованию газообразных летучих веществ, при определенной температуре ($T \gtrsim 380^\circ\text{K}$) воспламеняющихся и сгорающих в окрестности частицы. При сгорании частиц углей за счет выхода летучих и их быстрого окисления образуются высокотемпературные ореолы, влияющие на характер протекания процесса горения и оптические характеристики области возмущения среды. Время горения летучих $t_n((2 \dots 80) \cdot 10^{-3}$ с), определяющее первый максимум в зависимости температуры поверхности угольной частицы от времени T_a [15], в основном зависит от a_0 . Увеличение I не изменяет хода зависимости $t_n(a_0)$, незначительно снижая его абсолютные значения. Изменяется вид $T_a(t)$, уменьшается глубина провала между первым и основным максимумами. При постоян-

ной интенсивности подобным образом ведет себя $T_a(t)$ с увеличением a_0 . Наблюдающийся разброс значений $t_{\text{п}}$ обусловлен зольностью частиц угля, формирующейся при механических процессах образования аэрозольной частицы. При равных условиях скорость выхода летучих при нагревании увеличивается с уменьшением размера частиц. Определение зольности, теплоты сгорания и содержания летучих у частиц с $a_0 \sim 25$ и $a_0 \sim 50$ мкм [16] показало, что у частиц с большим радиусом зольность на 10% меньше, теплота сгорания на 2% больше и содержание летучих на 7% больше, чем у частиц с меньшим радиусом. Нами был проведен помол одного куска экибастузского угля (зольность 36,8%) и взяты три фиксированных размера частиц. Зольность частицы определяет размер шлакового остатка $a_{\text{ш.о}}$. Интенсивность воздействующего излучения сохранялась постоянной ($I = 2 \cdot 10^2$ Вт/см²). Усредненные значения отношения $a_{\text{ш.о}}/a_0$ приведены в табл. 1.

Таблица 1
Зависимость зольности от
размера частицы угля

$a_0, \text{мкм}$	100	50	25
$a_{\text{ш.о}}/a_0$	0,72	0,75	0,82

Из табл. 1 видно, что зольность частиц с $a_0 = 25$ мкм повысилась по сравнению с $a_0 = 50$ мкм на 9...13%.

Необходимо также отметить эффект влияния поверхностного рельефа частицы на время выхода летучих. Воспламенение начинается с микровыступов освещенной ИЛИ поверхности частицы, что приводит к их быстрому выгоранию и оплавлению основания. Кинограммы процесса показывают угасание газового факела в этих локальных точках поверхности.

Процесс развития области оптического возмущения среды значительно ускоряется в случае воздействия на аэрозоль импульсного ИЛИ. Время жизни $t_{\text{ж}}$ частиц в пучке ИЛИ уменьшается с повышением энергии излучения (см. табл. 2). Как и для непрерывного излучения, фрагментация начинается при достижении температуры возгорания. Область оптического возмущения среды имеет форму эллипсоида вращения с главной осью, ориентированной по направлению распространения ИЛИ.

Таблица 2
Время разрушения частиц сажи
при взаимодействии с ИЛИ

$I, \text{Вт/см}^2$	$0,7 \cdot 10^5$	$1,1 \cdot 10^5$	$1,3 \cdot 10^5$
$t_{\text{ж}}, \text{с}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	10^{-3}	$0,6 \cdot 10^{-3}$

Размеры области возмущения для частиц атмосферного аэрозоля ($a_0 \leq 5$ мкм) можно оценить по полученным эмпирическим соотношениям: полуось $a \simeq 20 a_0$; $v \simeq 50 a_0$. Скорости роста области оптического возмущения для импульсного излучения составляют несколько метров в секунду и зависят от I .

Для негорючих аэрозольных частиц формой области оптического возмущения среды является цилиндр с образующей, ориентированной вдоль оси пучка ИЛИ. Радиус цилиндра равен примерно $2 \dots 3 a_0$.

Следует заметить, что нелинейное рассеяние на области оптического возмущения среды при движении частицы вдоль оси пучка ИЛИ будет меньше по сравнению с эффектом рассеяния при воздействии ИЛИ на неподвижную частицу [17]. Согласно экспериментальным данным, основная масса частиц, находящихся в объеме пучка ИЛИ, движется вдоль оси пучка.

Таким образом, исследование динамики процесса развития области оптического возмущения вблизи аэрозольной частицы в оптических полях умеренной интенсивности ($I \lesssim 10^3$ Вт/см²) и импульсных оптических полях ($I \lesssim 10^5$ Вт/см²) [18] позволяет заключить, что оптически активным ядром в зоне возмущения является область, заполненная горящими фрагментированными частицами.

1. Кузиковский А.В., Погодаев В.А. // Физика горения и взрыва. 1977. №5. С. 783–787.
2. Нелинейные оптические эффекты в аэрозолях / Зуев В.Е., Копытин Ю.Д., Кузиковский А.В. Новосибирск: Наука, 1980. 184 с.
3. Букатый В.И., Погодаев В.А., Чапоров Д.П. // Журнал прикладной и технической физики. 1979. №1. С. 30–34.
4. Погодаев В.А. // Квантовая электроника. 1979. Т. 6. №3. С. 606–609.
5. Суторихин И.А. Исследование взаимодействия интенсивного лазерного излучения с углеродными аэрозольными частицами: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Томск: ТГУ, 1984. 21 с.
6. Букатый В.И., Шайдук А.М. // Воздействие интенсивного лазерного излучения на твердый аэрозоль. Барнаул: Алтайский госуниверситет, 1987. С. 3–10.
7. Каплинский А.Е. Взаимодействие мощного лазерного излучения с углеродными аэрозольными частицами во влажной атмосфере: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Барнаул: АГУ, 1990. 121 с.
8. Букатый В.И., Косых О.А., Свердлов М.Ю. // Физика горения и взрыва. 1985. №4. С. 51–53.
9. Лукин В.П., Погодаев В.А., Хмелевцов С.С., Чистякова Л.К. // VIII Всесоюзная конференция по когерентной и нелинейной оптике (тезисы докладов). Тбилиси, 1976. С. 363.
10. Бисярин В.П., Колосов М.А., Пожидаев В.Н., Соколов А.В. // Изв. вузов СССР. Сер. Физика. 1977. №11. С. 132–153.
11. Букатый В.И., Свердлов М.Ю., Суторихин И.А. // Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. №5. С. 61–65.
12. Букатый В.И., Свердлов М.Ю. // Оптика атмосферы. 1989. Т. 2. №10. С. 1094–1098.
13. Букатый В.И., Суторихин И.А., Шайдук А.М. // Физика горения и взрыва. 1983. №1. С. 73–76.
14. Стрелков Г.М. Распространение интенсивных лазерных пучков в тропосфере: Дис. ... физ.-мат. наук. Москва: ИРЭ АН СССР, 1982. 437 с.
15. Погодаев В.А. // Физика горения и взрыва. 1984. №1. С. 51–55.
16. Нурекенов Е.Н., Крылова Н.П. Изучение динамики выхода летучих веществ и воспламенения высокозольного экибастузского угля. Алма-Ата, 1986. 12 с. Деп. в КазНИИНТИ 17.03.86. №1223–Ка.
17. Кутуков В.Б., Островский Ю.К., Яламов Ю.И. // I Совещание по атмосферной оптике. (Тезисы докл.). Томск, 1976. Ч. 2. С. 194–197.
18. Букатый В.И., Копытин Ю.Д., Погодаев В.А. // Изв. вузов СССР. Сер. Физика. 1983. №2. С. 14–22.

Институт оптики атмосферы
СО РАН, Томск

Поступила в редакцию
27 декабря 1993 г.

V. A. P o g o d a e v. A Particle of a Coarse Disperse Aerosol in High Power Light Field: Influence of the Initial Characteristics of a Particle on Development of a Local Perturbation of Ambient Air.

This paper presents some results of a physical experiment on interaction between a high power laser radiation and an isolated particle of solid aerosol (soot, coal, and SiO₂). It is shown that a luminous region filled with particles fragments is an optically active core in the region of a local perturbation of a medium.