

## НЕЛИНЕЙНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В АТМОСФЕРЕ

УДК 621.373.826.038.623

В.А. Погодаев

### ЧАСТИЦА ТВЕРДОФАЗНОГО АЭРОЗОЛЯ В ИНТЕНСИВНОМ СВЕТОВОМ ПОЛЕ ДОПРОБОЙНЫЙ РЕЖИМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Представлены результаты физического эксперимента в задаче взаимодействия интенсивного лазерного излучения с отдельными частицами твердофазного аэрозоля (NaCl, SiO<sub>2</sub>, глина). Установлено влияние очагов газовой фазы, инициируемой излучением в объеме частицы, на динамику ее размера.

В настоящее время подробно изучен испарительный процесс взаимодействия интенсивного светового поля с отдельными частицами жидкокапельного аэрозоля [1, 2]. Разработана полуэмпирическая модель взрывного разрушения водных аэрозольных частиц импульсами лазерного излучения [3]. Результаты исследований по оптическому пробую воздуха, инициируемому твердофазным аэрозолем при воздействии лазерного излучения с интенсивностью  $I \lesssim 10^7$  Вт/см<sup>2</sup> и горению углеродосодержащих аэрозольных частиц при  $I < 10^5$  Вт/см<sup>2</sup> обобщены в [4]. Значительно меньше внимания уделено исследованию воздействия интенсивного лазерного излучения (ИЛИ) на отдельные частицы негорючего твердофазного аэрозоля различного химического состава в допробойном режиме. Имеющиеся экспериментальные работы [5÷7] указывают на возможность разрушения аэрозольных частиц ИЛИ как в непрерывном, так и в импульсном режимах генерации. Разрушение происходит вследствие возникновения и развития в объеме частицы газовой фазы в виде отдельных пузырьков [5]. В [7] рассчитано распределение источников тепла внутри частиц кварца, находящихся в поле излучения СО<sub>2</sub>-лазера. Показано, что подобно жидким частицам [8, 9] максимум тепловыделения приходится на так называемые «горячие точки», обусловленные неоднородным распределением оптического поля в объеме частицы, в которых возможен фазовый переход вещества и образование газовой фазы.

Экспериментально не рассматривались процессы испарения негорючего твердофазного аэрозоля и достижение условий разрушения. Это связано прежде всего с методическими трудностями, не позволяющими определять размер, высокотемпературной частицы в необходимый момент времени. Теоретическому рассмотрению процесса испарения твердых тугоплавких негорючих частиц посвящены работы [10÷14], результаты которых систематизированы в [1].

В настоящей статье приведены результаты экспериментальных исследований взаимодействия ИЛИ ( $I \lesssim 10^6$  Вт/см<sup>2</sup>) с отдельными частицами твердофазного аэрозоля (NaCl, SiO<sub>2</sub>, глины). Применялись непрерывный и импульсный режимы облучения. Радиус частиц  $a_0$  в различных экспериментальных сериях измерений варьировал в пределах  $10 \text{ мкм} \lesssim a_0 < 100 \text{ мкм}$ .

Для экспериментальных исследований динамики процесса взаимодействия ИЛИ с частицами аэрозоля был выбран метод скоростной микрокиносъемки. Данный метод наиболее полно отображает процессы, протекающие на поверхности частицы и в ее объеме (случай прозрачных частиц). Использовались частицы с формой поверхности, предельно близкой к сферической, что достигалось предварительным оплавлением частиц излучением с  $I \lesssim 200$  Вт/см<sup>2</sup>. Затем частицы фиксировались в пространстве либо на непоглощающих подложках при работе с непрерывным излучением, либо на клеевых нитях с диаметром, не превышающим 3 мкм, при работе с импульсным излучением СО<sub>2</sub>-лазера. На киноплентку фиксировался размер  $a_0$  частицы до воздействия, после чего проводилось облучение в течение заданного времени  $t^*$ . По истечении времени  $t^*$  воздействие ИЛИ прекращалось, частица остывала и ее конечный размер  $a_k$ , не искаженный собственным излучением, вновь фиксировался на киноплентку. Процесс воздействия контролировался киносъемкой. Эксперименты с фрагментацией вещества частиц исключались из рассмотрения при исследовании испарения твердых частиц.

Результаты измерений приведены в табл. 1–4 отношением  $\frac{a_k}{a_0}$ . Отсутствие в соответствующих

графах таблиц значений  $\frac{a_k}{a_0}$  обусловлено выводом частиц из поля зрения оптической системы светореактивными силами, возникающими при частичном сбросе массы локальным взрывом аналогично частицам водного аэрозоля [15].

Таблица 1

Зависимость отношения  $\frac{a_k}{a_0}$  от энергетики ИЛИ для  $t^* = 0,5$  с. Частица NaCl

$I, \text{Вт/см}^2$	$a_0, \text{мкм}$					
	25	40	55	65	80	100
250	1,0	1,0	1,0	1,0	~0,99	~0,99
300	~0,99	~0,99	1,0	~0,99	~0,99	0,97
350	~0,99	~0,98	0,97	0,97	0,98	0,97
400	~0,98	~0,98	0,98	0,97	0,97	0,97
500	~0,98	—	0,97	0,95	0,96	—

Таблица 2

Зависимость отношения  $\frac{a_k}{a_0}$  от времени облучения при  $I = 400 \text{ Вт/см}^2$ . Частица NaCl

$t^*, \text{с}$	$a_0, \text{мкм}$					
	25	40	55	65	80	100
0,3	~0,99	~0,99	~0,99	~0,99	0,98	0,98
0,5	~0,98	~0,98	0,98	0,97	0,97	0,97
1,0	0,96	0,97	0,96	0,96	0,96	0,96
1,5	0,96	0,96	0,94	0,94	0,95	0,94
2,0	0,95	0,95	0,94	—	0,93	0,93

Таблица 3

Зависимость отношения  $\frac{a_k}{a_0}$  от времени облучения и энергетики ИЛИ для частиц SiO<sub>2</sub>

$I, \text{Вт/см}^2$	$t^*, \text{с}$	$a_0, \text{мкм}$			
		20	30	75	90
200	0,05	0,97	0,95	0,95	0,95
	0,1	0,95	—	0,9	0,93
250	0,05	0,97	—	0,93	0,94
	0,1	0,95	0,93	—	—
280	0,05	0,97	0,94	0,93	—
	0,1	0,93	0,93	0,89	—

При облучении частиц SiO<sub>2</sub> импульсным излучением CO<sub>2</sub>-лазера нить отгорала и частица свободно падала на подложку-уловитель. Полученные величины  $\frac{a_k}{a_0}$  приведены в табл. 5. Отсутствие значений  $\frac{a_k}{a_0}$  для  $I = 10^6 \text{ Вт/см}^2$  и  $a_0 = 10; 30 \text{ мкм}$  обусловлено фрагментацией исходных частиц.

Знак «~» в табл. 1, 2 означает наличие в массиве значений  $a_k$  величин, отличающихся от среднего, приведенного в таблицах, на 10%. Осреднение проводилось по 20÷30 значениям  $a_k$ .

Для идентификации механизма уменьшения размера негорючих частиц выполнена специальная серия измерений по определению местоположения, размера и концентрации очагов газовой фазы в объеме частицы SiO<sub>2</sub>. Основными продуктами его диссоциации в зоне пиролиза являются растворенные в расплавленном кремнеземе SiO, O<sub>2</sub> и O [16]. Из-за радиального градиента температуры в окрестности горячей точки будут наблюдаться градиенты концентрации этих продуктов. Возникают газовые пузыри, являющиеся индикаторами положения в объеме частицы поглощающих микровключений либо горячих точек.

Зависимость отношения  $\frac{a_k}{a_0}$  от времени облучения для частиц глины ( $a_0 = 94$  мкм;  $I = 210$  Вт/см<sup>2</sup>)

$t^*$ , с	0,3	0,5	0,7	1,0	2,0	3,0	6,0	9,0	12,0
$\frac{a_k}{a_0}$	0,98	0,97	0,97	0,96	0,94	0,83	0,69	0,55	0,55

Зависимость отношения  $\frac{a_k}{a_0}$  от энергетика излучения для частиц SiO<sub>2</sub>

$I$ , Вт/см <sup>2</sup>	$a_0$ , мкм				
	10	30	50	80	100
$10^5$	0,95	0,98	0,99	1,0	1,0
$5 \cdot 10^5$	0,9	0,96	0,98	1,0	1,0
$10^6$	—	—	0,96	0,98	0,98

Результаты экспериментальных исследований по определению положения горячих точек и размера возникающих в объеме частицы пузырей иллюстрируются рис. 1.

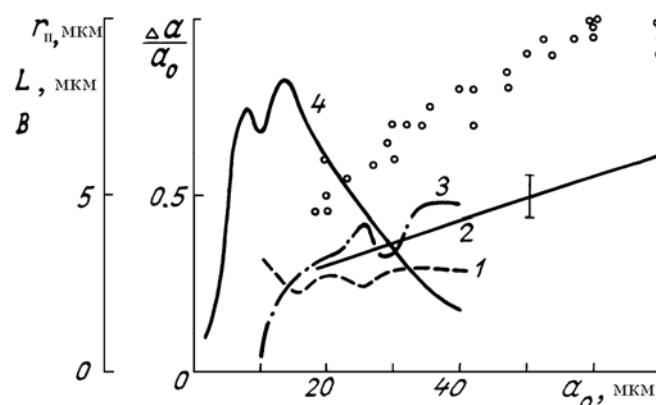


Рис. 1

Предполагается, что газовый пузырь возникает в центре максимума тепловыделения, совпадающего с максимумом распределения оптического поля в объеме частицы. Результаты эксперимента (кривая 2) при  $I = 300$  Вт/см<sup>2</sup> удовлетворительно согласуются с расчетными данными (кривая 1) о положении  $\Delta a/a_0$  максимума тепловыделения [7]. Зависимость 2 получена методом наименьших квадратов. Вертикальным отрезком показан разброс экспериментальных точек;  $\Delta a$  — расстояние от центра максимума до поверхности теневой полусферы частицы (в эксперименте  $\Delta a$  отсчитывается от центра пузыря). Кривой 3 показана протяженность ( $L$ ) главного максимума тепловыделения вдоль диаметра частиц различного размера по уровню  $e^{-1}$  [7]. Экспериментально полученные радиусы газовых пузырей  $r_n$  (точки) при  $I = 300$  Вт/см<sup>2</sup> соответствуют уровню  $e^{-0,5}$ . Ход зависимости  $\Delta a/a_0$  ( $a_0$ ) аналогичен подобной для капель жидкости [17]. С увеличением размера частицы величина максимума тепловыделения увеличивается и максимум смещается в глубь объема. Согласно [7] для излучения CO<sub>2</sub>-лазера величина максимума тепловыделения уменьшается уже при  $a_0 \geq 14$  мкм из-за ослабления излучения веществом частицы. Иллюстрация данного факта представлена зависимостью  $B(a_0)$  (кривая 4).  $B$  — безразмерный множитель, учитывающий взаимодействие падающей волны с веществом в объеме частицы [9, 18] и количественно определяющий превышение величины внутреннего электрического поля к внешнему. Зависимость  $r_n(a_0)$ , полученная в эксперименте, выходит на насыщение лишь при  $a_0 \sim 60$  мкм, что можно трактовать как значительное изменение оптических свойств вещества аэрозольной частицы с температурой.

Таким образом, для частиц с  $a_0 \sim 5-25$  мкм тепловыделение в области главного максимума значительно превышает тепловыделение в других областях объема частицы и является причиной образования газовой фазы. Для импульсных CO<sub>2</sub>-лазеров умеренной энергетика вследствие малого времени

взаимодействия излучения с веществом глубина выравнивания температуры по объему, частицы  $\text{SiO}_2$  за импульс не превышает 10 мкм. Следовательно, может быть расплавлен не весь объем частицы с  $a_0 > 20$  мкм [7] и выход газовой фазы следует рассматривать как частичный сброс массы частицы. При этом полного разрушения частицы в наших экспериментах не наблюдалось при  $a_0 > 30$  мкм (см. табл. 5).

Процесс тепловыделения при непрерывном облучении частицы  $\text{SiO}_2$  излучением  $\text{CO}_2$ -лазера значительно отличается от случая импульсного воздействия. Образование газовой фазы в объеме частицы наблюдается только после расплава этого объема. Теплопроводный механизм выравнивания температуры в частице дополняется конвективным. Для  $I \sim 10^3$  Вт/см<sup>2</sup> скорость конвективного движения достигала 0,15 см/с.

Кроме стабильно возникающего пузыря в области главного максимума распределения интенсивности в объеме частицы возникают газовые пузыри радиусом  $(0,2 \div 0,5)r_n$ , местоположение которых случайно. Центрами их возникновения, по-видимому, служат сильнопоглощающие микровключения в веществе частиц. В некоторых опытах их количество доходило до  $15 \div 20$ . Увлекаясь конвективным движением, пузыри могут объединяться в конгломераты и достигать поверхности раздела вещество — воздух. Дисперсность продуктов дробления находится в прямой зависимости от количества пузырей в объеме частицы и от интенсивности воздействующего излучения. Влияние интенсивности излучения непрерывного  $\text{CO}_2$ -лазера на размер пузыря в главном максимуме тепловыделения  $r_n(I)$  и на общее количество пузырей в объеме частицы постоянного радиуса  $n(I)$  показано на рис. 2.

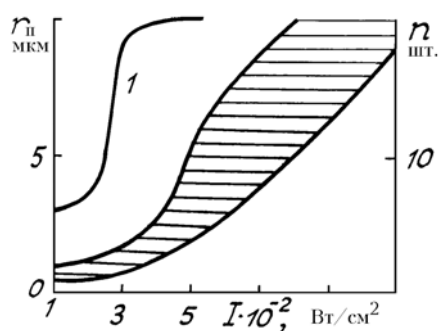


Рис. 2. Влияние энерговклада ИЛИ на радиус пузыря (кривая 1) в главном максимуме тепловыделения и на общее количество пузырей в объеме кварцевой частицы с  $a_0 = 70$  мкм (заштрихованная область)

Выход газовых пузырей, образующихся на микровключениях, не вызывает заметного импульса отдачи для частицы и не всегда фиксируется на киноплёнке на фоне свечения основной частицы. Тем не менее этот процесс может вносить существенный вклад в величину  $a_k/a_0$ . Резкое ускорение процесса при  $t^* > 2$  с (табл. 4) вызвано выходом пузырьков из объема частицы. Теория испарения твердых частиц не учитывает этого процесса.

1. Зуев В.Е., Копытин Ю.Д., Кузиковский А.В. Нелинейные оптические эффекты в аэрозолях. Новосибирск: Наука, 1980. 184 с.
2. Волковицкий О.А., Седунов Ю.С., Семенов Л.П. Распространение интенсивного лазерного излучения в облаках. Л.: Гидрометеоиздат, 1982. 312 с.
3. Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Погодаев В.А., Рождественский А.Е. //Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. № 3. С. 27–34.
4. Копытин Ю.Д., Сорокин Ю.М., Скрипкин А.М. и др. Оптический разряд в аэрозолях. Новосибирск: Наука, 1990. 159 с.
5. Кузиковский А.В., Погодаев В.А. //Физика горения и взрыва. 1977. № 5. С. 783–787.
6. Погодаев В.А. //Квантовая электроника. 1979. Т. 9. № 3. С. 606–609.
7. Белов Н.Н. //Коллоидный журнал. 1987. № 5. С. 987–990.
8. Букздорф Н.В., Погодаев В.А., Чистякова Л.К. //Квантовая электроника. 1975. Т. 2. № 5. С. 1062–1064.
9. Пришивалко А.П. Оптические и тепловое поля внутри светорассеивающих частиц. Минск: Наука и техника, 1983. 190 с.
10. Алексеев И.М., Свиркунов П.Н. //I Всесоюз. совещание по атмосферной оптике. (Тезисы докл.). Томск: Изд. ИОА СО АН СССР, 1976. Ч. 2. С. 200–201.
11. Грачев Ю.Н., Стрелков Г.М. //Изв. вузов СССР. Сер. Физика. 1975. № 11. С. 27–33.
12. Беляев Е.Б., Копытин Ю.Д. //IV Всесоюз. симпозиум по распространению лазерного излучения в атмосфере. (Тезисы докл.). Томск: Изд. ИОА СО АН СССР, 1977. С. 124–128.
13. Кутуков В.Б., Лескис А.Г., Шукин Е.Р., Яламов Ю.И. //IV Всесоюз. симпозиум по распространению лазерного излучения в атмосфере. (Тезисы докл.). Томск: Изд. ИОА СО АН СССР, 1977. С. 132–134.
14. Пустовалов В.К., Бобученко Д.С. //III Всесоюз. совещание по распространению лазерного излучения в дисперсной среде. (Тезисы докл.). Обнинск: Изд. ИЭМ, 1985. Ч. 4. С. 147–150.
15. Букатый В.И., Копытин Ю.Д., Погодаев В.А. и др. //Изв. вузов СССР. Сер. Физика. 1972. № 3. С. 41–44.

16. Куликов И. С. Термодинамика оксидов. Справочник. М.: Металлургия, 1988. 244 с.
17. Погодаев В. А., Чистякова Л. К. //Изв. вузов СССР. Сер. Физика. 1973. № 12. С. 137–139.
18. Землянов А. А., Погодаев В. А., Пожидаев В. Н., Чистякова Л. К. //Журнал прикладной механики и технической физики. 1977. № 4. С. 33–37.

Институт оптики атмосферы СО РАН,  
Томск

Поступила в редакцию  
25 декабря 1991 г.

**V. A. Pogodaev. A Particle of a Solid-Phase Aerosol in an Intense Light Field. Pre-Breakdown Interaction.**

Some results of a physical experiment on interaction of intense laser radiation with an individual particle of a solid-phase aerosol (NaCl, SiO<sub>2</sub>, clay) are presented. It has been revealed in the experiment that gas-phase centers are initiated by the incident radiation inside the particle influence on the dynamics of its size.