

УДК535.536

Т.В. Андрухова, В.И. Букатый

**Экспериментальные исследования испарения углеродных частиц в вакууме под действием излучения CO<sub>2</sub>-лазера**

Уникальные свойства лазерного излучения явились стимулом для использования лазерных источников в качестве инструмента для научных исследований и различных технических приложений. Интерес к проблеме распространения мощного лазерного излучения (МЛИ) в атмосфере обусловлен потребностями в транспортировке световой энергии на большие расстояния, оптических исследований с применением мощных лазеров для целей связи, локации, зондирования параметров атмосферы и т.д.

Наличие в атмосфере частиц аэрозоля существенно искажает характеристики распространяющегося в ней излучения. Аэрозольные частицы имеют размеры, обеспечивающие наиболее эффективное рассеяние света, так как при распространении МЛИ через аэрозольную среду происходит разогрев, горение, испарение, дробление, изменение формы и размера частиц, около частиц возникают зоны (ореолы) повышенной температуры с изменением оптических свойств среды. Исследование процессов образования и разрушения аэрозолей, их поведения при воздействии МЛИ при различных давлениях (так как лазерное излучение может использоваться в различных слоях атмосферы, где давление меняется от одной атмосферы на уровне моря до высокого вакуума на больших высотах) является актуальной задачей.

К настоящему времени хорошо изучены вопросы взаимодействия МЛИ с жидкокапельным аэрозолем (облака, туманы, водная дымка) [1, 2]. Проведено много теоретических и экспериментальных исследований взаимодействия твердофазного аэрозоля с излучением при нормальных условиях и только теоретических – в вакууме [3–7]; экспериментальных исследований поведения данного класса аэрозолей при пониженном давлении не проводилось.

Аэрозольные замутнения в атмосфере обнаружены на высотах 70–500 км, пики наблюдаются на 50, 80, 93, 100 км при давлениях  $0,5 \cdot 10^{-2}$ ;  $3,2 \cdot 10^{-4}$ ;  $4,54 \cdot 10^{-6}$  гПа соответственно [8, 9], и они носят ярко выраженный антропогенный характер (в большом количестве содержат ионы  $S_k^{-2}$ ,  $NH_4^+$ ,  $Nk_3^-$ ). Из сернистых соединений в стратосфере преобладает раствор  $H_2S_k$ . Состав мезосферного аэрозоля харак-

теризуется содержанием Fe, Cu, Pb, Cl, Zn, Ag, K и других веществ на высотах 49–91 км. Некоторые элементы характерны как для нижней атмосферы, так и для средней. Поэтому для проведения экспериментов по изучению динамики размера, температуры одиночных частиц в поле МЛИ при пониженном давлении использовались соответствующие средней атмосфере вещества, в частности, графит, сажа.

С целью наблюдения и исследования процессов испарения была сконструирована и выполнена установка. В качестве объектов исследований использовались частицы, начальная форма которых близка к сферической. Предварительно частицы отбирались и измерялись с помощью микроскопа отсчетного типа. Разрушение частиц является быстро протекающим процессом. Для регистрации процессов испарения, разрушения частиц наиболее удобным является метод скоростной фоторегистрации, так как он позволяет получить и качественную картину в доступном для восприятия виде, и количественные пространственные и временные характеристики процесса. Использование скоростных кинокамер дает возможность варьировать временную разрешающую способность регистрирующей аппаратуры. В экспериментах исследовались частицы с начальным диаметром от 300 до 1100 мкм. Выбор размера первичной частицы обусловлен временем протекания процесса. Время испарения, горения частицы малых размеров  $\sim 10^{-5}$ – $10^{-3}$  с. Скоростная кинокамера регистрирует процесс с частотой съемки в диапазоне от 100 до 4000 кадров в секунду, т.е. интервал времени смены кадра  $\sim 2,5 \cdot 10^{-4}$  с. Поэтому проводилось исследование испарения частиц с начальным диаметром 200–1100 мкм. При использовании метода скоростной фоторегистрации существенны требования к яркости источников освещения объекта. Подсветка осуществлялась методом светлого поля. Одиночная частица устанавливалась на подложку, представляющую собой кварцевую нить, радиус которой не превышает радиуса самой частицы, закрепленную в специально сконструированном держателе. Затем частицу помещали в вакуумную камеру таким образом, чтобы она находилась в фокальной плоскости объектива кинокамеры и

воздействующего излучения, фокусируемого линзой. При достижении желаемых параметров включалась кинокамера, затем после ее разгона (через 0,5 с) включался лазер. Действие лазерного излучения не прекращалось на протяжении всего процесса испарения. После проведения эксперимента вакуумная камера освобождалась от продуктов горения или испарения. При помещении в камеру другой частицы работа форвакуумного насоса возобновлялась. Полученные киноплёнки проявлялись и закреплялись. Обработка фотоматериала проводилась с помощью оптических методов, микроскопом и микрофотометром ИФО-451 и методом градиентной обработки изображения на компьютере (способ выделения границ пространственным дифференцированием функции яркости). Примеры обработки кинограмм методом градиентной обработки приведены на рисунках 1, 2.

Процесс изменения размера частиц протекает неравномерно. Наблюдаются флуктуации до выхода размера первичной частицы на максимальное значение, соответствующее максимальной температуре ~ 3000–4500 К, при соответствующих интенсивностях излучения. Характерные зависимости размера первичной частицы от времени представлены на рисунке 3. По мере прогревания частицы вглубь, сопровождающегося разлетом испаренного с поверхности вещества, происходит периодическое

уменьшение размера частицы с дальнейшим его увеличением. Периодичностью данного процесса объясняются флуктуации размера частицы до ее полного прогревания. Характерным для этих частиц являлось увеличение их видимого размера вследствие «вскипания» поверхности, сама же частица прогревается неравномерно (внешний слой прогревается быстрее). Механизм увеличения диаметра частицы может быть обусловлен следующими причинами: разбуханием вследствие выхода летучих веществ; нелинейным расширением материала частиц при столь высоких температурах, сменной агрегатного состояния вещества. Последнее связано с нарушением строгой периодичности, присущей кристаллам. Частица представляет собой каплю с твердым уменьшающимся ядром и увеличивающейся вязкой жидкой оболочкой. По мере ее прогревания, сопровождающегося разлетом испаренного с поверхности вещества, данные структурные изменения распространяются на весь ее объем, частицу в итоге можно рассматривать как переохлажденную жидкость (жидкий кристалл, или мезоморфное состояние) с очень большим коэффициентом вязкости, нарушения в кристаллической решетке у которой произошли по всему ее объему. После того как радиус частицы начал убывать, мы имеем основание считать, что теперь есть только процессы, способствующие уменьшению радиуса и температуры. В описанной выше ситуа-

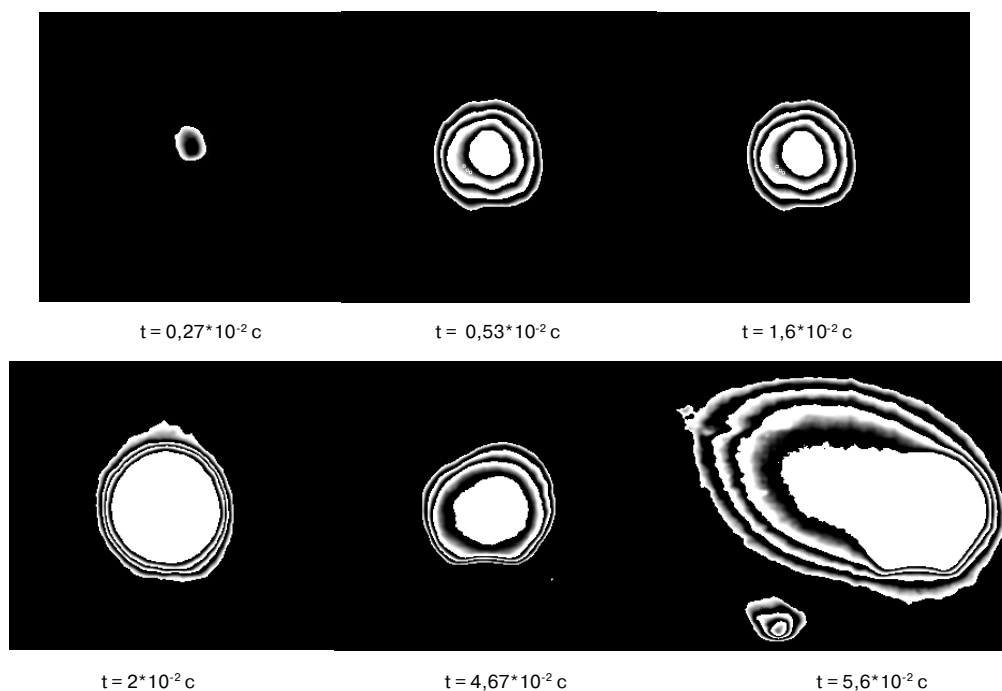


Рис. 1. Кинограмма испарения частицы графита с начальным диаметром 0,85 мм при интенсивности воздействующего излучения  $I_0 = 2,14 \cdot 10^9$  Вт/м<sup>2</sup>;  $p = 3 \cdot 10^{-1}$  мм. рт.ст.

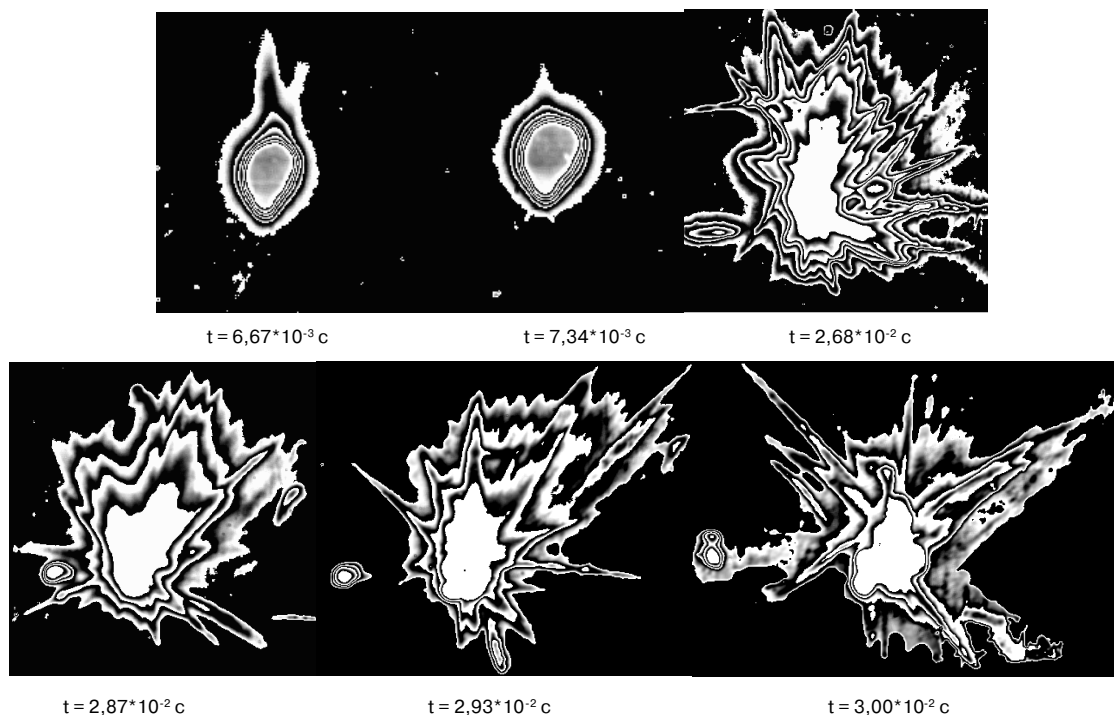


Рис. 2. Кинограмма испарения сажистой частицы с начальным диаметром 0,425 мм при интенсивности воздействующего излучения  $I = 2,8 \cdot 10^9$  Вт/м<sup>2</sup>;  $p = 10^{-2}$  мм. рт.ст.

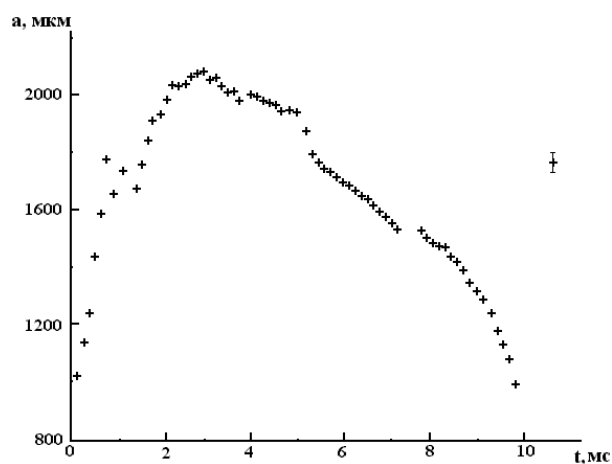


Рис. 3. Динамика размера частицы графита в поле МЛИ излучения с плотностью потока энергии, равной  $2,14 \cdot 10^9$  Вт/м<sup>2</sup>. Начальный размер частицы 850 мкм,  $p = 3 \cdot 10^{-1}$  мм рт.ст.

ции (до полного прогрева частицы) правомерно говорить о распределении энергии, поглощении излучения и тепловыделении в каплях с неразрывным поглощающим ядром. Для таких частиц характерно, что основная часть энергии поглощается сразу же после проникновения внутрь частицы. Зона максимальной концентрации энергии расположена в теневой полусфере вблизи поверхности частицы. Распределение энергии внутри капель с ядром характеризуется большой неоднородностью. У крупных частиц распределение тепловыделения в ядре неоднородно с тенденцией к значительному

увеличению в теневой части. Основной максимум величины тепловыделения в ядре расположен обычно в теневой полусфере вблизи границы с оболочкой. С излучением взаимодействует не весь объем частиц, а те их области, где локализовано максимальное тепловыделение, преимущественно в освещенной и теневой полусферах крупных частиц.

Расширение испаренного вещества во всех случаях сопровождалось процессом переконденсации, связанным с быстрым остыванием расширяющегося парогазового облака, вследствие того, что процесс является почти адиабатическим, давление насыщенных паров становится у поверхности частицы порядка атмосферного и более, а среднemasовая скорость разлета вещества приближается к скорости звука в паре и даже может превышать ее. Ранее было выявлено наличие внутри области (поверхность частицы – бесконечность) точки с разрывом параметров – фронта ударной волны [7]. Положение, которое позволяет четко разделить все пространство на две области: от частицы до положения фронта ударной волны; от положения фронта ударной волны до бесконечности, что подтверждается нашими экспериментами. Конденсация протекает вплоть до ударного скачка, после него пересыщение пара исчезает и далее разлет вещества осуществляется без обмена веществом между твердой и паровой фазами.

Результаты эксперимента показали, что фрагментация является характерным процессом. Для частиц графита фрагментация отсутствовала практически до последних этапов процесса. Для других веществ (в выбранном диапазоне начальных размеров частиц) она начинается спустя 2–2,5 мс от начала свечения частиц. Радиус фрагментированных частиц (0,5–20 мкм) при постоянном потоке мощности воздействующего излучения практически не зависит от размера исходных.

Для экспериментального исследования динамики температуры частиц, нагреваемых интенсивным лазерным излучением, требуется невозмущающий метод, который бы позволял проводить измерения в широком температурном диапазоне с высоким быстродействием и низкой методической погрешностью. Основные причины, затрудняющие измерение температуры, это – малые размеры исследуемых объектов; невозможность применения контактного метода измерения температуры; быстрое протекание процессов испарения частиц; достаточно высокие температуры испарения частиц до 3000–4500 К; большой температурный интервал 1500–3000 К и выше. Данной ситуации удовлетворяет цветовой метод или иначе: метод бихроматической пирометрии спектрального отношения, который основан на измерении спектральных интенсивностей на двух длинах волн, выделенных из сплошного спектра излучения нагретого тела. Для решения поставленных задач наилучшим вариантом было использование пирометра, основанного на принципе спектрального отношения интенсивности излучения на различных длинах волн. Типичные динамики температур для различных веществ представлены на рисунке 4. Анализируя полученные экспериментальные зависимости  $T(t)$ , на каждой из кривых можно выделить три характерных температурных участка. На первом участке за время  $\Delta t_1$  от начала действия лазерного излучения происходит быстрый нагрев частиц до максимальной температуры  $T_{\max}$ . Величина  $T_{\max}$  зависит от начального размера частиц и интенсивности воздействующего излучения. На втором участке за время  $\Delta t_2$  ( $\Delta t_1 < \Delta t_2$ ) вследствие испарения значительно уменьшается размер частиц, но их температура изменяется слабо. Этот результат согласуется со сделанным в теории пред-

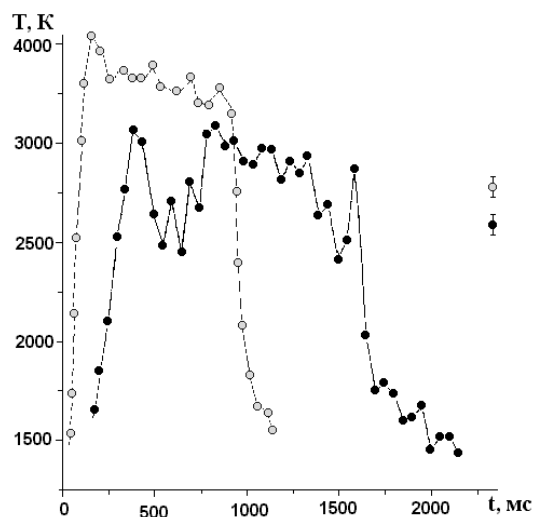


Рис. 4. Динамика температуры испаряющейся частицы графита

- –  $a_0 = 800$  мкм;  $I = 2,8 \cdot 10^8$  Вт/м<sup>2</sup>;  $p = 10^{-2}$  мм. рт.ст.
- –  $a_0 = 850$  мкм;  $I = 2,14 \cdot 10^9$  Вт/м<sup>2</sup>;  $p = 3 \cdot 10^{-1}$  мм. рт.ст.

положением о квазистационарности температуры в процессе испарения. Резкий спад температуры наблюдается на третьем участке за время  $\Delta t_3$  (условие  $\Delta t_1 < \Delta t_3 < \Delta t_2$  характерно для тугоплавких частиц).

Как в нормальных условиях, так и при пониженном давлении наблюдалось образование нескольких видов частиц: частицы расплава и частицы конденсационного типа. Лазерное излучение разогревает мишень до температуры кипения, образующиеся пары истекают в виде струи в окружающее пространство. Ускорение паров до звуковой скорости происходит в тонком слое у поверхности, при этом пар резко охлаждается и переходит в неустойчивое пересыщенное состояние, которое в дальнейшем, вследствие конденсационного скачка, переходит в насыщенное. Вещество в зависимости от условий (давления и температуры) может находиться в различных формах и состояниях. При относительно низких давлениях вещество конденсируется; структура конденсата может быть периодической (чистые кристаллы) и непериодической (жидкость, аморфные твердые тела, сплавы, полимеры). В некоторых случаях конденсат может обладать структурными свойствами, промежуточными между свойствами твердого кристалла и жидкости (жидкие или мезоморфные кристаллы).

## Литература

1. Довгалюк Ю.А., Ивлев Л.С. Физика водных и других атмосферных аэрозолей. СПб., 1998.
2. Чистякова Л.К. Нелинейные эффекты при распространении интенсивных лазерных импульсов в аэрозольных средах. Экспериментальные исследования: Дис. ... докт. физ.-мат. наук. Томск, 2001.
3. Лямкина Г.В., Шайдук А.М. Размеры и концентрация мелкодисперсной фракции аэрозоля при испарении тугоплавкой частицы в вакуум // Оптика атмосферы. 1991. Т. 4. №11.
4. Лямкина Г.В., Шайдук А.М. Испарение и переконденсация тугоплавких частиц в мощном оптическом поле /Алтайский государственный университет. Деп. в ВИНТИ 11.11.90 г. №5653-ВУО. Барнаул, 1990.
5. Лямкина Г.В. Взаимодействие мощного лазерного излучения с тугоплавким аэрозолем в условиях вакуума с учетом переконденсации: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Барнаул, 1992.
6. Шайдук А.М. Моделирование процессов взаимодействия мощного лазерного излучения с дисперсными системами: Дис. ... докт. физ.-мат. наук. Барнаул 1998.
7. Соломатин К.В. Математическое моделирование процессов взаимодействия МЛИ с твердым аэрозолем с учетом переконденсации: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Барнаул, 2000.
8. Креков Г.М., Звенигородский С.Г. Оптическая модель средней атмосферы. Новосибирск, 1990.
9. Черемисин А.А. Проблемы и методы исследования аэрозоля верхней атмосферы // Естественные и антропогенные аэрозоли: Мат. междунар. конф. СПб., 2001.