

УДК 535.536

Т.В. Андрухова, В.И. Букатый

**Исследование дисперсности аэрозоля****после воздействия мощного лазерного излучения**

Одним из важных параметров аэрозоля является его дисперсность, так как от этого зависят многие свойства различных физических процессов, как, например, эффективность распространения оптического излучения в атмосфере, транспортировка световой энергии на большие расстояния, оптические исследования с применением мощных лазеров для целей связи, локации, зондирования параметров атмосферы и т.п.

При воздействии мощного лазерного излучения (МЛИ) на поверхность образца происходили быстрый разогрев и испарение исследуемого вещества. В ряде случаев выброс продуктов разрушения происходил в виде светящейся плазменной струи. По мере увеличения энергии воздействия можно выделить три основных режима воздействия излучения на объект: 1 – свечение мишени; 2 – появление и рост факела выброса паров; 3 – активный выброс полидисперсных частиц расплава. Наличие задержки между началом генерации лазерного излучения и моментом появления пара объясняется тем, что часть энергии в начале воздействия тратится на разогрев мишени до температуры, при которой начинается интенсивное испарение вещества, и данное время можно оценить, используя следующее выражение [1]:

$$\tau \sim T_{и}^2 \lambda^2 / q^2 d,$$

где  $T_{и}$  – температура испарения,  $\lambda$  – теплопроводность,  $q$  – плотность лазерного потока,  $d$  – температуропроводность. Например, для частицы графита с начальным диаметром  $a_0 = 850$  мкм, при  $d = \lambda / (C_p \cdot \rho)$  ( $C_p$  – удельная теплоемкость,  $\rho$  – плотность вещества),  $\lambda = 40,2$  Вт/м·К,  $q = 2,14 \cdot 10^9$  Вт/м<sup>2</sup>,  $T_{и} = 3000$ – $5000$  К,  $\tau = 1,16 \cdot 10^{-4}$ – $3,24 \cdot 10^{-4}$  с.

Высокоскоростное испарение частицы характеризуется большой неоднородностью температурного поля и значительным температурным градиентом [2–6]. После отрыва испаренного вещества от поверхности частицы происходит его быстрое остывание (такое остывание приводит к значительной степени переохлаждения или пересыщения в расширяющейся парогазовой смеси). Почти адиабатическое расширение парогазового облака

приводит к пересыщению испаренного вещества и сопровождается конденсацией излишков паровой фазы. Процесс конденсации можно разбить на два обычно непересекающихся этапа [2–4]: 1 – образование ядер конденсации, 2 – собственно сама конденсация на уже созданных поверхностях при достаточно малых значениях пересыщения. Температура поверхности существенным образом зависит от режима взаимодействия, имеет определенную временную динамику [4–6]. Измерение температуры в экспериментах проводилось с использованием цветового пирометра. Фиксировалась температура поверхности образца, находящегося в вакуумной камере с давлением окружающей среды  $p$ . При одних и тех же значениях  $q$  и  $p$  качественный характер зависимости  $T(t)$  не менялся. Менялось лишь время протекания процесса. При увеличении  $q$  и/или уменьшении  $p$  время протекания процесса уменьшалось, время выхода температуры на максимальное значение сокращалось. Увеличение значения  $T_{max}$  обусловлено в основном увеличением  $q$ , от давления  $p$  (в исследуемом диапазоне) данная величина мало зависит.

Конденсация протекает вплоть до ударного скачка (сверхзвуковой режим разлета вещества на некотором расстоянии от частицы скачком переходит в дозвуковой с образованием поверхности резкого изменения термодинамических параметров системы), после него пересыщение пара исчезает и далее разлет вещества осуществляется без обмена веществом между твердой и паровой фазами.

Для получения вторичных частиц были изготовлены таблетки таких веществ, как  $\text{NaHSO}_4$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ,  $\text{NH}_4\text{Cl}$ , диаметром не более 10 мм и толщиной  $\sim 8$  мм. Воздействие на образцы проводилось излучением  $\text{CO}_2$ -лазера при мощности от 75 Вт до 250 Вт и времени воздействия  $\sim 4$  с [6].

Для оценки плотности лазерного потока излучения, при которой развитие процессов испарения значительно, можно воспользоваться соотношением [1]

$$q = L\rho(d/\tau_{и})^{1/2},$$

где  $L$  – удельная теплота испарения,  $\rho$  – плотность,  $\tau_{и}$  – время истечения паров. При обра-

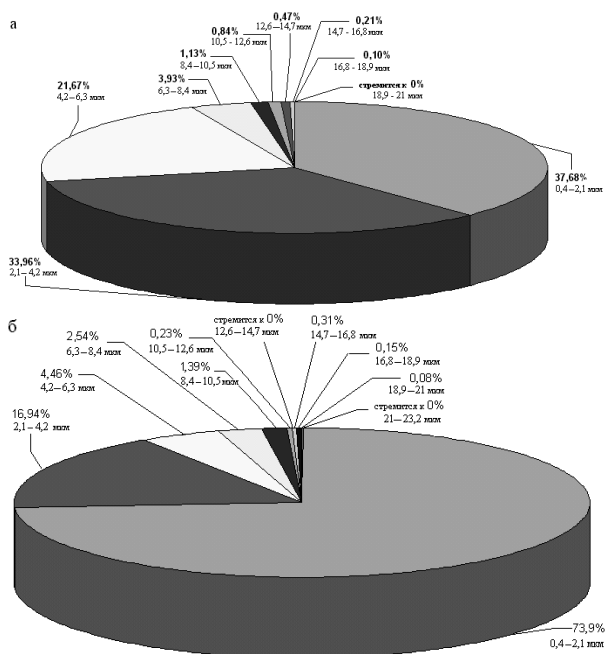


Рис. 1. Процентное распределение вторичных частиц по размерам при взаимодействии МЛЖ с веществом  $\text{Na}_2\text{HSO}_4$  ( $r \sim 10$  мм): а – при пониженном давлении; б – при нормальных условиях

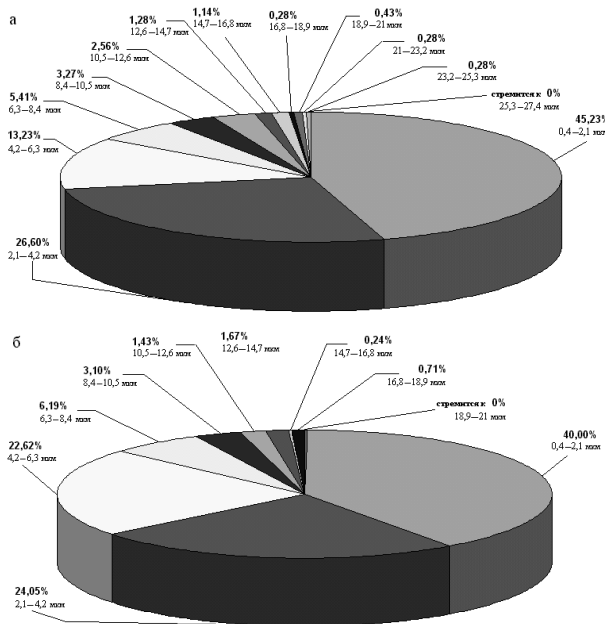


Рис. 2. Процентное распределение вторичных частиц по размерам при взаимодействии МЛЖ с веществом  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  ( $r \sim 10$  мм): а – при пониженном давлении; б – при нормальных условиях

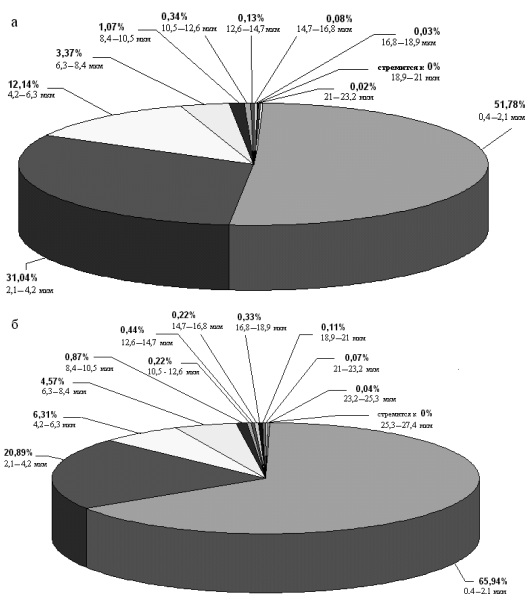


Рис. 3. Процентное распределение вторичных частиц по размерам при взаимодействии МЛЖ с веществом  $\text{PbO}$  ( $r \sim 10$  мм): а – при пониженном давлении; б – при нормальных условиях

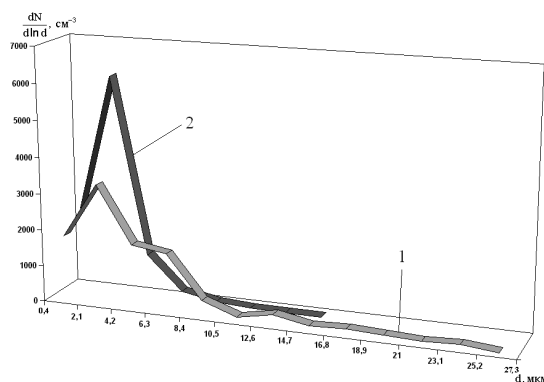


Рис. 4. Распределение вторичных частиц по размерам, полученным при взаимодействии МЛЖ с  $\text{PbO}$  ( $r \sim 10$  мм): 1 – при нормальных условиях; 2 – при пониженном давлении

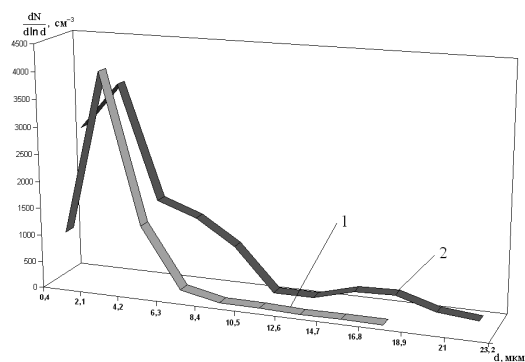


Рис. 5. Распределение вторичных частиц по размерам, полученных при взаимодействии МЛЖ с  $\text{Na}_2\text{HSO}_4$  ( $r \sim 10$  мм): 1 – при пониженном давлении; 2 – при нормальных условиях

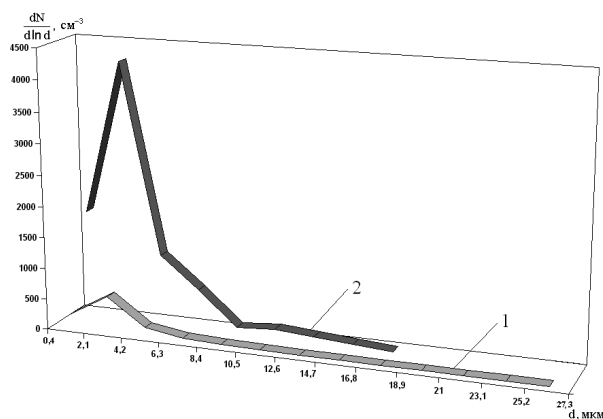


Рис. 6. Распределение вторичных частиц по размерам, полученным при взаимодействии МЛИ с  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  ( $r \sim 10$  мм):

- 1 – при пониженном давлении;  
2 – при нормальных условиях

зовании ожога на поверхности образца в форме глубокой лунки становится значительным выброс расплава. В случае образцов с относительно небольшой величиной коэффициента  $d$  выбрасываемый расплав принимает форму сферических частиц различной дисперсности в диапазоне от 0,1 мкм до долей миллиметра. В таких веществах, как  $\text{NaHSO}_4$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ,  $\text{NH}_4\text{Cl}$ , наблюдались вскипание поверхности образца и выброс плазменного факела. После воздействия на  $\text{PbO}$  наблюдалось ярко выраженное образование кристаллов в кратере с характерным металлическим блеском.

При проведении эксперимента на подложку собирался конденсат и вторичные частицы на различных расстояниях  $r$  от образца. Процентное распределение вторичных частиц по размерам и логнормальное распределение для некоторых указанных выше образцов веществ показаны на рисунках 1–6. Из полученных распределений видно, что для некоторых веществ спектр распределения частиц по размерам

претерпевает изменения, т.е. деформирован относительно нормального распределения. Более 70% частиц, полученных испарением при различных давлениях, попадают в интервал от 0,4 до 6 мкм. Но заметно, что для некоторых веществ при изменении давления в функции распределения частиц появляются два максимума (так как для данных веществ более крупные частицы являются агрегированными из мелких), либо происходит уширение указанного выше интервала. Наиболее вероятной причиной разделения размеров частиц является увеличение скорости истечения паров при снижении давления и, следовательно, уменьшения вероятности встречи частиц в процессе конденсационного роста. Процесс конденсации происходит во время лазерного воздействия. Сначала идет образование из частиц длинных нитей, что характерно для частиц в сильных электрических полях, которые затем обрастают частицами. Наблюдалось образование нескольких видов частиц: частицы расплава и частицы конденсационного типа. Схема образования конденсационных частиц следующая: лазерное излучение разогревает мишень до температуры кипения, образующиеся пары стекают 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 и температурах испаренное вещество конденсируется; структура конденсата может быть периодической (чистые кристаллы) и непериодической (жидкость, аморфные твердые тела, сплавы, полимеры).

## Литература

1. Пахомов А.В. Аэрозоли лазерной плазмы: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., 1990.
2. Букатый В.И., Соломатин К.В. Моделирование и расчет параметров тепломаассореола, возникающего в окрестностях тугоплавкой частицы // Оптика атмосферы и океана: Тез. докл. Томск, 1997.
3. Букатый В.И., Соломатин К.В. Определение размеров вторичных частиц, возникающих в окрестности тугоплавкой частицы // Оптика атмосферы и океана: Тез. докл. Томск, 1997.
4. Букатый В.И., Куприенко Г.В., Соломатин К.В. Моделирование процессов испарения тугоплавкой

частицы и разлет испаренного вещества в атмосфере: Препринт. Барнаул, 1997.

5. Чистякова Л.К. Нелинейные эффекты при распространении интенсивных лазерных импульсов в аэрозольных средах. Экспериментальные исследования: Автореф. дис. ... докт. физ.-мат. наук. Томск, 2001.

6. Андрухова Т.В. Экспериментальные исследования взаимодействия мощного лазерного излучения с твердым аэрозолем в условиях вакуума: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Барнаул, 2001.