

Т.В. Андрухова, В.И. Букатый

Образование аэрозоля при воздействии лазерного излучения на мишени

Алтайский государственный университет, г. Барнаул

Поступила в редакцию 30.11.2004 г.

Описано экспериментальное исследование процесса взаимодействия мощного лазерного излучения (МЛИ) с мишенями, состоящими из веществ, встречающихся в аэрозольной форме, и дисперсности вторичных частиц после воздействия МЛИ.

К настоящему времени имеется много работ по воздействию мощного лазерного излучения (МЛИ) на твердые мишени, например [1–3], в которых в том числе изучаются эффекты образования аэрозоля. Однако практически отсутствуют данные о дискретности вторичного аэрозоля, получающегося при воздействии МЛИ на вещества, входящие в состав твердых частиц атмосферного аэрозоля. Цель данной работы заключается в экспериментальном исследовании дисперсного состава и рентгеноструктурного анализа аэрозоля, образованного при воздействии МЛИ на твердые образцы некоторых веществ.

Плоские мишени изготавливались из таких веществ, как NaHSO_4 , Na_2SO_4 , Na_2SO_3 , NH_4Cl , PbO , $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, встречающихся в приземном слое атмосферы. Диаметр цилиндрических мишеней составлял около 10 мм, высота ~ 8 мм. Воздействие на образцы проводилось сфокусированным непрерывным излучением CO_2 -лазера (установка «Кипр») с длиной волны 10,6 мкм при различных плотностях мощности и максимальном времени воздействия ~ 8 с.

При воздействии МЛИ на поверхность мишени происходили быстрый разогрев, разрушение и испарение исследуемого вещества. Вторичные частицы, образовавшиеся в результате воздействия на мишени, собирались на кварцевую подложку, расположенную на расстоянии 2–5 мм от фокуса линзы. Далее подложка помещалась под микроскоп, проводилось визуальное определение количества частиц, а также выборочно осуществлялось их микрофотографирование. Кроме того, проводился рентгеноструктурный анализ указанных выше веществ с помощью установки ДРОН-2. В ряде случаев выброс продуктов разрушения происходил в виде светящейся плазменной струи.

По мере увеличения времени воздействия можно выделить три основные стадии: первая – свечение мишени; вторая – появление и рост факела выброса паров; третья – активный выброс полидисперсных частиц расплава. Наличие задержки между началом воздействия 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 [3]:

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

где $T_{\text{и}}$ – температура испарения; λ – теплопроводность; q – плотность лазерного потока (интенсивность); a – температуропроводность. Например, для мишени из графита, при $a = \lambda / (C_p \rho)$ (C_p – удельная теплоемкость, ρ – плотность вещества), $\lambda = 40,2 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, $q = 2,14 \cdot 10^9 \text{ Вт}/\text{м}^2$, $T_{\text{и}} = 3000\text{--}5000 \text{ К}$, $\tau = 1,16 \cdot 10^{-4} \text{--} 3,24 \cdot 10^{-4} \text{ с}$. В наших экспериментах измеренные времена задержки и значения $T_{\text{и}}$ совпадали с вышеприведенными теоретическими оценками.

Высокоскоростное испарение частицы характеризуется значительным температурным градиентом как внутри, так и вокруг нее [4–8]. После отрыва испаренного вещества от поверхности частицы происходит его быстрое остывание, т.е. почти адиабатическое расширение парогазового облака приводит к пересыщению испаренного вещества и сопровождается конденсацией излишков паровой фазы.

Процесс конденсации можно разбить на два обычно пересекющихся этапа [4–6]: I – образование ядер конденсации, II – собственно сама конденсация на уже созданных поверхностях при достаточно малых значениях пересыщения. Температура поверхности мишени существенным образом зависит от режима взаимодействия, имеет определенную временную динамику [6–8]. Измерение температуры в экспериментах проводилось с использованием быстродействующего цветового пирометра, изготовленного на кафедре общей физики АлтГУ и описанного в [8]. Фиксировалась температура поверхности образца $T(t)$, находящегося в вакуумной камере с давлением окружающей среды p . При одних и тех же значениях q и p качественный характер зависимости $T(t)$ для различных мишеней не менялся. Менялось лишь время протекания процесса. При увеличении q и/или уменьшении p (в пределах $10^{-1} \div 10^{-2}$ мм рт. ст.)

время протекания процесса уменьшалось, время выхода температуры на максимальное значение сокращалось. Увеличение значения T_{\max} (максимальная температура процесса) обусловлено, в основном, увеличением q , в то же время слабо зависит от давления T_{\max} .

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 оценки плотности потока лазерного излучения q , начиная с которой происходит интенсивное испарение вещества, можно воспользоваться соотношением [3]:

$$q = L\rho(a/\tau_{\text{и}})^{1/2},$$

где L — удельная теплота испарения; $\tau_{\text{и}}$ — длительность истечения паров. При образовании каверны на поверхности образца в форме глубокой лунки становится значительным выброс расплава. В случае образцов с относительно небольшой величиной коэффициента a выбрасываемый расплав принимает форму сферических частиц различной дисперсности в диапазоне от 0,4 мкм до долей миллиметра.

В таких веществах, как NaHSO_4 , Na_2SO_4 , Na_2SO_3 , NH_4Cl , наблюдалось вскипание поверхности образца и плазменный факел из объема вещества. Кроме того, после воздействия на PbO наблюдалось ярко выраженное образование кристаллов в кратере с характерным металлическим блеском.

Процентное распределение вторичных частиц по размерам при воздействии МЛИ на мишени и лог-нормальное распределение для некоторых указанных выше образцов веществ показаны на рис. 1 и 2. Более 90% частиц, полученных в процессе испарения, попадают в интервал от 0,4 до 6 мкм. Обнаружено, что для PbO , Na_2SO_3 при изменении давления в функции распределения частиц по размерам наблюдается изменение процентного соотношения между мелкими и крупными частицами. Данный факт проиллюстрирован на рис. 1 для PbO . Для всех исследованных веществ более крупные частицы являются агрегированными из мелких. Наиболее вероятной причиной этого 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. Нами наблюдалось образование из частиц длинных нитей, что характерно для частиц в сильных электрических полях, которые затем обрастают частицами. В экспериментах наблюдалось образование частиц расплава и частиц конденсационного типа.

Схема образования конденсационных частиц рассмотрена нами теоретически [5, 6] и экспериментально [8] и заключается в следующем: 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.

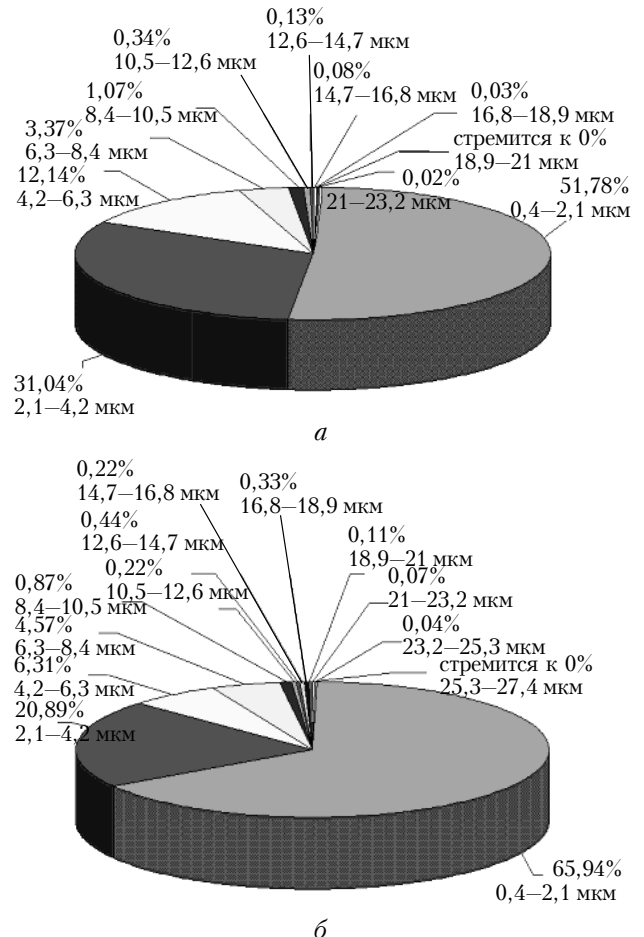


Рис. 1. Процентное распределение вторичных частиц по размерам при взаимодействии МЛИ с веществом PbO : а — при пониженном давлении; б — при нормальных условиях

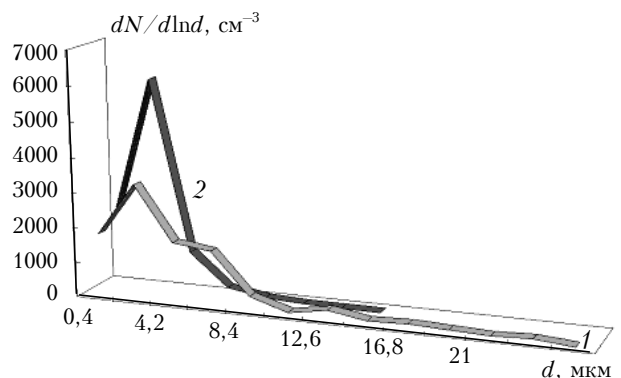


Рис. 2. Распределение вторичных частиц по размерам, полученных при взаимодействии МЛИ с PbO : 1 — при нормальных условиях; 2 — при пониженном давлении

При относительно низких давлениях (форвакуум) и температурах (~ 1000 К) испаренное вещество конденсируется; структура конденсата может быть периодической (чистые кристаллы) и непериодической (жидкость, аморфные тела, сплавы, полимеры). В некоторых случаях конденсат может обладать структурными свойствами, промежуточными между свойствами твердого кристалла и жидкости (жидкие или мезоморфные кристаллы). Проходя через серию структурных превращений, конденсат приобретает, в конечном счете, объемно-центрированную структуру.

Таким образом, в наших экспериментах получены: фрактальные кластеры, состоящие из малых частиц; капли расплава, на поверхности которых произошла кристаллизация вещества в виде моно- и поликристаллов; элементы фрагментированного вещества мишени (рис. 3).

Фрактальным структурам присуще свойство самоподобия. Объединение частиц может происходить тремя путями [3]: 1) диффузионно-ограниченное агрегатообразование, 2) кластер-кластерное, 3) химически ограниченное образование агрегатов. Каждому механизму

присуща своя фрактальная размерность. В первом случае рост агрегатов происходит за счет присоединения отдельных частиц, движущихся по случайным траекториям. Во втором – частицы вначале объединяются в небольшие агрегаты, а окончательный рост агрегатов происходит из более мелких, при этом образуются рыхлые агрегаты. Третий – это некий средний механизм между двумя первыми, который отличается большим количеством контактов между частицами прежде чем происходит их соединение. При лазерном воздействии наиболее вероятен второй механизм, который отличается наиболее низкой фрактальной размерностью и наиболее рыхлыми агрегатами.

Одновременно с изучением размеров вторичных частиц проводилось исследование динамики температуры поверхности облучаемых образцов $T(t)$ скоростным цветовым пирометром с временным разрешением $\sim 10^{-4}$ с (рис. 4). Данный пирометр определяет температуры в диапазоне от 1100 до 3000 К, поэтому на рис. 4 начальный участок процесса соответствует нижнему пределу измерения T .

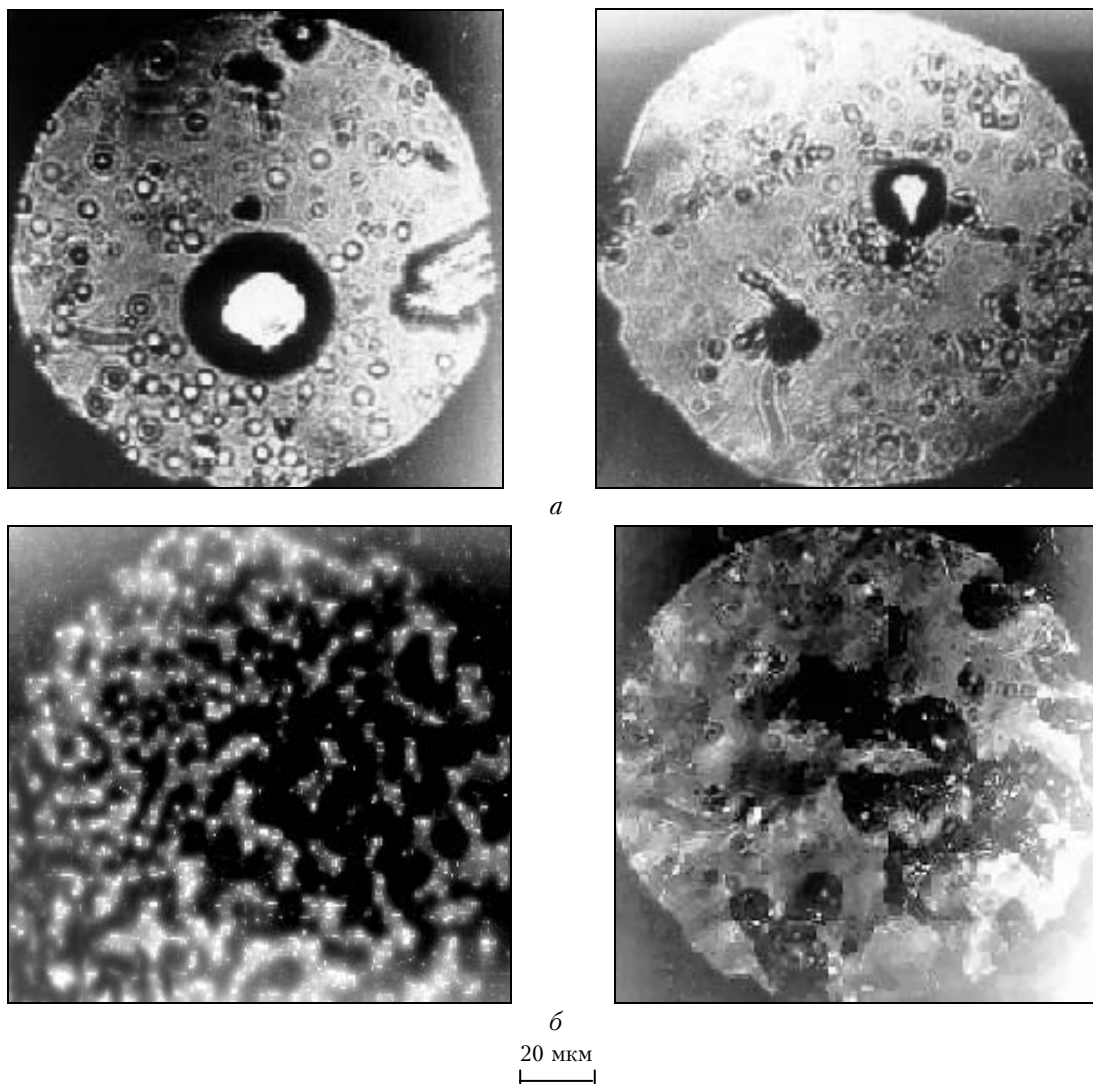


Рис. 3. Фотографии вторичных частиц, осажденных на подложки, находящиеся на разных расстояниях от мишеней из Na_2HSO_4 (а), NH_4Cl (б)

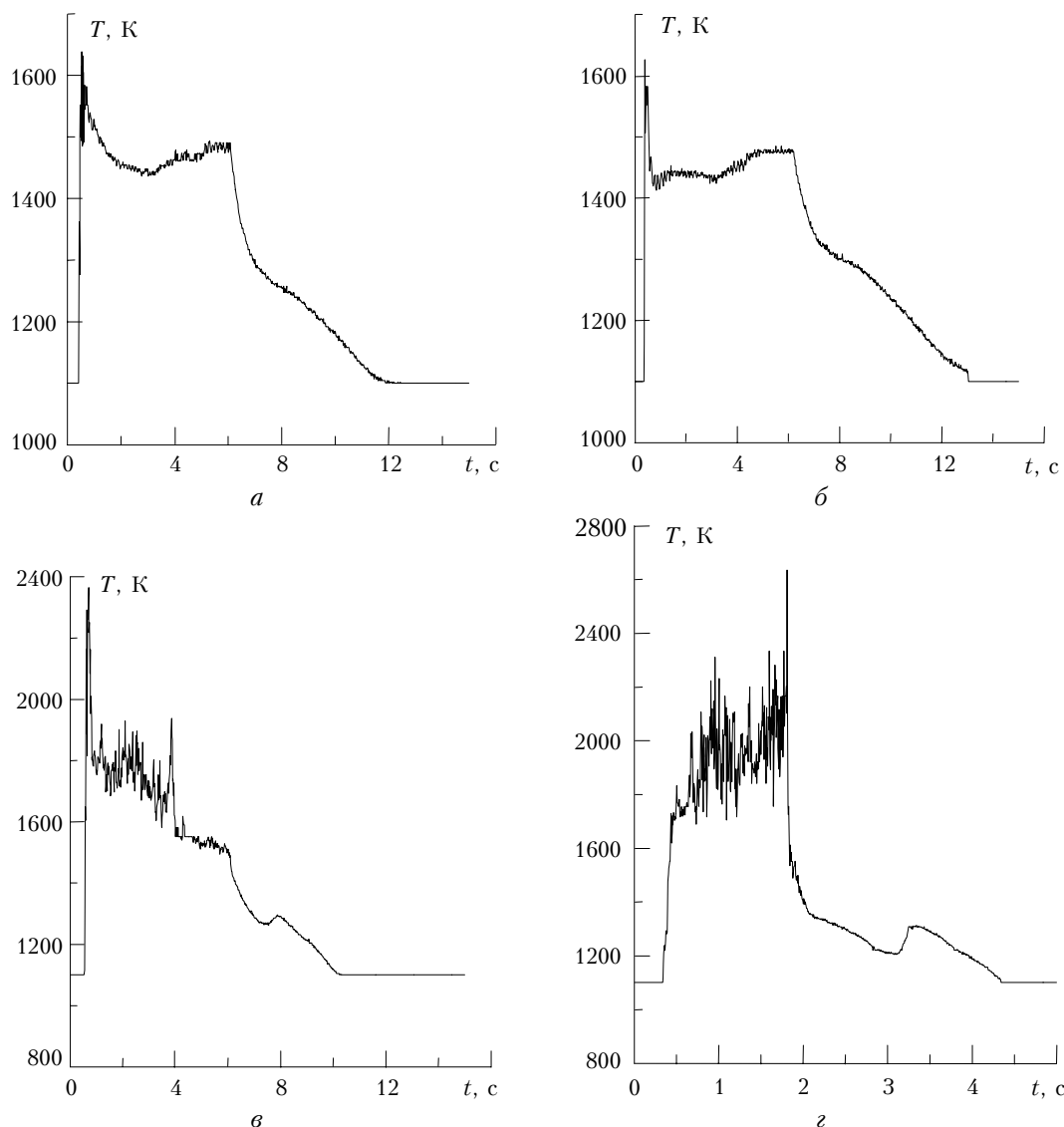


Рис. 4. Динамика температур при воздействии МЛИ с интенсивностью $q \sim 10^8$ Вт/м² на мишени из Na₂SO₃ и PbO: а, в – при пониженном давлении; б, г – при нормальных условиях

Анализируя данные экспериментальные зависимости $T(t)$, на каждой из кривых можно выделить три характерных температурных участка. На первом участке за время Δt_1 ($\sim 0,5$ с) от начала действия лазерного излучения происходит быстрый нагрев образца до максимальной температуры T_{\max} .

На втором участке за время Δt_2 (2÷8 с) происходит выгорание мишени, а температура вещества в зоне воздействия изменяется слабо. Резко падает температура на третьем участке за время Δt_3 (2÷7 с) в связи с тем, что прекращается воздействие МЛИ и образец остывает. На всех графиках в третьей области видна линейная зависимость температуры от времени. При сравнении температурных зависимостей для образцов различных веществ наблюдается идентичное поведение $T(t)$ независимо от их состава.

Наибольшие шумы регистрируются на пике температуры для PbO. Данное явление объясняется тем, что в момент воздействия при высокой температуре происходит химическая реакция монооксида свинца

и веществ, находящихся в воздухе, с выделением вторичных продуктов в виде парогазового облака при последующей их перекоагуляции, а также чистого свинца в кратере воздействия, кристаллизующегося при остывании образца. Это выявлено как визуально, так и при рентгеноструктурном анализе образца (до и после воздействия), а также вторичных частиц. Для остывшего образца монооксида свинца характерно наличие в кратере пузырька со слоистой структурой стенок и внешней поверхностью, напоминающей кубооктаэдр, усеченный октаэдр или усеченный кубооктаэдр.

Результаты рентгеноструктурного анализа исследуемых веществ показали следующее. Рентгенограмма хлорида аммония (NH₄Cl) до воздействия МЛИ практически полностью соответствует рентгенограмме вещества после лазерного взаимодействия. Положение дифракционных максимумов не изменяется, соотношение интенсивностей остается практически таким же. Можно полагать, что химический

состав данного вещества после лазерного воздействия не изменяется и сохраняется исходная кристаллическая структура.

Для хлорного железа ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) положение дифракционных максимумов не изменяется, но наблюдается некоторое изменение в соотношении интенсивностей пиков на рентгенограмме. Очевидно, химический состав исходного вещества в результате лазерного воздействия не изменяется.

Как показал анализ рентгенограммы, исходные данные оксида свинца (PbO) соответствуют одной из модификаций этого вещества (а именно, желтому оксиду свинца) с небольшими добавлениями красного оксида. В результате лазерного воздействия получившееся вещество имеет структуру желтого оксида свинца. При этом на рентгенограмме наблюдается небольшое количество малоинтенсивных пиков, вызванных, очевидно, наличием примесей. Ввиду малой интенсивности дифракционных пиков идентифицировать состав и характер не представляется возможным.

Для сульфата натрия (Na_2SO_4), сульфита натрия (Na_2SO_3) и гидросульфата натрия (NaHSO_4) рентгенограммы, соответствующие исходным образцам, существенно отличаются от рентгенограмм веществ, образовавшихся в результате лазерного воздействия. Дифракционным пикам, соответствующим исходному веществу, добавляются дополнительные максимумы, что можно связать с появлением либо высокотемпературных модификаций (для Na_2SO_4), либо продуктов частичного разложения (для Na_2SO_3 и NaHSO_4) в виде полисульфидов типа $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_n$ и кристаллогидратов, имеющих большое количество модификаций кристаллической структуры.

Таким образом, в результате воздействия лазерного излучения получившееся вещество или имеет тот же самый химический состав, что и исходное,

возможно с другой модификацией кристаллической структуры, или представляет собой смесь исходного вещества и продуктов частичного разложения в виде полисульфидов и кристаллогидратов.

Необходимо отметить, что для большинства исследованных веществ наблюдается изменение в соотношении интенсивностей дифракционных пиков. Причины этого, а также установление конкретных модификаций образовавшегося химического вещества и продуктов частичного разложения требуют дополнительных исследований.

1. Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Зуев В.Е., Кабанов А.М., Погодаев В.А. Нелинейная оптика атмосферного аэрозоля. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. 260 с.
2. Зуев В.Е., Копытин Ю.Д., Кузиковский А.В. Нелинейные оптические эффекты в аэрозолях. Новосибирск: Наука, 1980. 184 с.
3. Пахомов А.В. Аэрозоли лазерной плазмы: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., 1990. 118 с.
4. Букатый В.И., Соломатин К.В. Моделирование и расчет параметров теплоагрегата, возникающего в окрестностях тугоплавкой частицы // IV Симп. «Оптика атмосферы и океана»: Тезисы докл. Томск, 1997. С. 102.
5. Букатый В.И., Соломатин К.В. Определение размеров вторичных частиц, возникающих в окрестности тугоплавкой частицы // IV Симп. «Оптика атмосферы и океана»: Тезисы докл. Томск, 1997. С. 101.
6. Букатый В.И., Куприенко Г.В., Соломатин К.В. Моделирование процессов испарения тугоплавкой частицы и разлет испаренного вещества в атмосфере. Препр. / АГУ. 1997. № 97/1. 19 с.
7. Чистякова Л.К. Нелинейные эффекты при распространении интенсивных лазерных импульсов в аэрозольных средах. Экспериментальные исследования: Дис. ... докт. физ.-мат. наук. Томск, 2001. 249 с.
8. Андрухова Т.В. Экспериментальные исследования взаимодействия мощного лазерного излучения с твердым аэрозолем в условиях вакуума: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Барнаул, 2001. 198 с.

T. V. Andrukhnova, V. I. Bukaty. Formation of aerosols under impacts of laser radiation on a target.

The process of interaction of high-power laser radiation (H-PLR) with targets of aerosol substances is described, as well as dispersion of secondary particles affected by the radiation.