

УДК 537

Т. В. Андрухова

Динамика размеров аэрозольных частиц в мощных оптических полях при пониженном давлении

С развитием промышленного производства в крупных городах становится актуальной проблема загрязнения атмосферы промышленными аэрозолями. Мелкие частицы образуются главным образом в результате химических процессов, в том числе реакций горения. Их основными компонентами являются сернокислотные и сульфатные частицы, а также частицы, содержащие органические соединения. Частицы такого типа обладают ярко выраженными кислотными свойствами, являются источниками кислотных дождей. В отличие от них крупные частицы образуются при механических разрушениях природных материалов.

Одним из источников антропогенного аэрозоля является сжигание топлива, которое влечет за собой выбросы в атмосферу частиц на основе углерода. Основными частицами в аэрозолях являются уголь и сажа, содержащие связанный углерод, золу (минеральный остаток), влагу, а также летучие вещества (водород, метан, смолы). Одним из свойств атмосферных аэрозолей является их распространение на большие расстояния и высоты от источника образования. Аэрозольные дымки наблюдают в настоящее время в любых областях земного шара, ранее считавшихся чистыми. Аэрозольные частицы имеют размеры, обеспечивающие наиболее эффективное рассеяние света. Это влияет на теплообмен между атмосферой и земной поверхностью, что может приводить как к охлаждению земной поверхности в результате экранирования солнечного света, так и к нагреву верхних слоев атмосферы.

Интенсивное испарение твердой аэрозольной частицы под действием мощного лазерного излучения способно сопровождаться образованием конденсационного аэрозоля. В допробойном интервале интенсивностей излучения явление пере-конденсации может оказаться решающим при анализе распространения мощного лазерного излучения (МЛИ) в аэрозоле. Среда на большом расстоянии от частицы остается холодной, что приводит к большой неоднородности поля температур. Температура поверхности определяется плотностью потока энергии излучения, оптическими свойствами испаряющейся частицы и энергетическими потерями на испарение и переизлучение. Молекулы испаряющегося вещества могут находиться как в газообразной, так и в сконден-

сированной твердой или жидкой фазах. В работах [1, 2] описана газодинамическая модель испарения одиночной углеродной частицы в поле МЛИ в условиях вакуума с учетом пере-конденсации. Меньшая часть массы испаренного вещества превращается в частицы, а большая разлетается в виде газа. Давление испаренного углерода у поверхности частицы вначале превышает атмосферное, но с увеличением расстояния от частицы быстро уменьшается и становится существенно ниже атмосферного. Степень конденсации испаренного вещества слабо зависит от температуры поверхности частицы и плотности потока энергии падающего излучения. Плотность потока энергии от частицы складывается из энергопотерь за счет лучистого теплообмена и испарения с учетом пере-конденсации вещества.

Для сферически симметричного процесса испарения показано, что частица достигает максимальной температуры практически без изменения своего радиуса, теоретически получены зависимости температуры поверхности и радиуса частицы от времени для различных размеров частиц [1–4]. У крупных частиц радиус со временем практически линейно убывает до полного их испарения. В случае испарения мелкой частицы наблюдается ее быстрое как нагревание, так и охлаждение. Зависимость скорости испарения частицы от степени конденсации испарения вещества, от плотности потока энергии падающего излучения – практически линейные функции плотности потока энергии. В работе [5] экспериментально обнаружены в окрестности облучаемой лазером частицы NH_4Cl высокодисперсные частицы, образованные в результате конденсации испаренного вещества.

Для исследования динамики размера частиц необходимо знание химического состава, происхождения, форм и других микрофизических параметров аэрозолей. Ввиду многообразия таких параметров в экспериментах использовались неорганические химические вещества, такие как натрий сернокислый безводный, оксид свинца, аммоний хлористый, а также графит и сажа.

Одиночная частица, начальная форма которой близка к сферической, устанавливалась при помощи вакуумной замазки на кварцевую или нихромовую подложку, радиус которой не превышает радиуса самой частицы. Влияние подложки на ход

опыта было выявлено в предварительных экспериментах. При воздействии мощного лазерного излучения с плотностью потока энергии излучения 10^9 Вт/м² на частицу угля за время $1.3 \cdot 10^{-3}$ с размер первичной частицы угля увеличивается в 1.4 раза, а при длительности воздействия $4.0 \cdot 10^{-2}$ с размер первичной частицы увеличивается в 2–2,5 раза. Процесс изменения размера частицы протекает неравномерно. Наблюдаются флуктуации до выхода размера первичной частицы на максимальное значение, соответствующее максимальной температуре – 4000–5000 К. Это связано с нарушением строгой периодичности, присущей кристаллам.

Частица претерпевает подобное изменение кристаллической структуры первоначально в поверхностном слое в момент начального воздействия на нее МЛИ.

По мере прогревания частицы вглубь, сопровождающегося разлетом испаренного с поверхности вещества, вначале происходит уменьшение размера частицы, в дальнейшем – его увеличение. Периодичностью данного процесса объясняются флуктуации размера частицы до ее полного прогревания. Тогда частицу можно рассматривать как переохлажденную жидкость с очень большим коэффициентом вязкости, нарушения в кристаллической решетке которой произошли по всему ее объему. У крупных частиц температура поверхности после выхода на максимальное значение остается почти постоянной величиной до полного испарения частицы. Радиус частицы далее убывает практически линейно и за время $6.67 \cdot 10^{-2}$ с уменьшается более чем в 1,3 раза. В дальнейшем происходит фрагментация угольной частицы. Каждый фрагмент является ядром образования конденсированного облака из вторичных частиц. Для сажиистой частицы за время $\sim 2 \cdot 10^{-2}$ с размер первичной частицы увеличивается в два и более раз.

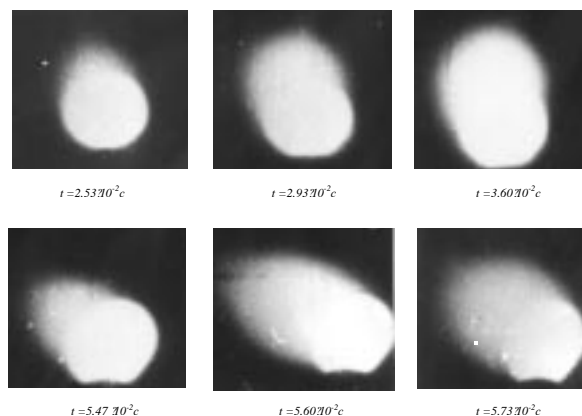


Рис. 1. Кинограмма испарения частицы графита с начальным диаметром 0,85 мм при интенсивности воздействующего излучения $I_0 = 2,14 \cdot 10^9$ Вт/м²

Поскольку сажа – это конгломерат из мелких углеродных агрегатов, то после нагрева частицы до температуры ~ 4000 К происходит фрагментация сажиистой частицы за счет кавитации внутри частицы и выхода испаренного вещества в результате разрушения полостей. После отрыва испаренного вещества от поверхности частицы происходит его быстрое остывание. Расширение испаренного вещества во всех случаях сопровождалось процессом перекоденсации, связанным с быстрым остыванием парогазового облака вследствие почти адиабатического процесса. На рисунке 1 видно, как меняется с течением времени диаметр частицы из чистого графита. Хорошо видны

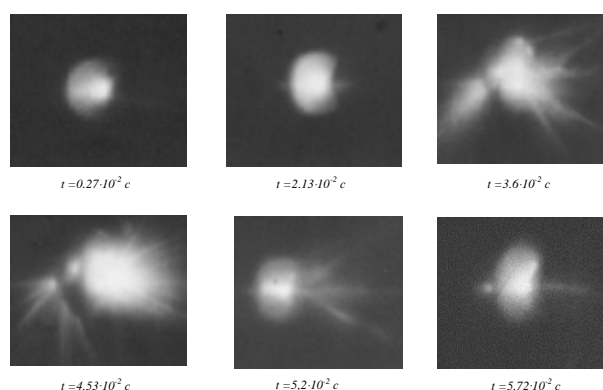


Рис. 2. Кинограмма испарения сажиистой частицы с начальным диаметром 1 мм при интенсивности воздействующего излучения $I_0 = 2,4 \cdot 10^9$ Вт/м²

выбросы испаренного вещества. Во многих случаях, особенно для сажиистых частиц (рис. 2), имеет место фрагментация при значительном отклонении формы частицы от сферической. Образование ореола в случае исследования сажиистой частицы и оксида свинца в поле мощного лазерного излучения средней интенсивности обусловлено в основном процессами испарения, перекоденсации, тепло- и массопереноса.

Результаты эксперимента показали, что фрагментация является характерным процессом и начинается спустя 2–2,5 мс от начала свечения частиц. Начальный размер осколков составляет для используемых нами частиц сажи 50–60 мкм. Радиус фрагментированных частиц при постоянном потоке энергии воздействующего излучения практически не зависит от размера исходных. Фрагментация объясняется слабой связью отдельных частей конгломерата, состоящего из мелких частиц размером менее 1 мкм, характеризуемого очень высокой пористостью. Именно этот факт, по-видимому, способствует тому, что частица не успевает полностью прогреться, и происходит интенсивная фрагментация. Каждый фрагмент является ядром образования конденсированного облака из вторичных частиц. Для частиц хлорида аммония получе-

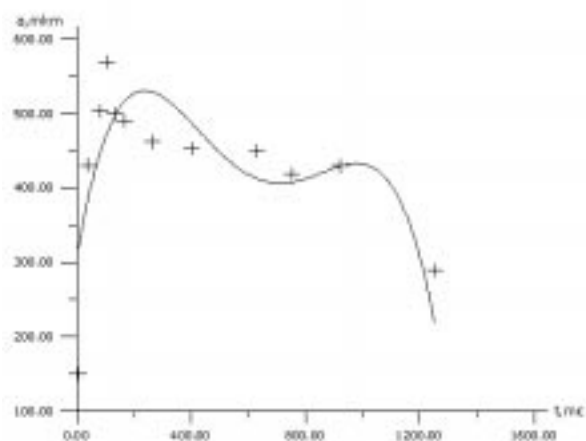


Рис. 3. Динамика размера частицы аммония хлористого в поле мощного лазерного излучения с плотностью потока энергии, равной $1.49 \times 10^{-6} \text{ Вт/м}^2$. Начальный размер частицы 500 мкм

но, что давление паров существенно больше давления насыщенного пара, поэтому уже вблизи частицы при испарении образуется существенное пересыщение.

Во всех опытах наблюдалась оболочка из частиц конденсационного типа, размер которой составлял (4–6) а. Центры конденсации могут представ-

лять собой твердые частицы, которые всегда находятся в атмосфере, либо конденсационный аэрозоль (для вакуума), образующийся при значительном пересыщении пара. У частиц графита, аммония хлористого (рис. 3) и натрия сернокислого безводного фрагментация отсутствовала. Характерным для этих частиц являлось увеличение их видимого размера вследствие «вскипания» поверхности, сама же частица была прогрета неравномерно (внешний слой прогревается быстрее). Механизм увеличения диаметра частицы (в начальный момент прогрева заметны значительные его флуктуации) может быть обусловлен следующими причинами: разбуханием частиц вследствие выхода летучих, нелинейным расширением материала частиц при столь высоких температурах, сменой агрегатного состояния вещества. После того, как частица достигла максимальных размеров, ее радиус вследствие испарения и разлета вещества с поверхности начинает уменьшаться. Возможно, эти процессы идут и в начальной стадии увеличения частицы, но их интенсивность невелика. После того, как радиус частицы начал убывать, мы имеем основание считать, что существуют только процессы, способствующие уменьшению радиуса и температуры.

Литература

1. Лямкина Г.В., Шайдук А.М. Размеры и концентрация мелкодисперсной фракции аэрозоля при испарении тугоплавкой частицы в вакуум // Оптика атмосферы. 1991. Т. 4. №11.
2. Лямкина Г.В., Шайдук А.М. Испарение и переконденсация тугоплавких частиц в мощном оптическом поле / Алтайский государственный университет. Барнаул, 1990. Деп. в ВИНТИ 11.11.90. №5653-ВУО.
3. Лямкина Г.В. Взаимодействие мощного лазерного излучения с тугоплавким аэрозолем в условиях вакуума с учетом переконденсации: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Барнаул, 1992.
4. Шайдук А.М. Моделирование процессов взаимодействия мощного лазерного излучения с дисперсными системами: Дис. ... докт. физ.-мат. наук. Барнаул, 1998.
5. Свердлов М.Ю. Исследование переконденсации при воздействии мощного лазерного излучения на термически неустойчивые частицы // Труды XI симпозиума по распространению лазерного излучения в атмосфере. Томск, 1991.