

## УДАРНЫЙ РАЗГОН ЧАСТИЦ В ПОЛЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

*С.Д.Захаров, М.А.Казарян, Н.П.Коротков*

*Физический институт им. П.Н.Лебедева*

*117924 Москва, Россия*

Поступила в редакцию 11 июля 1994 г.

Теоретически и экспериментально рассмотрено движение сильнопоглощающих частиц, взвешенных в жидкости, под действием импульсно-периодического лазерного излучения. Предложен механизм ударного разгона частиц, отличный от механизма конвекционного увлечения. Новый способ позволяет производить фигурную микрообработку поверхности мишени при бомбардировке светоправляемым потоком частиц со скоростями  $\sim 10^6$  см/с.

Исследования взаимодействия световых пучков с незаряженными микрочастицами стали проводиться сравнительно недавно, особенно после создания оптических квантовых генераторов и усилителей. Так, в одной из первых работ [1] и более поздней [2] были рассмотрены и предложены возможные механизмы ускорения частиц в луче лазера, а в работе [3] реализованы условия светового разгона частиц и измерены их скорости, которые оказались весьма высокими (для частиц микронных размеров  $\sim 10^6$  см/с). Однако рассмотренные механизмы описывают, в основном, поведение частиц, находящихся в разреженных средах. Нам представляется возможной реализация в поле лазерного излучения отличного механизма движения микрочастиц, взвешенных в слабопоглощающей излучение жидкости.

В настоящей работе показана возможность движения взвешенных в жидкости твердых сильнопоглощающих частиц с высокими скоростями под действием импульсно-периодического излучения. Показано, что величины скоростей частиц, достигнутых в экспериментах, согласуются с оценками скоростей, рассчитанных в соответствии с предлагаемым механизмом. Кроме того, в предложенной схеме реализована обработка поверхности мишени потоком твердых частиц, ускоренных в лазерном пучке.

Эксперименты проводились в схеме лазерного проекционного микроскопа с обратной связью [4], в которой источником излучения служила активная среда на парах меди. Излучение фокусировалось объективом на объект, отражалось и после повторного прохождения через объектив и усиления в активной среде отражалось зеркалом обратной связи и снова усиливалось в активной среде. В качестве объекта использовалась кварцевая кювета с суспензиями частиц. Клип, внесенный в резонатор, и проекционное зеркало строили на экране увеличенное и усиленное по яркости изображения объекта вблизи плоскости фокусировки объектива. Рассеянное от суспензии излучение собиралось отдельной линзой для наблюдения за поведением частиц на специальном экране. Частота повторения импульсов излучения составляла 10 кГц, длительность импульсов -  $10 \div 20$  нс. В качестве сильнопоглощающих частиц использовались порошки карбида бора ( $B_4C$ ) и карбонильного железа. Размер частиц 1–10 мкм, концентрация  $\sim 10^5$  мм<sup>-3</sup>. Кювета имела толщину 0,1 мм. На зеркало обратной связи наносилась маска, формирующая в кювете заданное

распределение интенсивности воздействующего пучка. При плотностях пиковой мощности  $I \sim 10^9$  Вт/см<sup>2</sup> на экране наблюдалось интенсивное движение частиц вдоль пучка, направленное к задней стенке кюветы. Далее излучение фокусировалось на заднюю стенку кюветы. Частицы, налетая на кварцевую стенку, разрушали поверхностный слой, а некоторые из них внедрялись в стекло на глубину до 8–10 мкм. Конфигурация обработанного участка стекла в точности соответствовала маске на зеркале. Фотография обработанного участка стекла представлена на рисунке (толщина линий на буквенных символах  $\sim 10$  мкм). При исследовании под микроскопом поврежденных участков стекла оказалось, что след от отдельной частицы имеет вид кратера, характерного для взаимодействия метеорита с поверхностью планеты. Тогда, зная глубину проникновения  $d$ -частицы, можно оценить ее начальную скорость [5].

$$v_0 \approx \sqrt{\frac{\pi d^3 H \epsilon \rho}{6m}},$$

где  $\epsilon$  – удельная теплота испарения материала мишени,  $\rho$  – его плотность,  $m$  – масса налетающей частицы,  $H \approx 4 \div 5$  – числовой множитель, Отсюда получаем значение  $v_0 \sim 10^6$  см/с.



Рассмотрим взаимодействие сфокусированного пучка с частицей (Fe) радиусом  $\lesssim 2$  мкм. Начиная с  $I \sim 5 \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>, нагретое вещество (Fe) непосредственно сублимируется в воду [6]. Зона нагрева, первоначально формируясь на поверхности частицы, по мере разлета паров отодвигается в воду. За время длительности импульса  $\tau_{\text{и}} \sim 10^{-8}$  с вблизи частицы выделится энергия  $E \sim 8 \cdot 10^{-6}$  Дж, которая достаточна для испарения воды объемом  $V \sim 10^{-9}$  см<sup>3</sup>. Фактически эта энергия выделится в объеме  $V_0 \sim a^2 l$ , где  $a$  – радиус частицы,  $l$  – характерная толщина теплопроводного нагрева:  $l \sim \sqrt{\chi t}$ ,  $\chi$  – температуропроводность воды. Получим  $V_0 \lesssim 10^{-11}$  см<sup>3</sup>  $\ll V$ , при этом температура зоны

$T \sim 10^4$  К [6], что приведет к взрыву прилегающей области с образованием ударной волны. Радиус ударной волны оценим из решения задачи о точечном взрыве [7]:

$$R \simeq \left( \frac{E}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}} \right)^{1/5} t^{2/5} \simeq 2 \cdot 10^{-3} \text{ см},$$

для момента времени  $t = 10^{-7,5}$  с и скорости волны

$$\frac{dR}{dt} \sim \frac{2}{5} \left( \frac{E}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}} \right)^{1/2} R^{-3/2} \sim 10^5 \text{ см/с}.$$

Считая, что за фронтом ударной волны образуется пар, а граница вытесненной воды движется с той же скоростью, получим массу этой воды и передаваемый телу импульс:

$$P \sim m \frac{dR}{dt}.$$

Скорость частицы к моменту окончания импульса определим из уравнения движения, в котором силу сопротивления запишем, как в случае шара, совершающего в жидкости колебательно-поступательное движение с большой частотой  $\omega \sim \frac{1}{\tau_n}$  [8]:

$$v_{\text{max}} \sim \frac{F_{\text{вн}}}{3\pi a^2 \sqrt{2\eta\rho_{\text{H}_2\text{O}}\omega}} (1 - e^{-\tau_n/\tau}), \quad \text{где } \tau \sim \frac{2a(2\rho_{\text{Fe}} + \rho_{\text{H}_2\text{O}})}{9\sqrt{2\eta\rho_{\text{H}_2\text{O}}\omega}}$$

$F_{\text{вн}} = P/\tau_n$  – внешняя сила, действующая на частицу,  $\eta$  и  $\rho_{\text{H}_2\text{O}}$  – соответственно вязкость и плотность воды. Отсюда величина скорости в наших условиях оценивается на уровне  $v_{\text{max}} \sim 10^6$  см/с. Видно, что она по порядку величины согласуется со значениями скорости, определенной в эксперименте.

В заключение отметим, что предложенный механизм отличается от механизма конвекционного увлечения, связанного с простым нагревом и перемещением среды, нагретой от поверхности поглощающей частицы. Предложенный способ позволит не только обрабатывать различные материалы, но и разделить смеси различных частиц в жидкости, например, при прокачке суспензии этих частиц через зазоры.

Авторы признательны К.И.Земскову за помощь в эксперименте и обсуждение результатов работы.

- 
1. Г.А.Аскарьян, Е.М.Мороз, ЖЭТФ **43**, 2319 (1962).
  2. Г.А.Аскарьян, УФН **110**, в.1 (1973).
  3. Г.А.Аскарьян, М.С.Рабинович, М.М.Савченко и др. Письма в ЖЭТФ **5**, 258 (1967).
  4. Г.А.Пасманик, К.И.Земсков, М.А.Казарян и др. Оптические системы с усилителями яркости. ИПФ АН СССР, Горький, 1988.
  5. Venus-Halley mission: IMPRIMERIE LOUIS-JEAN, Mai, 1985.
  6. Ю.В.Афанасьев, О.Н.Крохин, Труды ФИАН, **52**, (1970).
  7. Я.Б.Зельдович, Ю.П.Райзер, Физика ударных волн и высокотемпературных газодинамических явлений. М.: Наука, 1966.
  8. Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц, Гидродинамика. М.: Наука, 1988.