

# ПРОЦЕСС РАЗРУШЕНИЯ СФЕРИЧЕСКОЙ ПОЛИСТИРОЛОВОЙ МИКРОЧАСТИЦЫ В ИМПУЛЬСНОМ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОМ ПУЧКЕ, ДЛЯ ЗАДАЧИ МИКРОМАНИПУЛЯЦИИ

В.С. Васильев<sup>1</sup>, Р.В. Скиданов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет) (СГАУ), Самара, Россия

<sup>2</sup> Институт систем обработки изображений РАН, Самара, Россия,

Описано моделирование процесса нагрева сферической полистироловой микрочастицы при различном радиусе лазерного пятна длиной волны 355 нм. Представлены результаты моделирования для двух различных радиусов лазерного пятна. Проведены натурные эксперименты для нахождения скорости частицы радиуса в 5 мкм при их перемещении микровзрывом.

**Ключевые слова:** микровзрывы, ультрафиолетовый пучок света, полистироловые микросферы, скорость микрочастицы.

## Введение

В настоящее время все работы по манипулированию идут в направлении уменьшения размеров перемещаемых объектов [1-3]. Существует огромное количество методов манипуляции микрочастицами при помощи оптических ловушек разных типов. Однако желательно иметь метод для перемещения относительно крупных микрообъектов (более 30 мкм). Таких объектов особенно много встречается в биологических исследованиях (споры, микрообразцы тканей, крупные клетки). При этом желательно, чтобы на биологический микрообъект вообще не попадало световое излучение. Можно осуществлять механические манипуляции при помощи механического микропинцета. Для манипулирования микрочастицами этот метод является инвазивным (т.е. повреждает объект, который необходимо переместить).

Характерный размер перемещаемых микрообъектов с помощью обычной оптической ловушки от долей микрометра до примерно десятка микрометров. При этом, с увеличением размеров микрообъекта необходимо существенно повышать мощность светового пучка. Так как какая-то малая часть энергии светового пучка в любом случае поглощается в микрообъекте, то существует некоторый предел для размеров микрочастиц, которые могут быть перемещены за счёт сил оптического захвата. Точное значение такого размера зависит от многих параметров: коэффициента поглощения микрообъекта, свойств жидкости, формы поверхности микрообъекта и т.д. Но примерная оценка такого размера для сферических прозрачных микрообъектов даёт значение около 30 мкм. Следует заметить, что микрообъект, с размером близким к предельному, испытывает сильнейшее термическое воздействие. Ещё хуже обстоят дела с перемещением в световых ловушках непрозрачных микрообъектов. Предельный размер уменьшается в полтора - два раза. В то же время микрообъекты размером до 100 мкм все ещё довольно малы для механического перемещения. Существует довольно сложный способ комбинированного, с помощью света и ультразвука, захвата таких микрообъектов [4]. В [5] описан более простой метод пере-

мещения таких микрообъектов за счет микровзрывов полистироловых микрочастиц в пучке ультрафиолетового лазера с длиной волны 355нм.

Так же при помощи данного метода, возможно перемещать достаточно большие микрообъекты (в том числе биологические) без потери или частичного разрушения объекта манипулирования. При помощи микровзрыва можно добиться перемещения близлежащего объекта в каком-то определённом направлении и на определённое расстояние.

Объектом исследования в данной работе является вычисление характеристик взрыва полистироловой частицы, при которых может происходить взрыв (плавление) полистироловой частицы в ультрафиолетовом лазерном пучке.

Предметом исследования является поведение полистироловой микрочастицы при её взрыве.

Цель данной работы состоит в расчёте, моделировании и экспериментальной проверке параметров, при которых происходит взрыв сферической полистироловой частицы в импульсном ультрафиолетовом лазерном пучке.

В соответствии с поставленной целью, были сформулированы следующие задачи:

- разработка метода расчёта параметров взрыва микрочастицы, таких как температура, мощность и т.д;
- разработка модели, позволяющей учесть фазовый переход частицы (т.е её плавление при некоторой температуре) ;
- исследование результатов моделирование и в связи с этим проведение натурального эксперимента по взрыву частицы и наблюдение качественных совпадений результатов моделирования с результатами эксперимента.

#### **Научно-практическая новизна и значимость полученных результатов:**

- Разработан метод расчёта параметров, при которых происходит взрыв сферической полистироловой частицы в импульсном ультрафиолетовом лазерном пучке.
- Разработан метод расчёта параметров, при которых происходит плавление сферической полистироловой частицы в импульсном ультрафиолетовом лазерном пучке.
- Проведены натурные эксперименты по взрыву сферической полистироловой микрочастицы в задаче оптической микроманипуляции. В ходе экспериментов были исследованы параметры, при которых происходит взрыв полистироловой частицы, а так же переход частицы из одного состояния в другое под действием ультрафиолетового излучения (в данном случае плавление). Показано, что построенная модель качественно отражает параметры, при которых происходит взрыв полистироловой частицы и её переход из одного состояния в другое.
- Вычисление скоростей разлёта частиц при различных фокусирующих объективах (20X, 40X, 100X)

## 1. Математическая модель

Математическая модель, описывающая нагрев полистироловой частицы под действием импульсного ультрафиолетового лазерного излучения можно описать при помощи уравнения теплопроводности:

$$\frac{\partial u}{\partial t} - a^2 \Delta u = f(r, t) \quad (1)$$

Будем рассматривать 2-х мерную задачу, решая её численно, рассматривая некоторый узел  $(r_i, t_k)$ , для более удобного и простого манипулирования параметрами. Делая дискретизацию каждой компоненты уравнения (1), переходя к цилиндрическим координатам и учитывая сферическую симметрию задачи (всё тепло накапливается в центре и распространяется во все стороны одинаково) получаем следующую формулу:

$$\frac{u_i^{k+1} - u_i^k}{h_t} - a^2 \left( \frac{u_{i+1}^{k+1} - 2u_i^{k+1} + u_{i-1}^{k+1}}{h_r^2} + \frac{2}{r_i} \frac{u_{i+1}^{k+1} - u_i^{k+1}}{h_r} \right) = \frac{P}{cm}$$

где  $P$  – мощность источника лазерного излучения,  $c$  – удельная теплоёмкость полистироловой частицы,  $m$  – масса полистироловой частицы.

## 2. Результаты моделирования

Ниже будут представлены результаты моделирования, используя различные параметры. После этого будут представлены результаты натурального эксперимента, который будет включать последовательность кадров разлёта полистироловых микрочастиц после взрыва и определения по этим экспериментальным данным скоростей разлёта частицы при использовании различных фокусирующих объективов.

Радиус частицы  $r = 5 \cdot 10^{-6}$  метра. Результаты моделирования представлены на следующей странице в левой части, под рисунками располагаются параметры, при которых проводилось моделирование. Высокие температуры, которые получаются при малом лазерном пятне действительно могут быть достигнуты за счёт использования лазера импульсного типа.

По данным результатам можно качественно оценить температуру, до которой нагревается полистироловая микрочастица и сделать вывод будет ли происходить взрыв или нет. Как видно из результатов моделирования за время протекания импульса (5 нс) с энергией около 16 мкДж полистироловая микрочастица действительно нагревается до очень значительных температур, которые выше температуры разрушения полистирола. Что позволяет перейти к эксперименту.

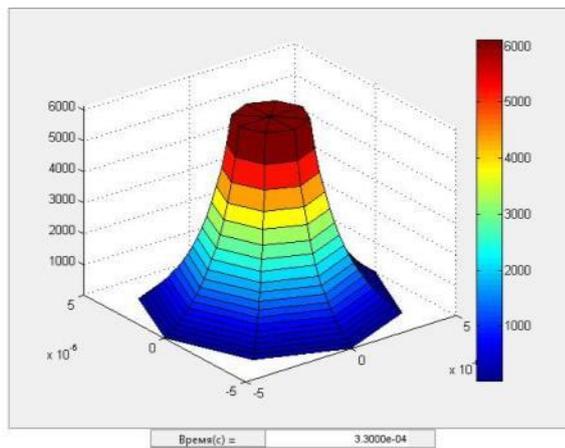


Рис.1. Результат моделирования

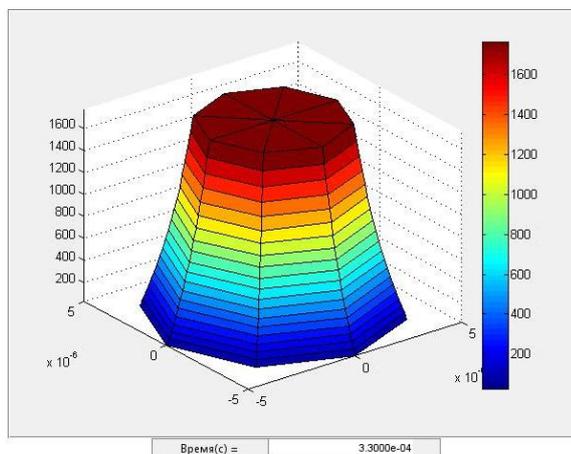


Рис.2. Результат моделирования

### 3. Эксперимент

Рассмотрим установку, которая использовалась в процессе натурального эксперимента для определения скорости частицы для различных фокусирующих объективов. В оптической схеме на рисунке 3 введены обозначения: UV- ультрафиолетовый лазер DTL-375 с длиной волны 355 нм и максимальной средней мощностью 40 мВт [4]; M1, M2, M3 – поворотные зеркала; I – лампа осветителя; L1 – фокусирующий микрообъектив (20x, 40x, 90x); L2 – изображающий микрообъектив (16x); CCD – видеокамера; V – подложка с микрообъектами. В эксперименте была использована CCD – камера FastVideo 500 E с разрешением 640x480.

Теперь перейдём к результатам эксперимента. В качестве подложки было использовано кварцевое стекло. Данный материал не поглощает свет в ультрафиолетовой области, тем самым исключает возможность микровзрыва из-за нагрева и плавления поверхности стекла. Ниже будут показаны результаты эксперимента по взрыву полистироловой микрочастицы, используя разрешение 320x240.

По большому количеству отснятых кадров были вычислены средние значения скоростей разлёта частиц после взрыва близлежащей частицы полистирола.

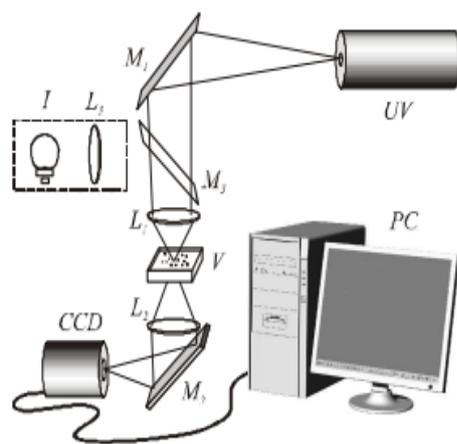


Рис. 3. Оптическая схема эксперимента для взрыва полистироловых микрочастиц

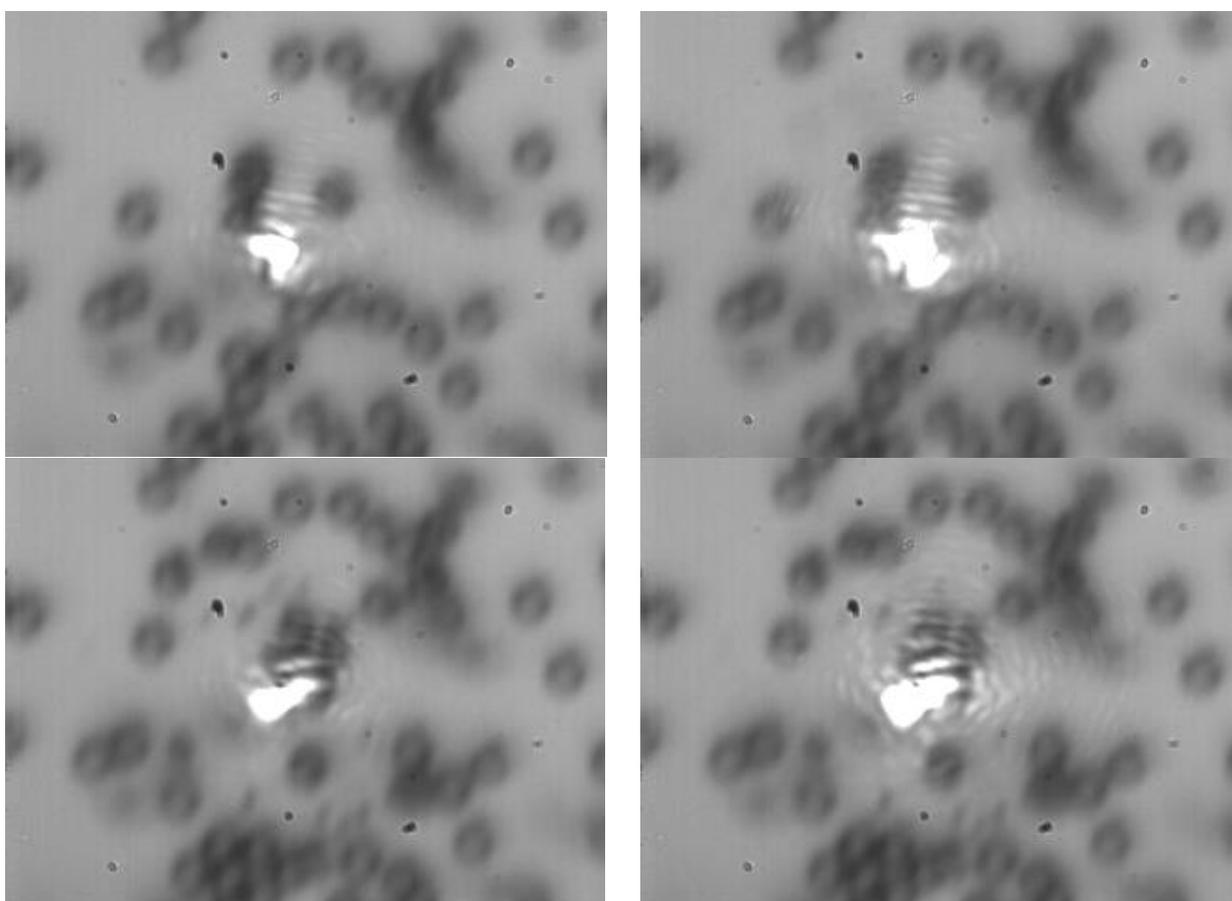
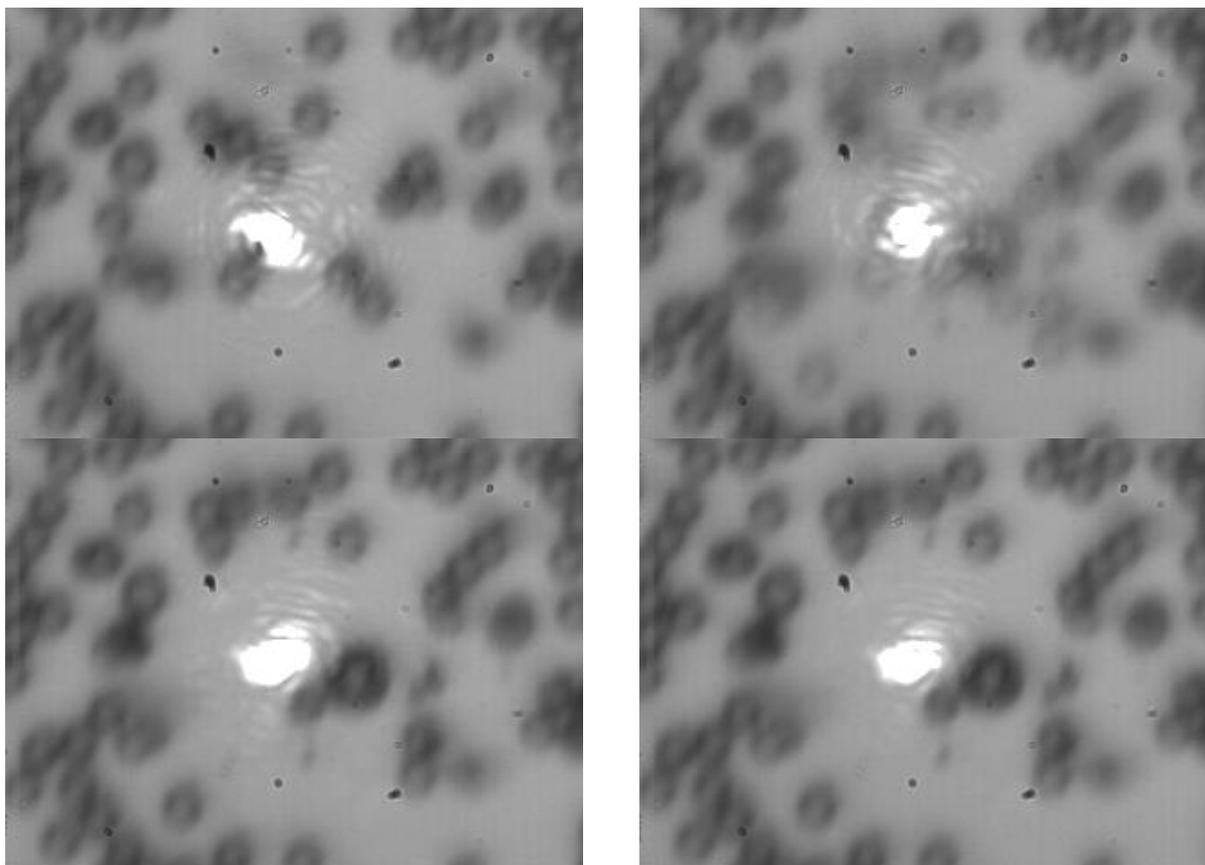


Рис. 4-7. Перемещение полистироловых микрочастиц посредством взрыва центральной частицы, отснятые с интервалом времени равным 0,5 мс



**Рис. 8-11.** Перемещение полистироловых микрочастиц посредством взрыва центральной частицы, отснятые с интервалом времени, равным 0,5 мс

Для объектива с 20-ти кратным увеличением средняя скорость разлёта частиц составила 15,3 мм/с, что является достаточно большим значением скорости для такого размера частиц.

При использовании объектива с 40-ка кратным увеличением средняя скорость достигла значения 10,53 мкм/с.

Меняя 40-ка кратный объектив на 100 кратный получаем значение средней скорости, равной 9,61 мм/с.

### **Заключение**

В процессе выполнения данной работы были получены следующие основные результаты:

- разработан метод моделирование нагрева сферической полистироловой частицы с фокусировкой лазерного пучка по центру. Были приведены результаты измерений при различных параметрах и определены приблизительные температуры взрыва полистироловой частицы: при мощности источника в 1 Вт и радиуса фокусировки излучения в 30% от радиуса частицы получаем температуру взрыва 6120 К, а если радиус фокусировки пучка увеличить до 60% от радиуса частицы, то получаем температуру 1761 К;
- экспериментально вычислены скорости разлёта частиц при использовании различных фокусирующих объективов: для объектива 20X получили скорость 15,30 мм/с, для объектива 40X – 10,53 мм/с, а для 100X скорость составила 9,61 мм/с;

- на качественном уровне были сравнены результаты теоретического исследования и результаты эксперимента. Была выявлена качественная сходимость результатов численного моделирования к экспериментальным данным.

## Литература

1. Zemánek, P. Optical trapping of nanoparticles and microparticles by a Gaussian standing wave / P. Zemranek, A. Jonras, L. Sramek, M. Liska // OPTICS LETTERS. – 1999. – Vol. 24, N. 21. – P. 1448-1450.
2. De, A.K. Stable optical trapping of latex nanoparticles with ultrashort pulsed illumination / A.K. De, D. Roy, A. Dutta, D. Goswami// APPLIED OPTICS. – 2009. – Vol. 48, N. 31. – P. 33-37.
3. Bosanac, L. Efficient Optical Trapping and Visualization of Silver Nanoparticles / L. Bosanac, T. Aabo, P.M. Bendix, L.B. Oddershede // NANO LETTERS. – 008. – Vol. 8, N. 5. – P. 1486-1491
4. Thalhammer, G. Combined acoustic and optical trapping / G. Thalhammer, R. Steiger, M. Meinschad, M. Hill, S. Bernet, and M. Ritsch-Marte // BIOMEDICAL OPTICS EXPRESS. 2011. V. 2, N. 10, P. 2859-2870
5. Скиданов, Р.В. Составной световой пучок и микровзрывы для оптической микроманипуляции / Р.В. Скиданов, А.А. Морозов, А.П. Пофирьев // Компьютерная оптика. – 2010. – Т.34, №3. – С.371-375.