

Исследование динамики пылеобразования в быстропротекающих процессах на основе малоуглового рассеяния света

Ш. М. Исмаилов, В. Г. Каменев

ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова»,
Москва, Россия

В докладе описаны лазерно-оптические методы, на основе которых разрабатывается аппаратура для регистрации параметров прошедшего и рассеянного дисперсной средой излучения. Результаты применения методов и созданной аппаратуры позволяют получить информацию о концентрации рассеивателей и их размерах при различной интенсивности процессов пыления в газодинамических экспериментах.

Ключевые слова: Оптика, Голография, Рассеяние света, Динамика, Рассеяние Ми, КОР.

Цитирование: **Исмаилов, Ш. М.** Исследование динамики пылеобразования в быстропротекающих процессах на основе малоуглового рассеяния света / Ш. М. Исмаилов, В. Г. Каменев // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 360–364.

Изучение свойств конструкционных материалов и специальных изделий очень актуальная задача в области газодинамических исследований ударно-волновыми методами. При этом для регистрации движения поверхностей в основном используются различные методы [1]. Однако при взаимодействии ударной волны с поверхностью образца и превышении пороговых значений давления наблюдаются процессы откола и микрокумуляции частиц пыли, приводящие к образованию металлических частиц. В начале движения поверхности образовавшиеся частицы обладают скоростями, превышающими скорость самой поверхности, в результате чего поверхность экранируется облаком данных частиц [2]. Параметры дисперсной фазы существенно влияют на результаты исследования движения свободной поверхности оптическими и интерферометрическими методами, так как частицы дисперсной фазы создает паразитный сигнал излучения и экранирует свободную поверхность от зондирующего излучения. В настоящее время механизмы образования дисперсной фазы при ударно-волновом нагружении конструкционных материалов изучены в недостаточной мере, что делает востребованными результаты настоящего исследования. Определение параметров облака дисперсной фазы возможно с помощью таких оптических методов как статистическое рассеяние, фотонная корреляционная спектроскопия, дифракционные методы, электронная микроскопия [3]. В настоящей работе описаны результаты исследования возможности использования метода малоуглового рассеяния света на частицах малого размера в соответствии с теорией Ми.

Совокупность голографии, методов КОР и рассеяния Ми позволит расширить диапазон регистрации параметров пылевых образований. Одновременная регистрация несколькими методами позволит отследить динамику развития пылевого облака, рисунок 1.

В начальный момент выхода ударной волны на поверхность образца, с поверхности вылетают сначала частицы малого размера и в небольшой концентрации, что позволяет исследовать динамику пыления с помощью послойного голографирования процесса. Затем начинает образовываться более плотное облако пыли с размерами большими или равными с длиной волны излучения, которое будет исследоваться в данном докладе с помощью методов рассеяния Ми и Релея. На третьем этапе начинают образовываться струи вперемешку с крупными частицами и плотной пылью, такое распределение частиц хорошо регистрирует метод когерентного обратного рассеяния.

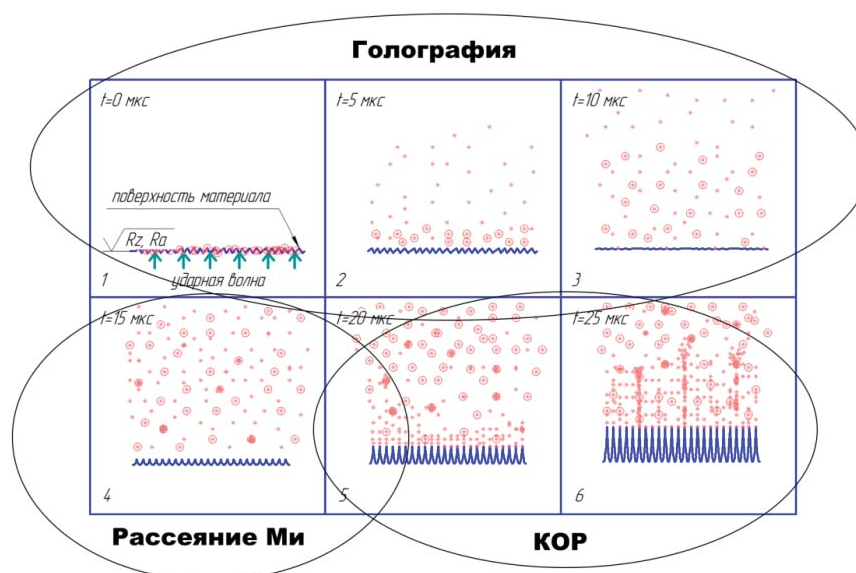


Рис. 1. Исследование комбинированных методов

На рисунке 2 представлена демонстрация эффекта рассеяния монохроматического излучения, где а – прохождение света через чистую прозрачную среду, б – прохождение света через дисперсную фазу, во втором случае на экране более размытое пятно, что связано с рассеянием на частицах дисперсной фазы.

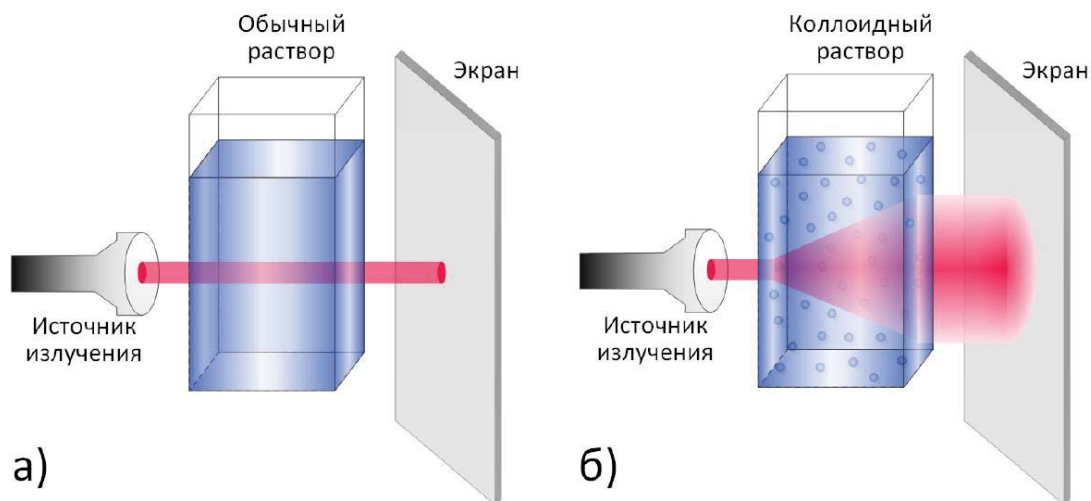


Рис. 2. Демонстрация эффекта рассеяния: а) отсутствие эффекта рассеяния в обычном растворе; б) наблюдение эффекта рассеяния в дисперсной фазе

Из теории Ми следует, что угловое распределение света, рассеянного частицами дисперсной среды, однозначно связано с радиусом частицы R [4]. Интенсивность света, рассеянного одной частицей под разными углами к направлению падающего луча (индикатриса рассеяния света), определяется следующим соотношением:

$$I = I_0 \frac{8\pi^4}{z^2 \lambda^2} R^6 \left(\frac{m^2 - 1}{m^2 + 1} \right) (1 + \cos^2 \gamma),$$

где m – показатель преломления вещества частицы, z – расстояние от частицы до регистрирующего прибора, λ – длина волны, I_0 и I – интенсивности падающего и рассеянного излучателей, γ – угол под которым измеряется интенсивность рассеянного излучения относительно падающего.

Укрупнение частиц приводит к изменению индикатрисы рассеяния:

1. при размерах частиц $0,1\lambda - 1,0\lambda$ преобладает рассеяние вперёд по направлению распространения первичного излучения;
2. при размерах частиц, превышающих $1,0\lambda$, под различным углами распространения появляются дополнительные «лепестки» максимумов интенсивности (рисунок 3) [5-6].

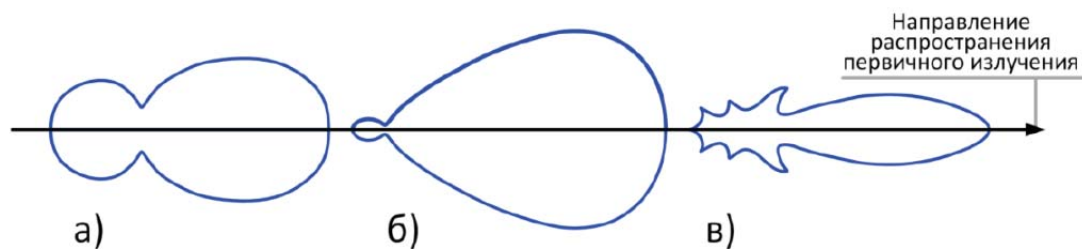


Рис. 3. Индикатрисы рассеяния для частиц, размеры которых равны: а) $1/3 \lambda$ б) $1,0\lambda$; в) более $1,0\lambda$

В среде Zemax было проведено расчетное моделирование переноса фотона через среду при заданном угле 30° и различных длин свободного пробега, рисунок 4.

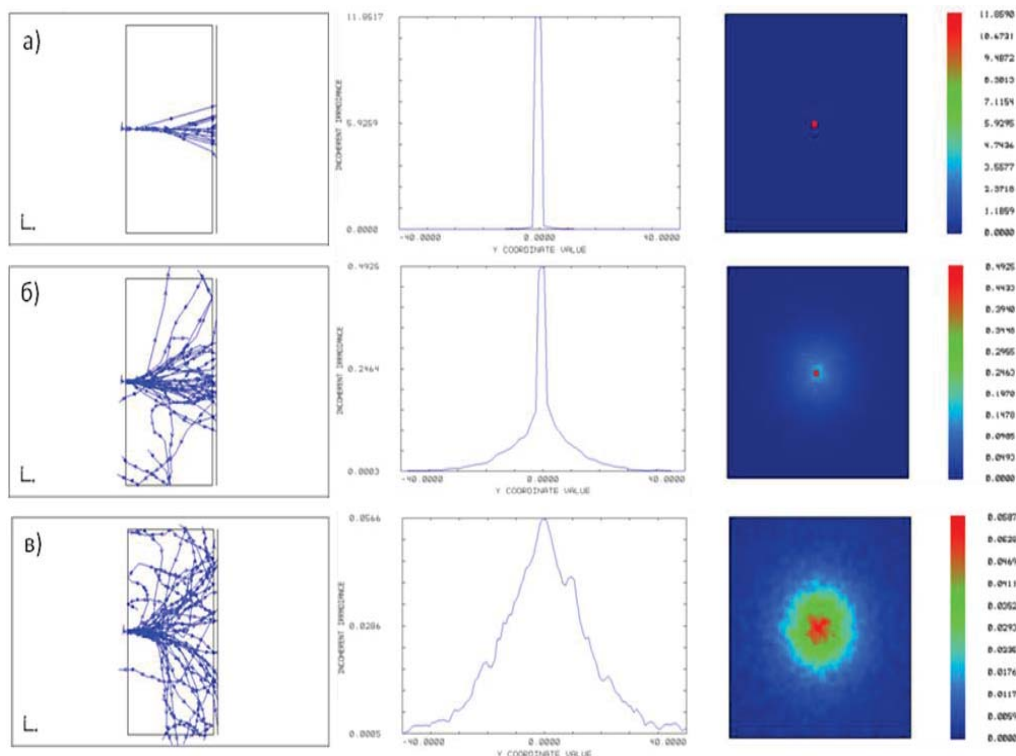


Рис. 4. Расчет рассеяния при заданном угле 30° и длине свободного пробега:
а) 100 мкм; б) 10 мкм; в) 5 мкм

На рисунке 5 приведена зависимость пиковой интенсивности рассеянного излучения от длины свободного пробега фотона в дисперсной среде.

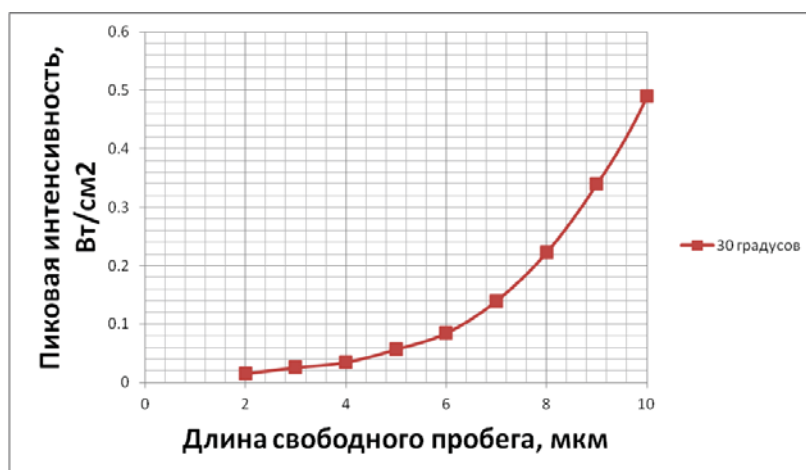


Рис. 5. Зависимость пиковой интенсивности рассеянного излучения от длины свободного пробега фотона в дисперсной среде

Выводы

Разработан стенд для регистрации и анализа рассеянного излучения в соответствии с теорией Ми и Релея. Выполнено экспериментальное и расчетное исследование рассеяния света на частицах дисперсной фазы. На основании результатов, полученных из экспериментальных данных и проведенных расчетов, метод рассеяния Ми позволяет получить информацию о концентрации частиц, а по диаграмме рассеяния Ми возможно оценить размеры частиц.

Список источников

- [1] Кузьмин В. Л., Романов В. П. Когерентные эффекты при рассеянии света в неупорядоченных системах // Успехи физических наук. – 1996. – Т. 166. – №. 3. – С. 247–278.
- [2] Schauer M. M. et al. Ejected particle size distributions from shocked metal surfaces // Journal of Dynamic Behavior of Materials. – 2017. – Т. 3. – №. 2. – С. 217–224.
- [3] Крушенко Г. Г., Решетникова С. Н. Проблемы определения размеров наночастиц // Сибирский журнал науки и технологий. – 2011. – №. 2 (35). – С. 167–170.
- [4] Иванов А.П. Оптика рассеивающих сред – Минск: Наука и техника, 1969. – 592 с.
- [5] Зверева, С. В. В мире солнечного света / С. В. Зверева; рец. К. С. Шифрин // Л.: Гидрометеоиздат, 1988. – 160 с.
- [6] Матвеев, А. Н. Оптика: Учеб. пособие для физ. спец. Вузов // М.: Высшая школа, 1985. – 351 с.

Investigation of the dynamics of dust formation in fast-flowing processes based on small-angle light scattering

Sh. M. Ismailov, V. G. Kamenev

The Federal State Unitary Enterprise Dukhov Automatics Research Institute (VNIIA), Moscow, Russia

The report presents a description of laser-optical methods and equipment for recording the parameters of laser radiation transmitted and scattered by a dispersed medium. The results of the application of the methods and the created equipment make it possible to obtain information on the concentration of scatterers and their sizes at various intensities of dusting processes in gas dynamic experiments.

Keywords: Optics, Holography, Light scattering, Dynamics, Mie scattering, CBS.