

обеих мод в распределении по размерам дисперсной фазы.

- Диапазон флуктуации модальных размеров меньше для мелкой фракции и больше для крупной фракции в средней (по высоте) части потока плазмы.
- Зависимость ширины распределения конденсированных частиц по размерам вдоль оси плазменного потока зависит от исходного состава ПТС.

Оценки суммарной погрешности определения дисперсности КДФ плазмы горения ПТС дают величину менее 11% при времени усреднения величин коэффициентов пропускания (для одного образца) 1,5 мс и времени обработки на ЭВМ спектрального хода коэффициентов поглощения менее 30 мин.

Таким образом, экспериментальная установка и разработанная программа обработки на компьютере коэффициентов пропускания на дискретных длинах волн позволяют определять гранулометрический состав КДФ плазмы с приемлемым значением суммарной погрешности.

Литература

1. *Русанов В.Д., Фридман А.А.* Физика химически активной плазмы. – М.: Наука, 1984.
2. *Диагностика плазмы: Сб. статей.* / Под ред. М.И. Пергамента. – М.: Энергоатомиздат, 1990. Вып 7. 271 с.
3. *Клочков В.П., Козлов Л.Ф., Пыткевич Н.В., Соскин М.С.* Лазерная анемометрия, дистанционная спектроскопия и интерферометрия. – Киев: Наукова думка., 1985.
4. *Диагностика металлических порошков* / В. Я. Буланов, Л. И. Квартер, Т. В. Долгаль, Т. А. Угольникова, В. Б. Акименко. – М.: Наука., 1983. 278 с.
5. *Тихомиров И.А., Цимбал В.Н., Мышкин В.Ф. и др.* Разработка экспериментального стенда для диагностики конденсированной дисперсной фазы низкотемпературной плазмы. Препринт № 12-97. – М.: изд. НТЛ.
6. *Иванов В.К., Васин В.В., Танана В.П.* Теория линейных некорректных задач и ее приложения. – М.: Наука, 1978: 208с.

УДК 535.9.082.5

ЛАЗЕРНАЯ ДИАГНОСТИКА ДИНАМИКИ ДИСПЕРСНОСТИ ГЕТЕРОГЕННОЙ ПЛАЗМЫ

И.А. Тихомиров, В.Н. Цимбал, В.Ф. Мышкин

Томский политехнический университет

Статья посвящена разработке метода лазерной диагностики динамики во времени гранулометрического состава конденсированной дисперсной фазы (КДФ) плазмы горения ПТС по различным сечениям вдоль оси потока. Проанализированы возможности описанных в научной литературе установок для определения гранулометрического состава аэрозолей. Приводится описание лазерного стенда, позволяющего запоминать экспериментальные данные с частотой от 1 Гц до 4 кГц. Гранулометрический состав КДФ определяется по малоугловой и полной индикатрисам рассеяния лазерного излучения на плазме горения ПТС. Путем обработки с помощью ЭВМ по регуляризирующим алгоритмам экспериментальных данных определен характер изменения гранулометрического состава КДФ вдоль оси потока плазмы горения.

Гранулометрический состав конденсированной дисперсной фазы (КДФ) влияет на энергетический баланс плазмы, на протекающие в ней физико-химические процессы. Методы диагностики КДФ с отбором проб из плазмы имеют значительную погрешность и из-за высокой температуры и химических превращений в объеме, не позволяют получить временную динамику параметров КДФ. Наиболее приемлемы оптические методы диагностики, позволяющие проводить безотборный анализ в реальном масштабе времени. Преимуществом интегральных лазерных методов, при

диагностике КДФ в плазме горения ПТС, является возможность проведения анализа гранулометрического состава без отбора пробы по различным сечениям потока. В зависимости от диапазона углов регистрации рассеянного излучения можно выделить: метод малоуглового рассеяния, метод полной индикатрисы, метод обратного рассеяния.

Основные вопросы взаимодействия оптического излучения с дисперсной частицей и соотношения для расчета интенсивности рассеянного света на малых частицах впервые рассмотрены в работе [1]. Фактор эффективности рассеяния оптического излучения на дисперсных частицах, сравнимых с длиной волны зондирования, имеет нелинейную связь с размером частиц. Частицы микронных размеров обладают характерными особенностями в угловом распределении рассеянного излучения в диапазоне углов $0 \div 180^\circ$. Частицы КДФ, параметр рассеяния которых больше единицы, имеют характерные особенности при малых углах рассеяния. Теоретической основой интегральных оптических методов является решение уравнения Фредгольма первого рода. Задача обработки экспериментальных данных сводится к численному решению на ЭВМ обратной задачи рассеяния оптического излучения.

Метод малоугловой индикатрисы рассеяния. Метод измерения малоугловой индикатрисы для определения дисперсного состава частиц в движущихся потоках был предложен К.С. Шифриным в 1956 году [2]. Метод малых углов основан на исследовании ореола рассеянного света вокруг направления на источник излучения. Для однородных диэлектрических сферических частиц при параметрах рассеяния $\rho = 2\pi r/\lambda \gg 1$ под малыми углами сечение рассеяния описывается выражением $\sigma(\rho, \theta) = \text{const} \times I_1^2(\rho, \theta) r^2 / \theta^2$, которое справедливо в диапазоне размеров частиц $0,1 \div 100$ мкм. Здесь r – радиус частицы, λ – длина волны зондирования, I_1 – функция Бесселя первого рода, θ – угол рассеяния.

Задача восстановления распределения частиц КДФ по размерам по картине дифракции света в дальней зоне сводится к решению уравнения Фредгольма 1 рода с вполне непрерывным несамосопряженным оператором. Априорная информация о конечности искомой функции при восстановлении распределения частиц по размерам позволяет скомпенсировать ошибки, появляющиеся вследствие ограниченного объема экспериментальных данных.

Интенсивность рассеянного излучения на большой частице в направлении вперед можно разложить на составляющие [3]: дифракция на контуре частицы, отражение, преломление и поглощение пучка, попавшего внутрь контура частицы. Дифракция определяет яркость света, рассеянного под малыми углами, остальные процессы – рассеяние по всем другим направлениям. По сравнению со “средним” диском случайные отклонения формы частиц увеличивают общее рассеяние, изменяют форму индикатрисы рассеяния, вытягивая ее в область основного максимума (в направлении вперед).

Технически малоугловые измерения светорассеяния могут быть проведены по схемам: «призмы полного внутреннего отражения» и «длиннофокусной линзы» [4]. В малоугловой схеме с призмой полного внутреннего отражения прошедшее без взаимодействия через газодисперсную среду излучение призмой возвращается назад. Пучки рассеянных в малые углы лучи проходят через призму, преломляясь. При малых углах рассеяния призма дает значительное угловое увеличение.

При использовании “линзовой” схемы для регистрации малоугловой индикатрисы рассеяния формируют коллимированный пучок монохроматического света. Рассеянные на газодисперсной среде параллельные лучи разделяются по угловым направлениям с помощью объектива при фокусировании на плоскость фотоприемника. Угловое разрешение определяется размером фокального пятна объектива и

обычно составляет 10 угловых минут. В работе [5] рассеянное излучение регистрировалось до углов $5 \div 6^\circ$. Световой поток в фокальной плоскости собирающего объектива убывал в 10 раз на каждый градус угла. Устройство позволяло определять размеры частиц в диапазоне $1 \div 50$ мкм при их концентрации $50 \div 800$ см⁻³. Расхождение с микрофотографическими данными не превышало $5 \div 10\%$.

В нефелометрах малоуглового рассеяния [6] может быть предусмотрено функциональное преобразование потока рассеянного излучения. Сигнал на выходе фотоприемника, благодаря применению серого оптического клина, перемещающегося синхронно с фотоприемником, пропорционален $I(\theta)\theta^3$, а не интенсивности рассеянного излучения $I(\theta)$. Это упрощает обработку рассеянных сигналов, сужает необходимый динамический диапазон фотоприемника.

Функциональное преобразование может быть использовано также при измерениях в конечном числе точек. При диагностике угольных частиц в потоке плазмы горения [7] измерительный стенд состоял из лазера ЛГН-214, объектива, набора апертурных диафрагм, фотоприемника ФЭУ-84 с интерференционным фильтром ($\Delta\lambda=1$ нм). Использовалась линзовая схема выделения малоуглового рассеяния. На ФЭУ проецируется изображение газодисперсного потока в рассеянном излучении и прошедшее через измеряемый объем без взаимодействия излучения. Между объективом и фотоприемником располагается вращающийся диск с набором восьми апертурных диафрагм. Минимальный апертурный угол составляет $0,5$, а максимальный - 20° .

Использование клиновидной диафрагмы при анализе гранулометрического состава КДФ путем определения малоугловой индикатрисы рассеяния [8] позволяет регистрировать величину $I(\theta)\theta^2$ и обеспечивает линейный режим работы фотоприемника в углах рассеяния $0,001-0,2$ рад, что позволяет анализировать частицы размером $2-100$ мкм (при фокусном расстоянии объектива 50 см).

Поперечное перемещение относительно оптической оси лазера, ФЭУ с точечной диафрагмой использовано в работе [9]. Осуществляется оптико-электронная модуляция лазерного излучения и регистрация переменного сигнала ФЭУ вольтметром переменного тока ВЗ-6. Измеряется малоугловая индикатриса в диапазоне углов $0 \div 5^\circ$ с разрешением $2'$. Устройство позволяет определять размеры частиц $2 \div 100$ мкм с точностью 15% при времени регистрации индикатрисы $3 \div 5$ мин.

Следует заметить, что во всех известных схемах принципиально невозможно измерить интенсивность излучения, рассеянного в направлении угла 0° .

Для определения интенсивности рассеянного в направлении угла в 0° излучения авторами настоящей статьи разработан и испытан способ определения малоугловой индикатрисы рассеяния [10]. Для этого формируют пучок коллимированного оптического излучения, разделяют его на когерентные опорный и зондирующий пучки равной интенсивности. Зондирующий пучок оптического излучения направляют через рассеивающую среду. Затем пучок коллимированного оптического излучения, прошедшего через рассеивающую среду, поток оптического излучения, рассеянного на рассеивающей среде на малые углы и пучок опорного оптического излучения совмещают в плоскости, в которой регистрируют величины интенсивностей излучения. При этом угол пересечения оптических осей опорного и зондирующего пучков оптического излучений выбирают так, чтобы период интерференционной картины указанных пучков превышал диаметры фокальных пятен опорного и зондирующего пучков. Причем фокальные пятна пучков зондирующего и опорного оптического излучений совмещают в одном из минимумов интерференционной картины.

Период интерференционной картины должен быть больше диаметров фокальных пятен пучков опорного и зондирующего оптического излучений. При этом в

плоскости регистрации интенсивностей потоков рассеянного излучений интенсивность прошедшего рассеивающую среду зондирующего оптического излучения можно уменьшить ниже порога чувствительности используемого фотоприемника (за счет совмещения положения фокального пятна пучка, прошедшего через рассеивающую среду зондирующего оптического излучения, с положением интерференционного минимума). ФЭУ регистрируют только рассеянное оптическое излучение. Это позволяет определять индикатрису рассеяния во всей малоугловой области, включая направление зондирующего пучка (направление в 0°).

При экспериментальной отработке способа определения малоугловой индикатрисы рассеяния формировали пучок коллимированного оптического излучения гелий-неонового лазера ЛГ-79 диаметром 10 мм. Коллимированный пучок с помощью светоделительной пластины из стекла К-8 толщиной 30 мм разделяли на пучки опорного (отраженный от светоделительной пластины) и зондирующего (прошедший светоделительную пластину) оптического излучений. Светоделительные пластины, по отношению к направлению распространения коллимированного оптического излучения, устанавливали под углом $\approx 45^\circ$. Мощности этих пучков выравнивали с помощью набора серых фильтров с общим коэффициентом ослабления до 15 раз, устанавливаемых в зондирующий пучок. Пучок зондирующего оптического излучения с помощью поворотного зеркала направляли на струю газа диаметром не более 15 мм, содержащую частицы металлического железа диаметром $5\div 30$ мкм. Пучки зондирующего оптического излучения: прошедший и рассеянный на разные углы в этой струе с помощью объектива (Юпитер-21М) фокусировали на плоскость подвижной диафрагмы шириной 0,5 мм перпендикулярно к ней. Пучок опорного оптического излучения также фокусировали с помощью объектива (Юпитер-21М) на плоскость подвижной диафрагмы под углом в 6° к направлению зондирующего пучка. Фокальные пятна опорного и зондирующего пучка, прошедшего рассеивающую среду, сводили в одной точке на плоскости подвижной диафрагмы, совпадающей с областью одного из минимумов интерференционной картины. Расстояние между объективом и газовой струей устанавливали равным 200 мм. Период интерференционной картины при взаимодействии двух пучков оптического излучения длиной волны 0,6328 мкм, сходящихся под углом 6 градусов, составляет 6,04 мкм, диаметр фокального пятна - 3,1 мкм.

Сигналы ФЭУ-114 запоминали с помощью осциллографа С8-12. При этом, время определения малоугловой индикатрисы рассеяния, в диапазоне углов $(0, 5, 7^\circ)$, составляло порядка $6,7 \cdot 10^{-4}$ с. В таблице 1 приведена усредненная по времени экспериментально полученная малоугловая индикатриса рассеяния. Малоугловые индикатрисы рассеяния получены при зондировании излучением с длиной волны 0,6328 мкм потока воздуха, содержащего частицы металлического железа диаметрами $25\div 30$ мкм. Усредненная по нескольким реализациям малоугловая индикатриса рассеяния нормирована на величину мощности потока излучения, рассеянного в направлении угла 0° .

Таблица 1

Малоугловая индикатриса рассеяния

θ°	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,1	1,3
I, отн.ед.	1	0,93	0,75	0,52	0,29	0,12	0,03	0,0013	0,0047	0,015	0,012	0,0003
θ°	1,6	1,9	2,3	2,7	3,1	3,7	4,3	4,9	5,6			
I, отн.ед.	0,0043	$1,4 \cdot 10^{-4}$	0,0013	$5,7 \cdot 10^{-4}$	$4,4 \cdot 10^{-5}$	$3,3 \cdot 10^{-5}$	$2,6 \cdot 10^{-5}$	$2,2 \cdot 10^{-5}$	$3,5 \cdot 10^{-5}$			

Метод полной индикатрисы рассеяния. Можно выделить два основных способа регистрации полной индикатрисы: сканирование одним фотоприемником в заданном диапазоне углов (сканирование источником зондирующего излучения в заданном диапазоне углов), одновременная регистрация на нескольких фиксированных направлениях или диапазоне углов. Может использоваться как когерентное, так и некогерентное излучение. Счетный объем формируется в месте пересечения зондирующего оптического излучения и центра объемной системы выделения рассеянного излучения.

Для определения функции распределения частиц по размерам по полной индикатрисе рассеяния также необходимо решить интегральное уравнение Фредгольма первого рода:

$$I(\theta) = \int_0^{\infty} \sigma(\theta, \rho) f(\rho) d\rho,$$

где $I(\theta)$ – полидисперсная индикатриса рассеяния, $\sigma(\theta, \rho)$ – индикатриса рассеяния света на отдельной частице радиусом r , ρ – параметр дифракции.

Рассмотрим некоторые экспериментальные схемы установок для регистрации полной индикатрисы рассеяния оптического излучения.

Для регистрации индикатрисы в широком диапазоне углов в полевых условиях был испытан серийный нефелометр ИФ-14 при различном состоянии атмосферы [11]. Для автоматического отслеживания оптической толщины рассеивающего слоя воздуха введена поворотная диафрагма, расположенная параллельно оптической оси коленчатой трубы. Использование фотометрического клина позволяет получить динамический диапазон 100 для измеряемых интенсивностей по разным углам. Набор нейтральных светофильтров позволяет расширить диапазон измеряемых интенсивностей. Угловой диапазон регистрации индикатрисы составляет 16-164°. Точность замеров нефелометром ИФ-14 в полевых условиях для регистрации индикатрисы рассеяния света воздухом составляла $\pm 15\%$. Время, необходимое для измерения одной индикатрисы, в среднем, составило 15÷20 мин, если снимались показания фотометра и 5 мин при использовании записывающего устройства.

В индикатрисометре “Рассвет” [12] счетный объем формируется в одном из фокусов эллиптического зеркального цилиндра, во втором фокусе располагается вращающееся зеркало, которое направляет на ФЭУ рассеянные на разные углы потоки излучения гелий-неонового лазера. Регистрируется индикатриса в диапазонах углов 10÷70°, 110÷170° за 10 секунд. Сигналы ФЭУ усиливаются логарифмическим усилителем и регистрируются самописцем.

Вращение фотоприемника использовалось в нефелометре, описанном в работе [13], предназначенном для измерения индикатрис в области углов 5÷175°. Источником излучения служит ртутная лампа ДРШ-250 со светофильтром на 546 нм. Аппаратная погрешность прибора не превышает 20%.

На пяти длинах волн работает прибор “Differential-II” [14], представляющий собой лазерный светорассеивающий фотометр для измерения индикатрис рассеяния от одиночных аэрозольных частиц. Предварительно заряженная частица вводится в рассеивающую камеру и удерживается в центре лазерного луча при помощи слабого потока воздуха и электростатического поля. Фотоприемник последовательно регистрирует рассеянный частицей на разные углы свет в пределах 0-180°, что позволяет определять размеры одиночных дисперсных частиц с точностью до 1%.

В гониометрической установке [15], предназначенной для измерения рассеянного светового поля в пределах полусферы, имеется неподвижная рамка. На неподвижной рамке располагается подвижная рамка с реверсивным двигателем, вал кото-

рого связан с выносной "Г-образной" стрелой, на которой с помощью штатива укреплен приемник излучения. Угол между осью вращения подвижной рамки и валом реверсивного двигателя равен 90° . В свою очередь, фотоприемник имеет возможность вращаться относительно "Г-образной" стрелы.

Для последовательной регистрации излучения в опорном канале, канале ослабления, каналах рассеянного излучения с частотой, задаваемой коммутатором каналов (до 1кГц), разработан прибор [16], конструктивно оформленный в виде размещенных в герметичных корпусах блока источник-приемник излучения объектива со световодом. Объектив имеет возможность вращаться относительно линии, проходящей через световой луч и перпендикулярной оси объектива. Световой поток от объектива с помощью гибкого световода передается на фотоприемник. При вращении объектива фотоприемник последовательно регистрирует индикатрису рассеяния жидких сред.

Существенным недостатком индикатрисометров с механическим сканированием одним фотоприемником по дуге или полусфере является большое время регистрации полной индикатрисы. Применение таких приборов в масштабе реального времени или для исследования изменяющихся во времени объектов невозможно.

Установка нескольких фотоприемников на нескольких углах рассеяния существенно уменьшает время регистрации информативной части индикатрисы рассеяния. Например, в передвижной установке [17] измеряются величины потоков излучения, рассеянные на углы 15, 45, 100, 140, 165° . Прибор содержит осветитель, поляризационный модулятор, электронный регистрирующий блок, системы измерения температуры и влажности воздуха. Счетный объем формируется на оси металлической цилиндрической кюветы диаметром 580 и высотой 300 мм с установленными в фиксированных углах, по окружности, пятью ФЭУ.

Осветитель формирует коллимированный пучок поляризованного света диаметром 30 мм, расходимостью менее $40'$ и промодулированный с частотой 350 Гц. В осветителе используется лампа ДРШ-250-2 на линии 546 нм. В счетный объем дисперсные частицы транспортируются с помощью воздушного потока. Фотоприемные блоки состоят из анализатора поляризации, объектива, диафрагмы, ФЭУ-79 и имеют угловое разрешение $1,5 \div 3^\circ$. Для устранения бликов напротив каждого фотоприемника расположены светоловушка. Калибровка при абсолютных измерениях осуществляется путем введения в счетный объем эталонного рассеивателя. Сигналы регистрируются синхронным детектором и вводятся на четыре самописца одновременно. Установка, вместе со вспомогательной аппаратурой, размещена в автофургоне в составе передвижной лаборатории.

В блок обработки поступают: сигнал, пропорциональный исходной интенсивности зондирующего луча, сигналы с поляризационного модулятора (компоненты поляризованного излучения). Коммутатор последовательно опрашивает (за $0,5 \div 3$ мин) оптические каналы. Блок обработки сигналов фотоприемников формирует одновременно четыре компоненты матрицы рассеяния оптического излучения: коэффициент непрерывного светорассеяния и три компоненты приведенной матрицы для пяти углов рассеяния.

В экспериментальной установке для регистрации полной индикатрисы [18] содержится источник лазерного излучения (ГОС-1001), объемная оптическая система сбора рассеянного лазерного излучения, электронный блок памяти для запоминания последовательности индикатрис. Основу системы сбора рассеянного излучения составляет кольцевой кронштейн, установленный соосно с газодисперсным потоком. На кронштейне расположены входные торцы 16 световодов с индивидуальной оптикой. Выходные торцы световодов установлены вплотную к линейке фотодиодов. Ре-

гистрация индикатрис осуществляется одновременно по всем углам. Вся регистрирующая аппаратура расположена в стальном боксе. При этом использование световодов позволяет отсеять мощные электромагнитные наводки на регистрирующую аппаратуру в момент генерации лазерного излучения.

Использование интегральных оптических методов при зондировании большого количества дисперсных частиц приводит к большим ошибкам при обработке экспериментальных данных. Неоднозначность решения обратной задачи в значительной мере уменьшается, если регистрировать полные индикатрисы рассеяния от одиночных частиц в возможно большем числе углов (повышение информативности одновременно получаемых от каждой частицы экспериментальных данных).

Для регистрации полной индикатрисы рассеяния за время нахождения дисперсной частицы в счетном объеме разработана установка, содержащая источник зондирующего излучения, объемную систему сбора рассеянного излучения, фотоприемник, светоловушку и электронный блок регистрации интенсивностей рассеянного на различные углы излучений [19]. Объемная система сбора рассеянного излучения выполнена в виде установленных соосно кольца из оптически прозрачного материала и кронштейна в форме винтовой линии. Винтовая линия кронштейна составляет один оборот. Кольцо из оптически прозрачного материала имеет радиальное сечение в форме тонкой линзы и два отверстия, расположенных на его диаметрально противоположных сторонах по направлению зондирующего излучения. Размеры отверстий превышают размеры поперечного сечения зондирующего излучения. Геометрическая ось кольца совпадает с входной плоскостью тонкой линзы, в каждом сечении цилиндрической линзы. На винтовом кронштейне радиально установлены равномерно распределенные по углам световоды, ориентированные по оптической оси тонкой линзы, каждого сечения цилиндрической линзы. Поэтому в зависимости от углового положения на кронштейне входные торцы световодов установлены под разными углами к геометрической оси объемной системы выделения рассеянного излучения. Входные торцы световодов установлены в плоскости изображений тонкой линзы, а выходные торцы объединены в один пучок на входе в ФЭУ. Сигналы ФЭУ регистрируются электронным блоком регистрации интенсивностей рассеянного на различные углы излучений. Счетный объем имеет форму, близкую к цилиндрической, ось симметрии которого совмещена с геометрической осью кольца из оптически прозрачного материала, а высота счетного объема ограничена длиной отрезка геометрической оси кронштейна, в пределах которого установлены входные торцы световодов, с учетом коэффициента увеличения изображения.

При измерениях дисперсная частица, направляемая с помощью воздушного потока, проходит вдоль геометрической оси объемной системы выделения рассеянного лазерного излучения под углом 90° к направлению распространения зондирующего излучения. Дисперсная частица, пролетая по счетному объему непрерывно рассеивает зондирующее излучение, из которого кольцо из оптически прозрачного материала выделяет "экваториальную" часть и проецирует ее в виде светящейся окружности с переменной интенсивностью, соответствующей полной индикатрисе рассеяния, на внешний кронштейн со сборкой световодов. Светящаяся окружность перемещается синхронно с дисперсной частицей. При продвижении дисперсной частицы вдоль счетного объема рассеянное излучение, сформированное в виде окружности, последовательно пересекает входные торцы световодов, установленных под разными углами по отношению к зондирующему излучению на винтовом кронштейне. На ФЭУ поочередно попадает рассеянное на различные углы излучение, по отношению к направлению зондирующего излучения. Часть зондирующего излучения, прошедшее

счетный объем не рассеиваясь, поглощается светоловушкой, что предотвращает вероятность попадания прошедшего через счетный объем излучения на ФЭУ, путем переотражений от стенок и элементов конструкции.

Устройство позволяет регистрировать полную индикатрису рассеяния с необходимым угловым разрешением в диапазоне углов не менее $2 \div 178^\circ$, $182 \div 358^\circ$ одним фотоприемником как временную последовательность электрического сигнала, получаемого при пролете одиночной частицы вдоль оптической оси кольца из оптически прозрачного материала.

Также для увеличения информативности в ряде случаев полную индикатрису рассеяния можно регистрировать на фотопленку. Фотографическая регистрация индикатрисы рассеяния на углы $3 \div 80^\circ$, $100 \div 177^\circ$ излучения гелий-неонового лазера мощностью 5 мВт на частицах полистирола диаметром 10,9 мкм проводилась в работе [20]. Почернение проявленной пленки измерялось с помощью денситометра. Полученные экспериментальные кривые хорошо согласуются с расчетами по теории Ми. Некоторое несовпадение экспериментальных индикатрис с расчетными данными обнаружено в значении величин в точках экстремума. Основным недостатком фотографической регистрации полной индикатрисы является трудоемкость и продолжительность времени, необходимого для определения функции распределения по размерам.

Недостатком абсолютного большинства приведенных в литературе нефелометров как последовательного, так и параллельного типа является большое время регистрации индикатрисы рассеяния. При безотборном определении гранулометрического состава КДФ плазмы горения ПТС это приводит к значительному искажению экспериментальных данных.

Для определения функции распределения по размерам частиц дисперсной фазы плазмы горения ПТС была разработана экспериментальная установка, содержащая: генератор плазмы, системы выделения и передачи потоков рассеянного излучения, источников зондирующего излучений, аппаратуры документирования значений интенсивностей, рассеянных на различные углы излучений [21]. Основным преимуществом разработанного стенда, по сравнению с описанными выше, является параллельная регистрация по 16 каналам оптических характеристик плазменных образований (ПО) с частотой $1 \div 25$ Гц, т.е. возможность равномерного во времени распределения оперативной памяти с момента возникновения до распада ПО. Могут быть зарегистрированы: спектр пропускания на 5-6 лазерных длинах волн, малоугловая и полная индикатриса рассеяния. Угловые положения фотоприемников для регистрации индикатрисы рассеяния могут принимать значения через 5° в интервале $5 \div 175^\circ$.

Для передачи потоков рассеянного излучения к фотоприемникам используются световоды, которые установлены в индивидуальных оправках и сгруппированы на кронштейнах, жестко закрепленных на рабочем столе. В оправке входного торца световода установлены серый и интерференционный фильтры, микролинза, диафрагма диаметром 0,5 мм. Выходные концы световодов укладывались в оптический разъем, который позволяет оперативно перегруппировывать информационные каналы по разным каналам фотодиодной линейки.

Регистрировали: рассеяние в диапазонах углов $0,5-2,5^\circ$; $5-175^\circ$; $177,5-180^\circ$, оптическую плотность плазмы на частотах Ar, He-Ne, Nd лазеров. Малоугловое рассеяние выделялось линзой ($F=1$ м). В передней фокальной плоскости находился счетный объем, в задней - линейка световодов. Полная индикатриса выделялась с помощью световодов, расположенных в кронштейне, имеющем форму дуги с радиусом 250 мм. Обратное рассеяние отделялось от падающего излучения светоделительной пластиной и при помощи линзы ($F=150$ мм) проецировалось на линейку све-

товодов. Для определения спектра пропускания излучения лазеров под небольшими углами пересекались в счетном объеме, проходили расстояние 3-4 м, фокусировались линзами ($F=50$ мм) на диафрагмы диаметром 1 мм, за которыми располагались световоды.

Все входные линейки световодов располагались в одной плоскости, а выходные концы световодов – в оптическом разъеме, в ответной части которого находились фотодиоды ФД-10ГА. Регистрация сигналов ФД, пропорциональных интенсивностям рассеянных излучений, осуществлялась с помощью блока многоканальной памяти. Запоминание данных происходило за время $15 \pm 2,5$ нс по 16 входам, последовательное оцифровывание следовало с частотой ≈ 4 кГц. Вся регистрирующая и документирующая аппаратура располагалась в металлическом боксе. Это позволило полностью избавиться от электромагнитных помех в момент генерации лазера ГОС-1001. Погрешность регистрации световых потоков по различным каналам не превышала 3,5%, а суммарная экспериментальная погрешность – 15-20%.

Экспериментально исследовались образцы ПТС, содержащие магний и алюминий до 50%, с добавками нитратов щелочных и щелочноземельных металлов. Начало регистрации данных синхронизовывалось с началом воспламенения ПТС (возникновение плазменного потока). Частота регистрации устанавливалась в зависимости от интенсивности горения (синхронно с лазером ИЛТИ-406). При регистрации 64 временных кадров блок оперативной памяти прекращал запись. Содержимое его памяти просматривалось на экране осциллографа в различных режимах. Информативные кадры выводились на диаграммную ленту самописца.

Экспериментально зарегистрированы малоугловая, полная индикатрисы, обратное рассеяние, спектр поглощения по различным сечениям оси вдоль потока плазмы горения ПТС. Спектры поглощения в диапазоне длин волн 0,46-1,06 мкм, имеют вид как спадающей, так и восходящей кривой с увеличением длины волны кривой в видимой области. Можно выделить три характерных типа полных индикатрис: “гантель” (минимум интенсивности при углах 110-140°), “груша” (рассеяние в заднюю полусферу) и “ромашка” - лепестки с перепадом интенсивностей до 10 раз при изменении угла на 10-20°, соответствующие разным рецептурам. Хотя горение каждого образца одной рецептуры имеет индивидуальный характер, флуктуации происходят относительно средних значений. Замечена корреляция оптической плотности с интенсивностью собственного свечения.

Экспериментальные данные регистрировалась на высоте 40, 65 см от поверхности образца ПТС в режиме установившегося горения. В табл. 2 приведены относительные интенсивности рассеянного на разные углы излучения длиной волны 1,06 мкм на плазме горения. Регистрация данных проводилась через 256 мкс.

Таблица 2

Индикатрисы рассеяния лазерного излучения на плазме горения ПТС

№ ПТС	5	10	35	45	55	75	85	95	105	125	140	160	175	180
1	1,2+4	230	9,2	9,5	0	3	2	3,8	19	3,5	2,8	21	550	2500
2	1,5+3	62	1,3	2,3	2,3	1,7	1,5	1,4	1,8	1,4	2,2	2,1	39	1700
3	1,7+3	53	2,7	1,8	1,6	2,5	2,7	1,9	2,7	1,7	1,6	2,9	71	3600

Для обработки экспериментальных данных использовались регуляризирующие алгоритмы. Путем проведения тестовых задач было установлено, что используемая программа для обработки экспериментальных данных на ЭВМ может уверенно восстанавливать положение мод двухмодального распределения и оценить соотношение их амплитуд. При обработке экспериментальных данных значение показателя преломления оптимизировалось в диапазоне 1,5-2, а показателя поглощения – 0,01-0,5.

Установлена закономерность изменения по высоте факела ширины распределения частиц КДФ по размерам. Для всех испытанных рецептур модальные размеры находились в интервалах 0,1-0,8 и 5-20 мкм. В средней части факела горения ПТС, где происходят наиболее интенсивные химические реакции, диапазон наблюдаемых значений модальных размеров увеличивается, по сравнению с начальным, в 4-10 раз. Изменение общей ширины распределения, т.е. сближения или удаления мод при увеличении высоты зондирования от поверхности ПТС зависит от его исходного состава.

Литература

1. *Ван де Хюлст Г.* Рассеяние света малыми частицами. – М.: ИЛ, 1961.
2. *Шифрин К. С.* Вычисление некоторого класса интегралов, содержащих квадрат бесселевой функции первого рода. // Труды ВЗЛТИ. 1956. Вып.2. С.108-121.
3. *Шифрин К.С., Шифрин Я.С., Микулинский И.А.* Рассеяние света ансамблем больших частиц произвольной формы // ДАН. 1984. Т.277. С.582-585.
4. *Ощепков С.И.* Использование малоуглового светорассеяния в фотоседиментационном анализе дисперсных сред. // ЖТФ. 1989. Т. 59. Вып.7. С.193-195.
5. *Соколов Р.Н.* Измерение спектра размеров частиц взвесей по рассеянию вперед лазерного излучения: Авт. дис. на соиск. уч. ст. к.т.н. – М.: 1971.
6. *Кондратьев А. Б., Нефедов А.П., Петров О.Ф., Самарян А.А.* Оптическая диагностика конверсии угольных частиц в потоке плазмы продуктов сгорания // ТВТ. 1994. Т.32. №3. С.452-458.
7. *Вичасина М.Ф., Орлов Р.Ю.* Оптический гранулометр для фракций частиц 2-100 мкм. // Заводская лаборатория. 1988. №9. С.72-74.
8. *Петров Г.Д., Соколов Р.Н., Васильев В.А., Капков А.М.* Измерение распределения по размерам взвешанных в потоке частиц методом малых углов // Инженерно-физический журнал. 1969. Т. 26. № 3. С.438-442.
9. *Мышкин В.Ф., Цимбал В.Н., Тихомиров И.А., Иваненко Б.П.* Способ регистрации малоугловой индикатрисы Положительное решение от 28.01.02 по заявке №2000132585. Приоритет от 25.12.00.
10. *Бартенева О.Д., Довгялло Е.Н., Полякова Е.А.* Экспериментальные исследования оптических свойств приземного слоя атмосферы // Труды ГГО. Вып. 220 – Л.: Гидрометеиздат, 1967.
11. *Никифорова К., Павлова Л.И., Сныков В.П.* Скоростной измеритель индикатрис “Рассвет” // Тезисы докладов IV Всесоюзном симпозиуме по распространению лазерного излучения. – Томск: 1977. С.83-86.
12. *Веретенников В.В., Кауль Б.В., Краснов О.А., Панченко М.В., Тулонов А.Г.* Лазерно-нефелометрические исследования микроструктуры аэрозольных сред // Изв. АН СССР. ФАиО. Т. 19. №10. С.1027-1034.
13. *Беляев С.П., Никифорова Н.К., Смирнов В.В. и др.* Оптико-электронные методы изучения аэрозолей. – М.: Энергоиздат, 1981. 232с.
14. *Либерман А.А., Рапопорт Е.С.* Гониофотометрическая установка для измерения пространственных индикатрис рассеяния лазерного излучения // Измерительная техника. 1988. №1. С.15-16.
15. *Тихомиров И.А., Мышкин В.Ф., Новиков О.Г., Борисов В.Д.* Аппаратура и методы для получения индикатрис рассеяния лазерного излучения на аэродисперсных системах // Сб.Тез.докл. III Всесоюзн. совещ. по физике низкотемпературной плазмы с конденсированной дисперсной фазой. – Одесса: 1988. С.115-116.
16. *Сидоров В.Н.* Проточный поляризационный нефелометр // Изв. АН СССР. Серия “Физика атмосферы и океана”. 1979. Т.15. №7. С.763-767.
17. *Мышкин В.Ф., Тихомиров И.А., Цимбал В.Н., Власов В.А.* Стенд для изучения динамики гранулометрического состава запыленной плазмы // ПТЭ. 1998. №2. С.168-169.
18. *Мышкин В.Ф., Тихомиров И.А., Власов В.А., Цимбал В.Н.* Устройство для регистрации полной индикатрисы рассеяния. Св. на ПМ №12251. БИИПМ №12 от 16.12.99.
19. *Брунстинг А., Маллени Р.Е.* Фотометр с фотографической регистрацией для измерения рассеяния света // ПдНИ. 1972. № 6. С.115-121.
20. *Тихомиров И.А., Цимбал В.Н., Мышкин В.Ф., Хан В.А., Кемельбеков Б.Ж.* Разработка экспериментального стенда для диагностики конденсированной дисперсной фазы низкотемпературной плазмы. Препринт №12-97 – М.: изд. НТЛ.