

## РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И АППАРАТУРЫ ДИАГНОСТИКИ ДИСПЕРСНОСТИ КОНДЕНСИРОВАННОЙ ФАЗЫ ПЛАЗМЫ ГОРЕНИЯ

И.А. Тихомиров, В.А. Власов, В.Ф. Мышкин

Томский политехнический университет  
634034, г.Томск, пр.Ленина, 30. list@mil.tpu.ru

Низкотемпературная плазма, имеющая широкое распространение в технике и технологии, отличается широким диапазоном изменения давлений, температур, скоростей, может быть гетерогенной, химически активной. Оптические методы диагностики являются перспективными для определения содержания компонентов и структуры плазменных потоков без отбора пробы и в режиме реального времени.

Для безотборной диагностики гранулометрического состава конденсированной дисперсной фазы (КДФ) гетерогенной плазмы пригодны интегральные лазерные методы. Интегральные лазерные методы разделяют на методы: малоуглового рассеяния (ММУ), полной индикатрисы (МПИ), обратного рассеяния, спектральной прозрачности (МСП). Для диапазона размеров частиц  $0,05 \div 1,0$  мкм приемлем МСП, для частиц КДФ, сравнимых с длиной волны зондирования – МПИ, для крупных частиц – ММУ. Дисперсность КДФ определяют из решения интегрального уравнения первого рода для экспериментальных данных с использованием регуляризирующих алгоритмов [1].

Метод измерения малоугловой индикатрисы для определения гранулометрического состава дисперсных частиц в движущихся потоках был предложен К.С. Шифриным [2]. Метод основан на исследовании рассеянного вперед зондирующего излучения. Технически малоугловые измерения светорассеяния могут быть проведены по схемам: ”призмы полного внутреннего отражения” и ”длиннофокусной линзы”. В схеме с призмой полного внутреннего отражения прошедшее без взаимодействия через газодисперсную среду излучение призмой возвращается назад. Пучки рассеянных в малые углы лучей преломляются призмой. Лучи, рассеянные в малые углы после преломления призмой распространяются под большими углами, чем первоначально.

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 фотоприемник. Угловое разрешение определяется размером фокального пятна объектива и обычно составляет 10 угловых минут. При регистрации рассеянного на дисперсных частицах излучения в диапазоне углов  $0^\circ \div 5^\circ$  световой поток в фокальной плоскости собирающего объектива может убывать до 10 раз на каждый градус угла [3]. Описанное устройство позволяло определять размеры частиц в диапазоне  $1 \div 50$  мкм при их концентрации  $50 \div 800$  см<sup>-3</sup>. Расхождение с микрофотографическими данными не превышало  $5 \div 10\%$ .

В нефелометрах малоуглового рассеяния 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  $I(\theta)$  [4]. Это упрощает обработку рассеянных сигналов, сужает необходимый динамический диапазон фотоприемника. Функциональное преобразование малоугловой индикатрисы может быть осуществлено с помощью набора апертурных диафрагм [5], клиновидной диафрагмы [6]. При использовании клиновидной диафрагмы регистрируется величина  $I(\theta)\theta^2$ , что обеспечивает линейный режим работы фотоприемника в углах рассеяния  $0,001-0,2$  рад при помощи объектива с фокусным расстоянием 50 см (информативный диапазон углов для частиц размером 2-100 мкм).

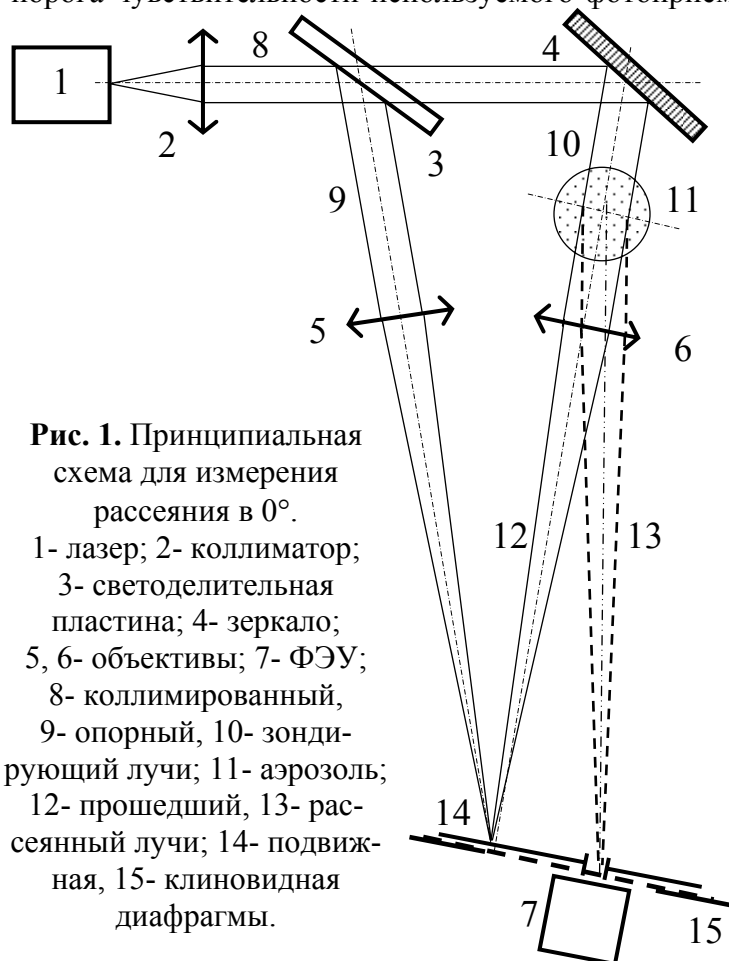
Поперечное перемещение относительно оптической оси лазера, ФЭУ с точечной диафрагмой использовано в работе [7]. Измеряется малоугловая индикатриса в диапазоне

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  $0^\circ$ .

Для измерения интенсивности малоуглового рассеяния, включая направление угла  $0^\circ$ , нами разработан и испытан способ определения малоугловой индикатрисы рассеяния [8]. Для этого формируется 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 формируемой при этом 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



**Рис. 1.** Принципиальная схема для измерения рассеяния в  $0^\circ$ .

- 1- лазер; 2- коллиматор;
- 3- светоделительная пластина; 4- зеркало;
- 5, 6- объективы; 7- ФЭУ;
- 8- коллимированный,
- 9- опорный, 10- зондирующий лучи;
- 11- аэрозоль;
- 12- прошедший, 13- рассеянный лучи;
- 14- подвижная, 15- клиновидная диафрагмы.

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  $0^\circ$ ).

В экспериментальной установке (см. рис. 1) 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 диаметрами  $25 \div 30$  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  $6^\circ$  к направлению зондирующего пучка. Фокальные пятна опорного пучка и зондирующего пучка, прошедшего рассеивающую среду, оптического излучений 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  $[0^\circ, 5,7^\circ]$ , составляло  $\approx 6,7 \times 10^{-4}$  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  $0^\circ$ .

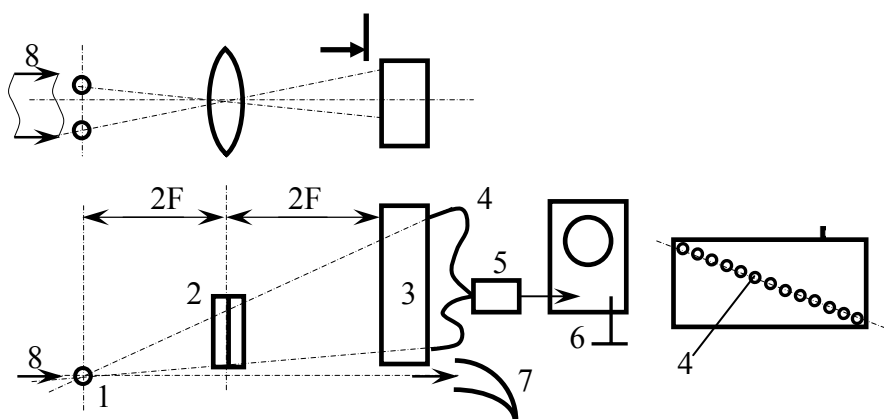
Таблица 1.

Малоугловая индикатриса рассеяния

$\theta^\circ$	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

Таблица 1. Продолжение.

$\theta^\circ$	1,6	1,9	2,3	2,7	3,1	3,7	4,3	4,9	5,6
I, отн.ед.	0,0043	$1,4 \times 10^{-4}$	0,0013	$5,7 \times 10^{-4}$	$4,4 \times 10^{-5}$	$3,3 \times 10^{-5}$	$2,6 \times 10^{-5}$	$2,2 \times 10^{-5}$	$3,5 \times 10^{-5}$



**Рис. 2.** Схема установки для регистрации малоугловой индикатрисы рассеяния. 1- дисперсная частица, 2- цилиндрическая линза, 3- линейка световодов, 4- световоды, 5- ФЭУ, 6- осциллограф, 7- светоловушка, 8- лазерный луч.

Для регистрации малоугловой индикатрисы рассеяния лазерного излучения от одиночных дисперсных частиц нами, разработана установка, содержащая источник зондирующего излучения, систему сбора рассеянного излучения, ФЭУ, светоловушка и электронный блок регистрации (см. рис. 2) [9, 10].

Для выделения потоков излучения, рассеянных в диапазоне малых углов используется цилиндрическая линза из оптического стекла К8, которое проецирует изображение счетного объема на кронштейне. На кронштейне установлены, равномерно по диагонали, входные торцы световодов, оптические оси которых совпадают с оптической осью цилиндрической линзы

по каждому направлению рассеяния (а световоды установлены под разными углами к плоскости рассеяния). Выходные концы всех световодов собраны в один пучок на входе в ФЭУ. Расстояние между осью счетного объема и цилиндрической линзой, фокусное расстояние этой линзы и расстояние от линзы до входных торцов световодов связаны соотношением тонкой линзы. Световоды помещены в светонепроницаемый кожух. Параллельно световоду, расположенному в направлении угла рассеяния  $5^\circ$ , установлен дополнительный световод. Это позволяет выделять частицы, траектория которых совпадает с осью счетного объема.

В основе работы устройства лежит принцип последовательной регистрации одним ФЭУ малоугловой индикатрисы рассеяния, при прохождении дисперсной частицей счетного объема. Каждой точке по высоте счетного объема ставится в соответствие угол, в котором производится отбор части потока рассеянного зондирующего излучения для регистрации.

Одиночная дисперсная частица проходит по счетному объему системы выделения рассеянного лазерного излучения под углом  $90^\circ$  к направлению зондирующего излучения. Цилиндрическая линза выделяет часть из потока рассеянного вперед излучения и проецирует ее в виде линии с переменной интенсивностью, соответствующей индикатрисе рассеяния, на кронштейне со сборкой многожильных световодов. При продвижении дисперсной частицы вдоль счетного объема ее изображение последовательно пересекает вход одного из световодов. Прошедшее через счетный объем зондирующее излучение поглощается светоловушка. Время регистрации одной индикатрисы определяется скоростью дисперсной частицы.

Были использованы: аргонный лазер ЛГН-506; ФЭУ-114; цилиндрическая линза, размерами  $25 \times 30$  мм с фокусным расстоянием 32 мм; световоды длиной 0,4 м ( $\varnothing_{\text{св}} = 2$  мм). Калибровка устройства проводилась с помощью частиц латекса в воздушном потоке. Устройство использовалось для счета пылинок, взвешанных в воздухе. Технические характеристики: диапазон углов измерения:  $2^\circ \div 24^\circ$ , угловое разрешение: не менее  $1,5^\circ$ , диапазон измеряемых диаметров:  $1,5 \div 30$  мкм, максимальная концентрация измеряемых частиц:  $100 \text{ см}^{-3}$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов В.К., Васин В.В., Танана В.П. Теория линейных некорректных задач и ее приложения. М.: Наука, 1978. 208с.
2. Шифрин К. С. Вычисление некоторого класса интегралов, содержащих квадрат бесселевой функции первого рода. // Труды ВЗЛТИ. 1956. Вып.2. С.108-121.
3. Ощепков С.Л. // ЖТФ. 1989. Т. 59. Вып.7. С.193-195.
4. Соколов Р.Н. Измерение спектра размеров частиц взвесей по рассеянию вперед лазерного излучения: Авт.дис.на соиск.уч.ст.к.т.н.,- М. 1971.
5. Кондратьев А. Б., Нефедов А.П., Петров О.Ф., и др.//ТВТ. 1994.Т.32. №3. С.452-458.
6. Вичасина М.Ф., Орлов Р.Ю. // Заводская лаборатория. 1988. №9. С.72-74.
7. Петров Г.Д., Соколов Р.Н., Васильев В.А. и др. // Инженерно-физический журнал. 1969. Т.26. №3. С.438-442.
8. Мышкин В.Ф., Цимбал В.Н., Тихомиров И.А. и др. Способ регистрации малоугловой индикатрисы Положительное решение от 28.01.02 по заявке №2000132585. Приоритет от 25.12.00.
9. 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.
10. Тихомиров И.А., Мышкин В.Ф., Цимбал В.Н., Коровин О.М. //ПТЭ. 2001. №3. С.166-167.