

## АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ДИСПЕРСНОЙ ФАЗЫ ПЛАЗМЫ

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

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

Параметры конденсированной дисперсной фазы (КДФ) важно знать для составления энергетического баланса плазмы, анализа протекающих в ней физико-химических процессов при конструировании технологического оборудования или планировании процесса в высокотемпературных условиях. Методы диагностики КДФ с отбором проб из плазмы имеют значительную погрешность, из-за высокой температуры и химических превращений, не позволяют получить временную динамику параметров КДФ. Оптические методы диагностики позволяют проводить дистанционный анализ с высоким временным разрешением по различным сечениям потока в заданные моменты времени. В зависимости от диапазона углов регистрации рассеянного излучения используют методы: малоуглового рассеяния (ММУ), полной индикатрисы (МПИ), обратного рассеяния.

Основные вопросы взаимодействия оптического излучения с аэрозолями и закономерности углового распределения интенсивности рассеянного света на малых частицах впервые рассмотрены в работе [1]. Частицы, размеры которых сравнимы с длиной волны зондирования, обладает 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 углах рассеяния менее  $5^\circ$ . Обработка экспериментальных данных лазерного зондирования сводится к решению на ЭВМ численными методами уравнения Фредгольма первого рода.

Можно выделить два основных способа регистрации полной индикатрисы: сканирование одним фотоприемником в заданном диапазоне углов (или источником зондирующего излучения), одновременная регистрация на нескольких фиксированных направлениях или диапазонах углов. Используют как лазерное, так и некогерентное излучение. Рассмотрим некоторые схемы регистрации полной индикатрисы. Для регистрации индикатрисы в полевых условиях был использован нефелометр ИФ-14 [2]. Использование фотометрического клина и набора калиброванных ослабителей позволяет использовать фотоприемник с динамическим диапазоном не менее 100. Точность замеров нефелометром индикатрисы рассеяния в угловом диапазоне  $16\div 164^\circ$  в полевых условиях не превышает  $\pm 15\%$ . Время, необходимое для измерения одной индикатрисы составило  $15\div 20$  мин при использовании фотометра и 5 минут - записывающего устройства.

В индикатрисометре "Рассвет" [3] счетный объем совмещают с одним из фокусов эллиптического зеркального цилиндра, во втором - располагают вращающееся зеркало, которое направляет последовательно на ФЭУ рассеянные на разные углы потоки излучений He-Ne лазера. Регистрируется интенсивность рассеянного излучения в диапазонах углов  $10\div 70^\circ$ ,  $110\div 170^\circ$  за 10 с. Сигналы ФЭУ усиливаются логарифмическим усилителем и выводятся на самописец.

Вращение фотоприемника использовалось в нефелометрах с некогерентными источниками излучения, предназначенными для измерения индикатрис в области углов  $0\div 180^\circ$  [4, 5]. Общим недостатком индикатрисометров с механическим сканированием фотоприемником (или излучателем) является большая продолжительность проведения замеров. Применение таких приборов в масштабе реального времени или для исследования изменяющихся во времени процессов или объектов невозможно. При установке нескольких фотоприемников на дискретных углах существенно уменьшается время регистрации информативной части индикатрисы рассеяния [6].

Недостатком большинства известных нефелометров как последовательного, так и параллельного типа является большое время регистрации индикатрисы рассеяния. При

использовании этих приборов для определения гранулометрического состава КДФ плазмы горения ПТС регистрируемые индикатрисы рассеяния могут быть значительно искажены и позволяют получать информацию об усредненных во времени параметрах КДФ.

В работе [7] описана, выполненная в стандарте КАМАК, одноканальная система сбора данных (ССД) с частотой опроса 40 МГц. Емкость собственной памяти ССД составляет 64 пары синфазных пятиразрядных отсчетов. В основном режиме экспериментальные данные передаются в ЭВМ. При необходимости вспомогательный ЦАП выводит на экран осциллографа сигнал, записанный в запоминающее устройство.

Многоканальная ССД, приведенная в работе [8], содержит мультиплексор, два аналоговых запоминающих устройства, двухполюсный ключ, буферный усилитель, АЦП, работа которых синхронизируется блоком управления. Входные параллельно следующие сигналы поочередно подключаются к одному из аналоговых запоминающих устройств (режим выборки). Второе аналоговое запоминающее устройства в это время через двухполюсный ключ, буферный усилитель подключен к АЦП. По окончании цикла преобразования аналоговые запоминающие устройства меняют режимы работы. ССД позволяет регистрировать данные с частотой 125 кГц по 16 параллельным каналам.

В работе [9] приводится принципиальная схема модуля с АЦП и оперативной памятью. ССД поочередно опрашивает (время на 1 канал 30 мкс) до 16 каналов.

Заряд 16 конденсаторов от параллельных входных каналов и их последовательный опрос за время 50 мкс на один канал осуществляет аналоговая ССД, описанная в работе [10]. Величины напряжений конденсаторов непрерывно выводятся на осциллограф.

Для определения временной динамики дисперсности КДФ плазмы горения ПТС, в широком интервале размеров, нами был разработан экспериментальный стенд, содержащий: генератор плазмы, оптическую системы выделения потоков рассеянного излучения, лазеры, блок электронной памяти [11]. Экспериментально регистрировали: индикатрисы рассеяния в диапазонах углов  $0,5-2,5^\circ$ ;  $5-175^\circ$ ;  $177,5-180^\circ$  за время генерации лазера ГОС-1001. Также регистрировали оптическую плотность плазмы на длине волны  $0,6328$  мкм за все время горения ПТС.

Оптическая система выделения рассеянных излучений содержала группы многожильных световодов, закрепленных на рабочем столе в одной плоскости. Основу системы сбора рассеянного излучения составляет кольцевой кронштейн, установленный соосно с газодисперсным потоком. На кронштейне, имеющем резьбовые отверстия через  $5^\circ$  в диапазоне углов  $5-175^\circ$ , расположены 16 световодов. Входные торцы световодов расположены на расстоянии 250 мм от оси потока плазмы. В индивидуальной оправке каждого световода установлены калиброванный ослабитель и интерференционный фильтр, микролинза, диафрагма диаметром 0,5 мм. Для выделения малоугловой индикатрисы использовалась линзовая схема. В передней фокальной плоскости линзы ( $F=1$  м) помещался счетный объем, в задней - линейка световодов. Обратное рассеяние отделялось от зондирующего луча светоделительной пластиной и фокусировалось линзой ( $F=150$  мм) на линейку световодов. На линейки для выделения малоуглового и обратного рассеяния устанавливали серые и полосовые фильтры.

В экспериментальной установке многожильные световоды, имевшие прозрачную полиэтиленовую защитную оболочку, помещены в индивидуальный светонепроницаемый кожух. Выходные торцы световодов установлены вплотную к линейке фотодиодов ФД-10ГА, расположенных в оптическом разьеме непосредственно в корпусе регистрирующей аппаратуры. Оптический разъем позволяет перегруппировывать информационные световоды по разным каналам фотодиодной линейки (например, изменить угловые положения или их последовательность при регистрации полной индикатрисы рассеяния). Вся электронная регистрирующая и документирующая аппаратура расположены в стальном боксе. Используемые световоды позволяют отсечь электромагнитные наводки на регистрирующую аппаратуру в момент генерации излучения лазером ГОС-1001.

Для регистрации данных разработано многоканальное запоминающее устройство [12]. В этом устройстве блок фотоприемников преобразовывает входные потоки оптического излучения в электрические напряжения, которые усиливаются блоком усилителей. Аналоговые ключи открываются на время  $15 \pm 2,5$  нс, при этом происходит одновременная зарядка 16 электрических конденсаторов с малыми токами утечки. Затем заряды конденсаторов, пропорциональные величинам потоков оптического излучения, считываются по очереди, масштабируются, преобразовываются в двенадцатиразрядный двоичный код и записываются в ОЗУ в цифровом виде. Полное время преобразования аналоговых сигналов по 16 каналам в цифровой код и их запись в ОЗУ происходит за время 256 мкс. Погрешность регистрации световых потоков по различным каналам не превышала 3%. Содержимое ОЗУ может быть распечатано, а блок цифро-аналогового преобразователя позволяет выводить на экран универсального осциллографа информацию из памяти в виде отдельного временного кадра или их непрерывной последовательности.

Калибровка лазерного стенда заключается в переходе на режим оперативного просмотра на мониторе состояния информационных каналов, установлении в счетный объем изотропного источника излучения и компенсации различных значений дополнительного ослабления излучения в световодах путем подстройки коэффициентов усиления входных электронных усилителей. Калибровку стенда необходимо производить после изменения пространственного положения хотя бы одного из информационных световодов. Нулевые уровни выставляются при отсутствии входных оптических сигналов.

Экспериментально исследовались ПТС, содержащие до 50% смеси магния и алюминия. Начало регистрации экспериментальных данных осуществлялось с заданной задержкой от момента воспламенения ПТС. Процесс горения образца ПТС выходит на установившийся режим за время менее 0,1 с (см. рис. 1). Установлено, что зависимость

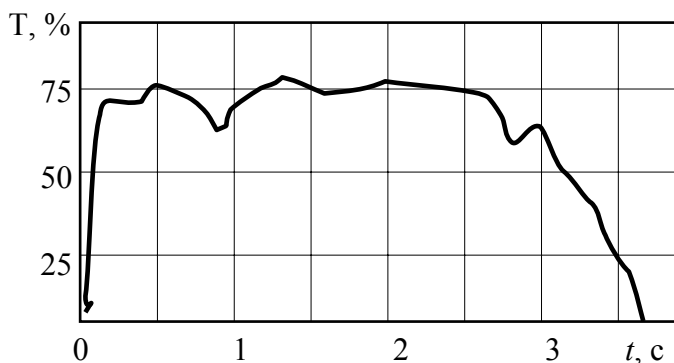


Рис. 2. Типичный вид осциллограммы временного хода коэффициента пропускания.

интенсивности и характера горения ПТС от времени определяется содержанием различных добавок.

В ходе экспериментов зарегистрированы малоугловая, полная индикатрисы, обратное рассеяние на плазме горения ПТС. Рассеянное излучение выделялось на различных расстояниях вдоль потока горения (от поверхности образца ПТС) в установившемся режиме. По форме можно выделить три характерных типа полных индикатрис: “гантель”

(наблюдается минимум интенсивности при углах  $110-140^\circ$ ), “груша” (преимущественное рассеяние в заднюю полусферу) и “ромашка” – содержащая лепестки с перепадом интенсивностей до 10 раз при изменении угла на  $10-20^\circ$ , соответствующие разным рецептурам. В таб. 1 приведены относительные интенсивности излучения  $1,06$  мкм, рассеянных в направлении разных углов на плазме горения ПТС.

Таблица 1.

Полные индикатрисы рассеяния излучения  $1,06$  мкм на плазме горения ПТС

№	$5^\circ$	$10^\circ$	$35^\circ$	$45^\circ$	$55^\circ$	$75^\circ$	$85^\circ$	$95^\circ$	$105^\circ$	$125^\circ$	$140^\circ$	$160^\circ$	$175^\circ$	$180^\circ$
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

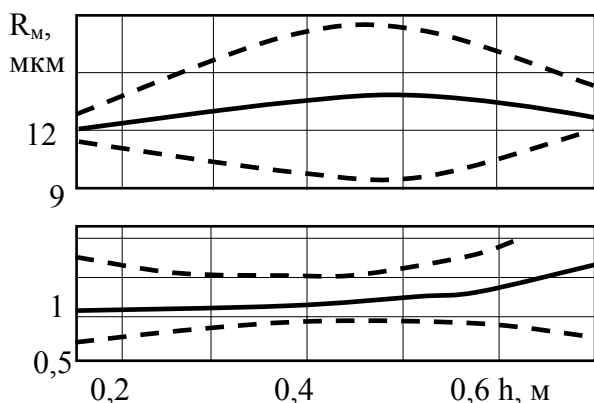
Полные индикатрисы рассеяния, приведенные в таб. 1, соответствуют временным интервалам, отличающимся на 256 мкс для одного образца. Видно, что за это время может происходить изменение особенностей полной индикатрисы. Хотя горение каждого

образца одной рецептуры имеет индивидуальный характер, флуктуации интенсивности рассеянного в фиксированном направлении излучения происходят относительно их среднего значения. Замечена корреляция оптической плотности потока плазмы с интенсивностью собственного свечения плазменного потока.

Анализ воздействия случайных факторов показал, что суммарная экспериментальная погрешность не превышает 15-20%. Для обработки усредненных по 10-15 образцам ПТС экспериментальных данных использовались регуляризирующие алгоритмы решения интегрального уравнения. Оптимизация значения показателя преломления осуществлялась в диапазоне  $1,5 \div 2$ , а показателя поглощения -  $0,01 \div 0,5$ .

На рис. 2 приведены графики изменения значений модальных размеров мелкой и крупной фракций вдоль потока плазмы горения ПТС. Пунктирной кривой показаны границы флуктуации значения моды. Из анализа приведенных графиков можно сделать следующие выводы для всех испытанных ПТС:

- модальные размеры частиц КДФ находятся в интервалах 0,8-2,0 и 10-20 мкм.
- Вдоль оси потока происходит изменение модальных размеров обеих мод.
- Диапазон флуктуации модальных размеров уменьшается для мелкой фракции и увеличивается для крупной фракции в средней (по высоте) части факела.



**Рис. 2.** Положения модальных размеров аэрозоля по высоте факела

- В средней части потока плазмы, где происходят наиболее интенсивные химические реакции, диапазон наблюдаемых значений модальных размеров увеличивается, по сравнению с начальным, в 4-10 раз.

- Изменение общей ширины распределения частиц КДФ по размерам, 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.: Изд. иностр. лит. 1961.
2. Бартенева О.Д., Довгялло Е.Н., Полякова Е.А. *Экспериментальные исследования оптических свойств приземного слоя атмосферы* // Труды ГГО. Вып. 220, Л.: Гидрометеиздат. 1967.
3. Никифорова К., Павлова Л.И., Сныков В.П. *Скоростной измеритель индикатрис "Рассвет"* // Тез. докл. IV Всесоюзном симпозиуме по распространению лазерного излучения. Томск: 1977. С.83-86.
4. Веретенников В.В., Кауль Б.В., Краснов О.А. и др. // *Изв. АН СССР. Серия "ФизО"*. 1984. Т.19. №10. С.1027-1034.
5. Беляев С.П., Никифорова Н.К., Смирнов В. В. и др. *Опико-электронные методы изучения аэрозолей*. М.: Энергоиздат. 1981. 232с.
6. Сидоров В.Н. // *Изв. АН СССР. Серия "ФизО"*. 1979. Т.15. №7. С.763-767.
7. Касперович А.Н., Мантуш О.М., Шалагинов Ю.В. // *ПТЭ*. 1977. №7. С.86-88.
8. Басалаев Г.В., Гламба В.И. *ПТЭ*. 1984. №2. С.50-52.
9. Жучков А.А., Мягих А.И. *ПТЭ*. 1989. №1. С.96-97.
10. Быковский Ю.А., Грузинов А.Е., Лагода В.Б. *ПТЭ*. 1989. №3. С.195-196.
11. Мышкин В.Ф., Тихомиров И.А., Цимбал В.Н., Власов В.А. // *ПТЭ*. 1998. №2. С.168-169.
12. Тихомиров И.А., Мышкин В.Ф., Цимбал В.Н. и др. *Разработка экспериментального стенда для диагностики конденсированной дисперсной фазы низкотемпературной плазмы*. Препринт №12-97. М.: Изд. НТЛ. 1997. 20с.