

**Б.Д. Борисов**

## **О ФУНКЦИИ РАЗМЫТИЯ ТОЧКИ ПАССИВНОЙ СИСТЕМЫ ВИДЕНИЯ В ДЫМОВОМ АЭРОЗОЛЕ**

Рассматриваются методика и результаты эксперимента по измерению функции размытия точки пассивной системы видения при наблюдении через дымовой аэрозоль, создаваемый в ограниченном пространстве большого объема, для оптических толщин  $\tau = 0,16 \div 2,94$ . Приводится качественное сравнение с ФРТ систем видения при наблюдениях через зимние атмосферные дымки и древесный дым.

В литературных источниках можно найти лишь ограниченные сведения об экспериментальных результатах по переносу изображения в рассеивающей атмосфере и связи характеристик изображения с параметрами микроструктуры аэрозолей [1]. Это связано прежде всего с тем, что проведение таких экспериментов в реальной атмосфере, например измерение фундаментальной характеристики пассивных систем видения – функции размытия точки (ФРТ), сопряжено с определенными методическими сложностями и значительными материальными затратами.

Ввиду этого измерения ФРТ целесообразно проводить в средах, моделирующих наиболее характерные состояния аэрозольной атмосферы. Одним из таких часто встречающихся состояний замутненной атмосферы, охватывающих большинство географических районов, является дымка [2, 3].

Сопоставление оптических характеристик атмосферных дымок с соответствующими оптическими характеристиками дымовых аэрозолей показало, что основные формы индикатрисы рассеяния и степени поляризации, а также пределы изменчивости дымов в видимой области спектра имеют значительное сходство с атмосферными дымками [3]. Исследование переноса изображения в дымах имеет и самостоятельное значение, в частности для усовершенствования систем наблюдения в дымах при тушении пожаров и в других подобных часто встречающихся экстремальных ситуациях. В последнее десятилетие заметно возрос интерес к изучению дымового аэрозоля в связи с возможным его воздействием на экологическую обстановку и изменение климата [4–7].

Основными характеристиками изменчивости дымов являются степень задымления воздуха на стадии дымообразования, температура термического разложения материалов, относительная влажность воздуха и «старение» дымового аэрозоля во времени. При отсутствии постоянно действующего источника поступления новых частиц дыма основные изменения коэффициента ослабления  $\epsilon$  происходят в течение первых двух часов после его образования [4–6].

В выстоявшихся древесных дымах ограниченных объемов распределение частиц по размерам приближается к одномодальному с медианным радиусом, стягивающимся к  $0,1 \div 0,3$  мкм [3, 4].

Таким образом, имеющиеся сведения дают возможность составить достаточно полную картину о свойствах древесного дымового аэрозоля, что позволило не проводить дополнительных исследований при измерениях и анализе ФРТ, результаты которых представлены в настоящем сообщении.

В линейных системах видения, состоящих из изображающей оптической системы, рассеивающей среды и предметной плоскости, смысл функции размытия точки  $h(x - \xi, y - \eta)$  ясен из соотношения (1):

$$g(x, y) = \iint_{-\infty}^{+\infty} h(x - \xi, y - \eta) o(\xi, \eta) d\xi d\eta, \quad (1)$$

где  $g(x, y)$  и  $o(\xi, \eta)$  – распределения освещенности в изображении и яркости на объекте соответственно;  $(x, y)$  и  $(\xi, \eta)$  – координаты точек изображения и объекта. Из (1) следует, что  $h(\xi, \eta)$  характеризует вклад в освещенность, наблюдаемую, например, в точке  $x = 0, y = 0$  от точек объекта через каналы рассеяния, удаленных от точки объекта на оси системы видения с круговой симметрией на расстояние  $0 < r = \sqrt{\xi^2 + \eta^2} < \infty$ . Из соотношения (1) вытекает строгий прямой метод нахождения ФРТ в отличие от приближенного, заключающегося в определении распределения освещенности в изображении элементарного ламбертовского источника, зафиксированного в предметной плоскости [8].

Эксперименты проводились в большой аэрозольной камере (БАК) ИОА СО РАН объемом  $V = 1780 \text{ м}^3$ , позволяющей моделировать в ней различные аэрозольно-газовые образования (туманы адиабатического расширения, парения и распыления, смоговые образования типа дымовых и пр.).

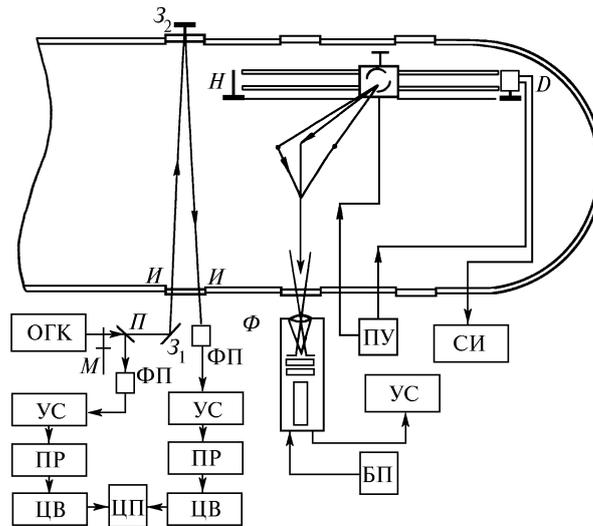


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки

При измерениях ФРТ использовалась прямая методика или методика пространственного сканирования. Модель точечного источника  $T$  имитировала галогенная лампа КГМ-300, которая была смонтирована на специальной тележке с цилиндрическим модулятором светового потока (рис. 1), с частотой модуляции 150 Гц. Источник вместе с модулятором передвигался по направляющим  $H$ , установленным внутри БАК, при помощи электродвигателя  $D$  с переключаемым безлюфтовым редуктором посредством системы стальных тросиков. Для контроля положения источника в пространстве (т.е. определения его координаты) на оси электродвигателя устанавливался диск с прорезями, который прерывал световой поток от лампочки, находящейся за диском, и создавал импульсный световой поток на фотодиоде, установленном по другую сторону диска. При включении двигателя и перемещении источника излучения импульсный сигнал с фотодиода поступал на частотомер СИ типа ЧЗ-57, работающий в режиме счета импульсов. Цена деления пространственной координаты  $r$  в плоскости объекта при смещении источника на 10 мм соответствовала 436 импульсам на счетчике, что позволяло с достаточной точностью определять  $r$ . При помощи пульта дистанционного управления ПУ источник мог устанавливаться и фиксироваться в любом положении на направляющей. Расстояние между приемным объективом и источником, при положении последнего на оптической оси приемной системы, составляло  $L = 8,5 \text{ м}$  ( $L = r/\text{tg}\alpha$ , где  $\alpha$  угол между оптической осью и направлением на источник).

Измерительный фотометр и весь комплекс приемно-измерительной аппаратуры располагался вне камеры. Регистрация светового потока проводилась через иллюминатор камеры, снабженный оперативной системой открывания.

Фотометр  $\Phi$  включал в себя стандартный набор оптико-механических устройств, необходимых для проведения такого рода измерений, и состоял из объектива И-37 с фокусным рас-

стоянием 300 мм, диафрагмы поля зрения, составленной из скрещенных регулируемых щелей УФ-1, интерференционного фильтра с максимумом пропускания на  $\lambda = 0,602$  мкм, сменных нейтральных фильтров и фотоэлектронного умножителя с блоком питания БП. Поле зрения фотометра определялось размером изображения источника и составляло  $2,3 \cdot 10^{-4}$  рад. Сигнал фотометра, снимаемый с фотоэлектронного умножителя, регистрировался при помощи селективного прибора УС типа 237 для зафиксированного положения источника.

Для непрерывного контроля плотности дымового аэрозоля использовался второй измерительный канал. Излучение оптического квантового генератора (ОКГ) типа ЛГ-79 с  $\lambda = 0,63$  мкм модулировалось электромеханическим прерывателем М с частотой 1 кГц (рис. 1). Пучок модулированного излучения ОКГ посредством поворотного зеркала  $Z_1$  направлялся через иллюминатор БАК в рассеивающую среду, проходил через нее и при помощи зеркала  $Z_2$  попадал на фотоприемник ФП, усиливался и регистрировался селективным микровольтметром УС. Контроль стабильности излучателя осуществлялся другим датчиком ФП, на который излучение посылалось при помощи полупрозрачной пластинки П. Для преобразования светового потока в электрический сигнал использовались фотодиоды ФД-24К. Сигналы с микровольтметров через преобразователи ПП типа В9-6 поступали на цифровые вольтметры ЦВ типа 4014А и далее на цифропечатающее устройство ЦП для одновременной записи сигнального и опорного каналов.

При проведении измерения ФРТ дымового аэрозоля методика строилась с учетом специфики образования устойчивого состояния его микрофизических характеристик. Хорошо очищенная с помощью продувки камера заполнялась до максимально возможной плотности древесным дымовым аэрозолем, образованным в результате естественного горения древесины. После этого дымовой аэрозоль в течение нескольких часов выстаивался в закрытой камере. В приобретшем устойчивое состояние «старом» дымовом аэрозоле проводились измерительные циклы ФРТ для заданной оптической толщины. Затем с помощью откачки уменьшалась плотность дымового аэрозоля. При этом можно предположить, что влажность внутри БАК не подвергалась большим изменениям, поскольку измерения проводились в период отопительного сезона и при откачке дым «разбавлялся» воздухом с почти одинаковой влажностью от цикла к циклу. Такая методика дала возможность провести измерения ФРТ в дымовом аэрозоле с приблизительно одинаковыми микрофизическими характеристиками. Можно считать, что в данных измерениях дымовой аэрозоль имеет одномодальное распределение с медианным радиусом частиц  $0,1 \div 0,3$  мкм и отличается только своей плотностью. Временной цикл измерения одной кривой ФРТ занимал  $\sim 0,5$  ч, при этом  $\tau$  могла измениться от первоначального значения на  $1,5 \div 3,5\%$ .

Результаты одной из серий измерений ФРТ системы видения в дымовом аэрозоле приведены на рис. 2. По оси ординат отложено нормированное на максимальное значение  $h(r; \tau)$  при различных оптических толщинах, по оси абсцисс координата точечного источника в плоскости предметов. Кривая 1 рис. 2 измерена в отсутствие дымового аэрозоля, т.е. соответствует аппаратной функции данной системы видения. Кривые 2 – 6 ( $\tau = 0,16 \div 2,94$ ) получены из циклов измерений ФРТ дымового аэрозоля для оптических толщин на базовом расстоянии  $L$ .

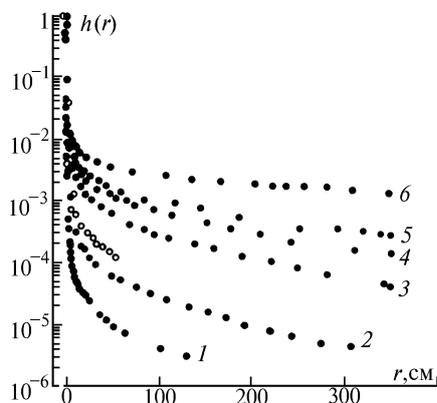


Рис. 2. Зависимость ФРТ системы видения от  $\tau$  для древесных дымов горения: 1 –  $\tau = 0$ ; 2 – 0,16; 3 – 1,12; 4 – 1,74; 5 – 2,16; 6 – 2,94;  $\circ$  – зимняя дымка

Анализ результатов эксперимента, приведенных на рис. 2, позволяет условно выделить три участка на профилях яркости ФРТ дымового аэрозоля. Первый участок в области координаты  $r = 0$ , где относительная величина яркости резко падает с увеличением  $r$ , определяет зарегистрированную часть прямопрошедшего излучения точечного объекта. Далее следует переходный участок к линейному спаду яркости рассеянного излучения в полулогарифмических координатах с дальнейшим ростом  $r$ . Ввиду симметрии ФРТ изменение переходного участка с увеличением  $\tau$  можно характеризовать, например, радиусом  $R$ , определяющим начало преимущественного вклада в регистрируемую яркость все более высоких порядков рассеянного света. За значение  $R$  для заданного  $\tau$  бралась найденная графическим методом из экспериментальных профилей ФРТ координата  $r$  в точке пересечения прямолинейного участка «крыла» ФРТ с ее переходным участком (рис. 2).

На рис. 3 приведена зависимость  $R$  от  $\tau$ . Увеличение оптической толщины приводит к быстрому уменьшению переходного участка. Графический анализ кривой рис. 3 показывает, что изменение  $R$  с увеличением оптической толщины для данных условий эксперимента может быть представлено в виде  $R = 89 e^{-0,23\tau}$  со средней погрешностью аппроксимации 4%.

Относительная яркость рассеянного излучения на крыльях ФРТ с увеличением пространственной координаты  $r$  также уменьшается по характерному для многократного рассеяния экспоненциальному закону, который с ростом  $\tau$  и включением кратностей рассеяния высоких порядков может быть нарушен [9].

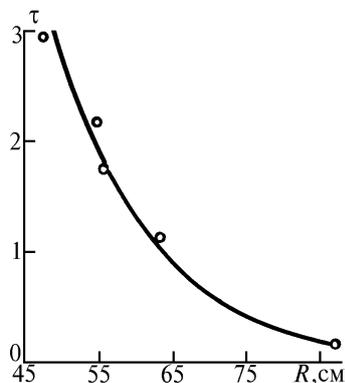


Рис. 3. Зависимость радиуса переходного участка  $R$  от  $\tau$

Следует также отметить, что используемый при проведении экспериментов метод дымообразования (горение) согласно работе [6] приводит к созданию поглощающего дымового аэрозоля с вероятностью выживания кванта  $\Lambda \sim 0,3 \div 0,4$ . Это может вызвать перераспределение эффективных кратностей рассеяния вследствие поглощения и повысить роль низких кратностей по сравнению с дымами, образованными методом пиролиза [2]. Для дымов такого вида, вероятно, следует ожидать увеличения  $R$  и продвижения экспоненциальной зависимости от  $r$  к большим  $\tau$ .

Связь с аэрозольной атмосферой иллюстрируется кружочками (рис. 2), нанесенными по усредненным из нескольких серий значениям нормированной ФРТ системы видения, экспериментально найденной в реальной атмосфере. Измерения проведены автором на полигоне ИОА СО РАН в условиях плотных зимних дымок в ночное время. В измерениях использовалась методика углового сканирования. Длина измерительной трассы равнялась 31,5 м. Точечный объект имитировала лампа КГМ-100, излучение которой модулировалось. В процессе работ от цикла к циклу температура окружающего воздуха колебалась в пределах  $18 \div 20^\circ\text{C}$  ниже нуля. Контроль дисперсного состава среды осуществлялся при помощи серийно выпускаемого фотозлектрического счетчика аэрозольных частиц типа АЗ-5 [10].

На рис. 4 приведено несколько выборок распределения аэрозольных частиц зимних дымок по размерам, найденного в сопутствующих измерениях ФРТ. Из рис. 4 видно, что основная масса аэрозольных частиц зимней дымки (счетной концентрации  $N$ ), найденная при помощи данного измерительного средства, сосредоточена в области радиусов частиц  $a \simeq 0,2 \div 0,5$  мкм.

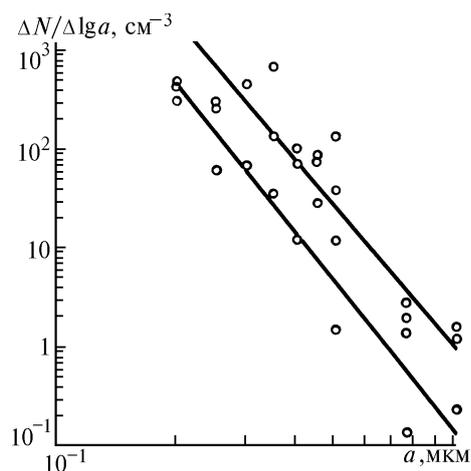


Рис. 4. Распределение по размерам счетной концентрации зимней дымки

Приведенные результаты подтверждают то обстоятельство, что исследования в дымовых аэрозолях ограниченного объема могут с хорошим качественным согласием описывать импульсный отклик реальной аэрозольной атмосферы, по крайней мере, для не очень больших оптических толщин.

1. Зега Э. П., Иванов А. П., Кацев И. Л. Перенос изображения в рассеивающей среде. Минск: Наука и техника, 1985. 327 с.
2. Зуев В. Е., Кабанов М. В. Перенос оптических сигналов в земной атмосфере (в условиях помех). М.: Советское радио, 1977. 368 с.
3. Зуев В. Е., Фадеев В. Я. Лазерные навигационные устройства. М.: Радио и связь, 1987. 160 с.
4. Козлов В. С. Экспериментальные исследования оптико-микрофизических свойств дымовых аэрозолей: Автореф. дис... канд. физ.-мат. наук. Томск, ИОА СО АН СССР. 1985.
5. Голицын Г. С., Шукуров А. Х., Гинзбург А. С. и др. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1988. Т. 24. N 3. С. 227–234.
6. Козлов В. С., Панченко М. В., Тумаков А. Г. // Оптика атмосферы и океана. 1993. Т. 6. N 10. С. 1278–1287.
7. Андреев С. Д., Ивлев Л. С., Михайлов Е. Ф. и др. // Оптика атмосферы и океана. 1995. Т. 8. N 5. С. 687–692.
8. Белов В. В., Борисов Б. Д., Генин В. Н. и др. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1987. Т. 23. N 11. С. 1205–1210.
9. Иванов А. П. Физические основы гидрооптики. Минск: Наука и техника, 1975. 503 с.
10. Клименко А. П. Методы и приборы для измерения концентрации пыли. М.: Химия, 1978. 207 с.

Институт оптики атмосферы СО РАН,  
Томск

Поступила в редакцию  
27 декабря 1995 г.

**B. D. Borisov. About Point Spread Function of Smoke Aerosol.**

The methods and the results of measuring the point spread function (PSF) of the passive viewer for viewing through the smoke aerosol in the limited space of large volume with optical thickness  $\tau = 0.16-2.94$  are observed. The qualitative comparison is conducted with the PSF of the viewer viewing through winter atmospheric hazes and a smoke.