

Ю.Н. Грачев

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ МИКРОСТРУКТУРЫ АЭРОЗОЛЬНЫХ СРЕД ПО ИЗМЕРЕНИЯМ ОСЛАБЛЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ПЯТИ ДЛИНАХ ВОЛН

Исследования микроструктуры четырех типов аэрозолей выполнены на основе сопоставления экспериментальных и расчетных данных по ослаблению лазерного излучения на пяти длинах волн ($\lambda = 0,44; 0,63; 1,15; 3,39$ и $10,6$ мкм). Определены усредненные параметры функции распределения частиц аэрозолей по размерам.

Микроструктура четырех типов аэрозолей (водного, сажистого, фосфорного и металлоокисного) определялась путем измерения коэффициентов ослабления лазерного излучения на пяти длинах волн: $0,44; 0,63; 1,15; 3,39$ и $10,6$ мкм — и сравнения их с коэффициентами, рассчитанными по теории Ми [1]. Параметром аэрозоля, определяемым его микроструктурой и не зависящим от плотности среды, сильно меняющейся во времени, является величина $b(\lambda) = \gamma(\lambda_{\phi})/\gamma(\lambda)$ ($\gamma(\lambda)$ — коэффициент аэрозольного ослабления на длине волны λ , $\lambda_{\phi} = 0,63$ мкм). Выбор опорной длины волны $\lambda_{\phi} = 0,63$ мкм гелий—неонового лазера обусловлен его наибольшей стабильностью по мощности по сравнению с другими лазерами.

Таблица 1

Тип аэрозоля	Измеренные значения параметров $b(\lambda)$			
	λ , мкм			
	0,44	1,15	3,39	10,6
В	—	0,96—1,03	0,71—0,86	3,5—7,4
С	0,76	1,79	6,2	25,5
	0,75	1,95	8,8	35
	0,73	2,52	12,7	—
Ф	1,05	1,12	2,8	4,2
	1,03	1,52	8,2	11,1
	0,71	3,43	15,4	—
М	0,62—0,75	2,1—2,8	9—40	—

Измерения ослабления лазерного излучения при прохождении его через аэрозоль проводились в камере длиной 2 м, с поперечным сечением $0,4 \times 0,4$ м². Водный туман образовывался охлаждением воздуха с помощью трубок, проходящих вдоль камеры и заполненных жидким азотом. Температура тумана устанавливалась в пределах $-5...+2^{\circ}\text{C}$. Сажистый, фосфорный и металлоокисный аэрозоли получались сжиганием в камере машинного масла, красного фосфора и порошкообразного магния соответственно. В табл. 1 приводятся измеренные значения параметра $b(\lambda)$ и интервалы, в котором он изменяется, для указанных типов аэрозолей, обозначенных буквами В, С, Ф, М. В связи с тем, что водный туман существовал непродолжительное время (2—3 мин), для него удалось получить только интервалы изменения $b(\lambda)$. Для сажистого и фосфорного аэрозолей приведены по 3 ряда значений $b(\lambda)$, соответствующих разным начальным плотностям в порядке их убывания. С течением времени наблюдалось изменение величины $b(\lambda)$. Показанное в табл. 1 последовательное изменение $b(\lambda)$ для сажистого аэрозоля характеризует ее временной ход. В фосфорном аэрозоле прослеживался обратный временной ход $b(\lambda)$ по сравнению с сажистым. Для металлоокисного аэрозоля временной ход $b(\lambda)$ не обнаруживался. Проверки для $b(10,6)$ означают, что на указанной длине волны измерения ослабления из-за его малости были затруднены. Для водного тумана значение $b(0,44)$ не определялось.

В расчетах функция распределения частиц аэрозолей по размерам представлялась в виде гамма—распределения

$$n(R) = \frac{N}{\Gamma(\mu + 1)} \frac{\mu}{R_m} \left(\mu \frac{R}{R_m} \right)^{\mu} \exp \left(-\mu \frac{R}{R_m} \right), \quad (1)$$

где R — радиус частиц; R_m — их модальный радиус; μ — параметр полуширины гамма-распределения; N — счетная плотность частиц; Γ — гамма-функция. Естественно, такое представление функции распределения приближенно и не является единственным. Однако в работе не ставилась задача точного нахождения распределения частиц по размерам, тем более, что, как показано выше, оно меняется во времени. Представляли интерес характерные размеры частиц аэрозолей и интервал их возможного изменения. Коэффициент $\gamma(\lambda)$ рассчитывался по формуле

$$\gamma(\lambda) = \int_0^{\infty} \pi R^2 K_0(R, \lambda, m(\lambda)) n(R) dR, \quad (2)$$

где $K_0(R, \lambda, m(\lambda))$ — фактор эффективности ослабления частицы радиуса R с комплексным показателем преломления вещества частицы $m(\lambda)$ на длине волны лазерного излучения λ . Необходимым условием применимости теории Ми является сферичность частиц аэрозолей. Исследования с помощью электронного микроскопа [2] показали, что субмикронные и микронные частицы сажи имеют сферическую форму до $R \approx 4$ мкм. В результате сгорания фосфора образуется фосфорный ангидрид. Будучи сильно гигроскопичным, он, соединяясь с влагой воздуха, образует капельки фосфорной кислоты [3, 4]. Лишь твердые частицы окиси магния в общем случае нельзя полагать сферическими, и потому расчетные данные для металлоокисного аэрозоля носят оценочный характер. Вычисления $b(\lambda)$ проводились для значений $m(\lambda)$ для воды, взятых из [5, 6], для сажи из [7–9], для окиси магния из [10]. Значения $m(\lambda)$ в инфракрасной части спектра для фосфорной кислоты не известны и при расчетах варьировались вблизи значений m для чистой воды.

В табл. 2 приведены расчетные величины $b(\lambda)$ для ряда значений R_m и μ , при которых обеспечивается наилучшее согласие с экспериментальными данными. При укрупнении частиц $b(\lambda)$ стремится к единице на всех длинах волн. Таким образом, наблюдаемый временной рост $b(\lambda)$ в сажистом аэрозоле можно объяснить выпадением в осадок в первую очередь крупных частиц, вследствие чего доля мелкодисперсной фракции возрастает. Обратный временной ход $b(\lambda)$ в фосфорном аэрозоле может быть обусловлен ростом частиц либо за счет присоединения влаги из воздуха, либо за счет их коагуляции. Для выяснения роли первого фактора поджиг фосфора производился в камере с различной влажностью воздуха. При этом величина ослабления оставалась практически постоянной. Иная ситуация складывалась при поджиге разного количества фосфора. При большой плотности аэрозоля по прошествии некоторого времени измеренные значения $b(\lambda)$ были существенно ближе к единице, чем значения, получаемые в аэрозоле малой плотности сразу после поджига. Жидко-капельная природа частиц объясняет возможность коагуляции, которая происходит сильнее в аэрозоле с большей плотностью.

Таблица 2

Тип аэрозоля	Расчетные значения параметра $b(\lambda)$					
	R_m , мкм	μ	λ , мкм			
			0,44	1,15	3,39	10,6
В	1	2	—	0,92	0,79	5,9
	1,5	2,5	—	0,95	0,76	4,0
	2	4	—	0,97	0,76	3,7
С	0,03	2	0,80	2,49	10,2	31,2
	0,05	2	0,89	1,78	9,2	30,2
	0,07	4	0,88	1,89	9,8	31,5
Ф	0,1	3	0,60	3,25	22,6	7,9
	0,2	2	0,98	1,49	7,9	10,7
	0,25	1	1,07	0,95	1,8	4,6
М	0,1	2	0,68	2,12	68,9	14000
	0,1	1	0,74	1,13	10,3	2900

Сопоставление экспериментальных и расчетных данных позволяет установить значения параметров R_m и μ с учетом их изменения во времени. В табл. 3 приведены значения указанных параметров, а также полуширины функции распределения ΔR . Следует отметить, что выход значений R_m и μ за пределы интервалов, указанных в таблице 3, быстро приводит к заметному расхождению измеренных и рассчитанных значений $b(\lambda)$. На основе полученных результатов можно констатировать, что микроструктура аэрозолей, прежде всего сажистого и фосфорного, существенно зависит от условий их образования и меняется во времени. Временные вариации связаны с такими процессами, как коагуляция и седиментация.

Таблица 3

Тип аэро- золя	R_m , мкм	μ	ΔR , мкм
В	1—2	2—4	2—3
С	0,03—0,08	1—4	0,06—0,15
Ф	0,1—0,3	1—3	0,15—0,5
М	0,08—0,15	1—3	0,08—0,2

1. Дейрменджан Д. Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами. М.: Мир. 1971. 168 с.
2. Pluchino A. V. //Appl. Optics. 1983. V. 22. № 12. P. 1861.
3. Краткая химическая энциклопедия. М.: Советская энциклопедия. 1967. Т. 5. С. 499.
4. Carlon H. R., Anderson D. H., Milham M. E. et al. //Appl. Optics. 1977. V. 16. № 6. P. 1598.
5. Зуев В. Е. Распространение видимых и инфракрасных волн в атмосфере. М.: Советское радио. 1970. 496 с.
6. Hale G. M., Query M. R. //Appl. Optics. 1973. V. 12. № 3. P. 555.
7. Roessler D. M., Faxvog F. R. //Appl. Optics. 1979. V. 18. № 9. P. 1399.
8. Tomaselli V. P., Rivera R., Edewaard D. C., Müller K. D. //Appl. Optics. 1981. V. 20. № 22. P. 3961.
9. Дугин В. П., Топорков Ю. Г., Задорина Н. В. //Изв. АН СССР. ФАО. 1981. Т. 17. № 9. С. 984.
10. Plass G. N. //Appl. Optics. 1964. V. 3. № 7. P. 867.

Институт радиотехники и электроники
АН СССР, Москва

Поступило в редакцию
25 апреля 1988 г.

Yu. N. Grachov. Estimation of Aerosol Media Microstructure Parameters from Measured Laser Beam Attenuation at Five Wavelengths.

The microstructure of water, soot, phosphorous and metal oxide aerosol species is examined based on the comparison between the experimental and calculation data on the laser beam attenuation at different wavelengths ($\lambda = 0,44; 0,63; 1,15; 3,39$ and $10,6 \mu\text{m}$). The average parameters of the particle size distribution function are derived.