

А.А. Исаков

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ОПТИЧЕСКИХ И МИКРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЫМОВ

Институт физики атмосферы РАН, г. Москва

Поступила в редакцию 12.08.98 г.

Принята к печати 10.11.98 г.

Приводятся результаты анализа данных предварительного и двух комплексных дымов экспериментов 1986–1988 гг. Для примерно пятидесяти дымов решена обратная задача – восстановлены функции распределения объемов частиц по размерам и оценены вещественная и мнимая части показателя преломления вещества частиц. Показано, что для большей части дымов в первом приближении основная (т.е. определяющая оптические характеристики дымов в видимой области спектра) мода частиц удовлетворительно описывается узким одновершинным логнормальным распределением. Проанализированы связи между горючими материалами, способами их сжигания, с одной стороны, и параметрами получающихся распределений и комплексным показателем преломления вещества частиц дымов – с другой. В некоторых дымах благодаря квазинепрерывной развертке по спектру при регистрации оптических характеристик обнаружены аномалии в их зависимостях в красной области спектра. Расчеты с использованием модели гармонического осциллятора показали, что подобные аномалии могут быть объяснены наличием полосы поглощения в указанной области.

Введение. В предлагаемой статье приводится анализ результатов исследований дымовых аэрозолей с помощью поляризационного спектрофелометра (далее СПН) в трех дымовых экспериментах: предварительного 1986 г. и двух комплексных 1986 и 1988 гг., проводившихся на Звенигородской станции ИФА РАН. В ходе предварительного эксперимента исследовались достаточно характерные дымовые аэрозоли – выхлопы двигателей, сигаретный дым, дым костра и т.д. Комплексные эксперименты выполнены в рамках программы «ядерная зима», и характер дымов диктовался условиями задачи. Некоторые результаты были опубликованы в [1, 2]. В [3] была предложена классификация исследовавшихся дымов, основанная в первую очередь на анализе их оптических характеристик. Все дымы были разбиты на три основные группы – слабопоглощающие, грубо- (первая) и мелкодисперсные (вторая) и сильнопоглощающие (третья). К первой группе относятся почти все дымы пиролиза (тления). Вторая группа – в основном дымы горения древесины, торфа и т.д., третья – нефтяные, резиновые дымы горения («черные» или «коптящие»). Этой классификации мы будем придерживаться в дальнейшем.

Десятилетием ранее эксперименты по исследованию оптических и микрофизических характеристик дымов были начаты в Институте оптики атмосферы [9, 10]. Постановка задачи, разумеется, несколько отличалась от той, которая сформулирована в программе «ядерная зима», но основные выводы [10], касающиеся оптических характеристик дымов, хорошо согласуются с изложенной схемой. Описание комплекса аппаратуры, дымовой камеры, сжигаемых смесей и режимов горения приведены в [3, 4]. Здесь мы коротко напомним основные моменты комплексных экспериментов. Дымовая камера имела объем около 60 м^3 , дым из печи поступал в нее по трубе длиной около 2 м и диаметром около 10 см. Навеска вещества сжигалась в электропечи, снабженной приборами и устройствами для регулировки и контроля режима горения. Горение проводилось при температуре 900°C с продувом объема горения воздухом, пиролиз – при температуре около 600°C без продува [4]. После сжигания смеси дым в камере перемешивался вентилятором и

выстаивался около полутора часов, т.е. исследовались характеристики «старых» дымов, получаемых в весьма жестко фиксированных условиях. В предварительном эксперименте (исключая, пожалуй, режим тления или пиролиза), напротив, условия горения – костер с открытым пламенем, сгорание в цилиндре двигателя – были разными и время с момента сжигания до окончания записи проходило около 15 мин. В 1986 г. спектрофелометр был установлен в КУНГе рядом с камерой, и дымы засасывались в рабочую камеру его штатным воздухозаборником, в 1988 г., в связи с радикальной переделкой прибора (см. ниже), спектрофелометр находился в лабораторном помещении и дымы из камеры к прибору переносились в контейнере объемом около 10 л.

Подробное описание спектрофелометра приведено в [1], напомним основные характеристики варианта 1986 г. Прибор измерял индикатрису рассеяния D_{11} на углах рассеяния $\varphi = 45$ и 90° , и степень линейной поляризации рассеянного света $\varphi = 90^\circ$ для четырех длин волн $\lambda = 0,46; 0,54; 0,68$ и $0,8 \text{ мк}$. Спектральные интервалы выделялись с помощью стеклянных светофильтров с полушириной около 150 \AA . Специально для исследования коэффициента ослабления дымовых аэрозолей ξ прибор был дооборудован трубой-насадкой, соосной со световым пучком осветителя и имевшей длину $\sim 2 \text{ м}$. На конце насадки установлен фотоприемник, регистрирующий интенсивность прошедшего через дым и падающего на него пучка осветителя. В результате для каждого дыма измерялся набор 16 оптических параметров.

В процессе анализа результатов экспериментов 1986 г. выявилась необходимость [2, 4, 5] более подробного исследования спектральных зависимостей индикатрис рассеяния и ослабления, поскольку для большинства дымов отчетливо прослеживалась немонотонность спектрального хода характеристик ослабления и рассеяния. В связи с этим для прибора был разработан принципиально новый осветитель на базе монохроматора СФ16. Спектральный рабочий диапазон нового нефелометра при работе с дымовыми аэрозолями составил $\lambda = 0,37\text{--}0,85 \text{ мк}$, спектральное разрешение (переменное по диапазону, поскольку моно-

хроматор призмный) 50–300 Å. Для примерно половины дымов компоненты матрицы измерялись на дискретном наборе длин волн (20 точек), для остальных развертка по спектру и регистрация осуществлялись с помощью ЭВМ.

Для оценки микрофизических параметров дымовых аэрозолей в [1] использовался так называемый «библиотечный» метод – с помощью модельных расчетов были выявлены наиболее чувствительные к вариациям параметров распределений частиц оптические характеристики рассеяния и построены номограммные сетки, по которым и оценивались микрофизические параметры дымов. Вопрос возможного наличия полос поглощения при этом, разумеется, выносился за скобки. Более общая постановка обратной задачи – решение тем или иным методом интегрального уравнения, связывающего оптические (компоненты матрицы рассеяния D) и микрофизические параметры дымов – представлялась по хорошо известным причинам слишком затруднительной – необходимо было решать уравнение, ядро которого K содержало константы (т.е. комплексный показатель преломления $m = n + i\chi$ вещества частиц), которые надлежало определять наравне с функцией N распределения частиц по размерам r :

$$D(\varphi, \lambda) = \int K(\varphi, \lambda, m, r) N(r) dr. \quad (1)$$

Развитие вычислительной техники позволило несколько изменить подходы к решению подобных обратных задач. Сейчас не составляет проблемы рассчитать достаточно густую сетку ядер уравнения (1) для области изменения действительной части показателя преломления $n = 1,5 \div 1,8$ и мнимой в пределах $0,0 \div 0,2$ и решать задачу тем или иным методом регуляризации и перебором всей сетки ядер по принципу минимальной невязки. Разумеется, подобная методика ни в коей мере не может рассматриваться как общее решение задачи, в то же время ясно, что оценки показателя преломления и распределения частиц по размерам таким методом должны быть ближе к реальности, нежели полученные «библиотечным».

Идейно близкий подход, опирающийся на обращение поляризационных параметров (поляризационных составляющих индикатрисы рассеяния), реализован в [9]. В нем для определения оптических постоянных вещества частиц также используется принцип минимальной невязки. Результаты обращения оптических характеристик дымов, приведенные в [9] (характерные размеры частиц и величина показателя преломления), хорошо согласуются с полученными нами для аналогичных дымов.

Анализ результатов экспериментов 1986 г. показал, что в ряде дымов спектральный ход индикатрисы рассеяния в ультрафиолетовой области спектра аномальный – наблюдается крутое падение D_{11} с уменьшением длины световой волны, что не согласуется с поведением D_{11} в видимой области. В [2] аномалии объяснены существованием в этих дымах двух фракций с различными оптическими константами – мелкодисперсной сильнопоглощающей и слабопоглощающей крупнодисперсной. Вклад мелкодисперсной фракции в рассеяние в видимой области невелик – порядка ошибок измерений, связанных с флуктуациями в дымах ($\approx 10\%$), поэтому данные спектрополяриметра несут информацию лишь о второй фракции.

В красной области спектра (третий светофильтр СПН) в ряде дымов также были обнаружены отклонения от монотонного спектрального хода, указывавшие на воз-

можность существования полосы поглощения. Вышеизложенное и послужило основанием для доработки прибора. Подробная запись характеристик светорассеяния в области спектра $\lambda = 0,6–0,75$ мк позволила действительно в некоторых дымах обнаружить на зависимостях степени линейной поляризации рассеянного света и коэффициента ослабления ξ согласованные изменения в области $\lambda = 0,61–0,65$ мк (см. ниже). Заметим, что в этом диапазоне находится полоса, принадлежащая углеродно-азотной C–N-связи.

Итак, к проблеме неопределенности показателя преломления ядра добавляется и спектральный ход n и χ , причем, по всей вероятности, немонотонный. В такой постановке задача явно неразрешима, поэтому здесь в качестве варианта была избрана следующая схема: поскольку нет оснований предполагать различие в химическом составе у частиц основной с точки зрения оптики видимой области спектра фракции, для решения обратной задачи использовать ядра с постоянным по спектру показателем преломления, а возможные аномалии рассматривать отдельно.

Этот способ оценки микрофизических параметров дымовых аэрозолей был реализован в предлагаемой работе. Предварительно на модели узких логонормальных распределений была оценена чувствительность разных оптических характеристик к вариациям оптических констант вещества. Эти оценки показали, что при указанной выше десятипроцентной ошибке измерений предел разрешимости по действительной части показателя преломления $\delta_n \approx 0,05$, мнимой $\chi \approx 0,03$. Попутно было установлено, что для частиц с радиусом $r \approx 0,3$ мк введение даже слабого поглощения $\chi = 0,03$ примерно в полтора раза меняет нормированную индикатрису рассеяния. Из этого следует, что, во-первых, основные величины для определения показателя преломления поглощающих дымов – коэффициент ослабления ξ и значение индикатрисы под углом 45° , точнее, их отношение $K(\xi, D)$ или же нормированная индикатриса, во-вторых, оптический отклик частицы, а с ним и эквивалентный размер в фотоэлектрическом счетчике, меняются соответственно на 20–30%, поэтому к результатам, полученным в комплексных экспериментах с помощью фотоэлектрических счетчиков, следует относиться с осторожностью, в особенности для поглощающих дымов.

Используемая для решения алгебраизованного уравнения (1) итерационная методика описана в [8]. Для слабопоглощающих дымов сетка состояла из 30 ядер, диапазон радиусов $r = 0,01–2,0$ мк разделен двадцатью точками разбиения, шаг по действительной части показателя преломления был 0,05, по мнимой – 0,03, для сильнопоглощающих диапазон радиусов был расширен до $r = 3$ мк, а мнимой части показателя преломления до $\chi = 0,4$.

Результаты обращения оптических характеристик дымов. Сопоставляя результаты двух методов обращения, логично выяснить: 1) насколько реалистичны результаты были получены с использованием модели одновершинного логонормального распределения; 2) какую дополнительную информацию позволяет получить второй метод; 3) насколько упомянутые ранее 16 оптических параметров полно описывают оптику дымов в видимой области спектра и дает ли с этой точки зрения какое-то преимущество более подробная запись по спектру; 4) как возможные спектральные аномалии могут повлиять на решение обратной задачи.

Выше отмечалось, что шаг по действительной и мнимой частям показателя преломления примерно соответствовал пределу их различимости при погрешности измерений около 10%. Это подтвердили результаты решения об-

ратной задачи. Минимальные невязки (они различались обычно на процент и менее) получались обычно для двух соседних значений действительной части n , значительно реже для ближайших величин его мнимой части. Последнее наблюдалось для дымов, у которых априори можно было предполагать наличие в частицах поглощающего компонента. Обычная величина невязки составляла около 10%. Сопоставление результатов обращения двумя методами суммировано в таблице, в которой сравниваются параметры распределений, полученных в [1, 2] для полутора десятков дымов с параметрами логонормального распределения, оптимально аппроксимирующего основной колокол распределения, полученного для этих же дымов решением интегрального уравнения. В общей сложности обратная задача была решена примерно для 50 разных дымов.

В основном результаты ее решения показывают, что для ряда дымов (в первую очередь пиролиза) сделанные в [1] оценки оказались удовлетворительным приближением. Примерно для 70–80% случаев восстановленные распределения хорошо аппроксимировались модельными.

В комплексных экспериментах различались условия забора дымов, у предварительного и комплексного экспериментов существенно различались условия сжигания горючих смесей. При компоновке рисунков мы старались подчеркнуть, насколько проявились эти факторы в процессах формирования микрофизических характеристик дымовых аэрозолей. Поскольку распределения $dV(r)/dr$ дымов пиролиза во всех трех экспериментах оказались похожими, не было нужды посвящать им отдельный рисунок. На наш взгляд, важнее было подчеркнуть, как они соотносятся с результатами для дымов других режимов сжигания. Результаты обращения в форме распределений объемов частиц по размерам приведены на рис. 1. На рис. 1, *a, e* представлены дымы предварительного эксперимента, на рис. 1, *б–д* – двух комплексных. На рис. 1, *б, в, д* вместе с кривыми $dV(r)/r$ для дымов выхлопа дизеля, горения торфа, дров показаны подгоночные логонормальные. Обращает на себя внимание одно обстоятельство, которое, возможно, отражает закономерность в процессах формирования дымовых аэрозолей: если левое крыло распределения (т.е. меньшие размеры), как правило, хорошо описывается моделью, то для правого это скорее исключение – либо распределение по сравнению с моделью заметно уширяется, либо в области $r \approx 0,8–1$ мк отчетливо прописывается вторая фракция частиц (рис. 1, *a–в*). На рис. 1, *a–в*, где сведены кривые распределений объемов частиц по размерам для ряда слабопоглощающих дымов предварительного эксперимента – древесных дымов тления (пиролиза), выхлопов двигателей и сигаретного дыма, оба типа отклонений от модели демон-

стрируют выхлоп холостого хода дизеля, сигаретный дым – лишь уширение правого крыла. Кстати говоря, основные моды этих двух дымов удивительно сходны и размерами, и формой отклонения от моделей.

В видимой области спектра оптика основной массы дымов, исследовавшихся в комплексном эксперименте, с точностью $\approx 10\%$ описывается оптикой узкого одновершинного распределения частиц по размерам. Хорошо согласуются полученные двумя способами характерные размеры наиболее крупнодисперсных дымов, однако методика [2] дала в ряде случаев заметно более узкие распределения – эквивалентная полуширина логонормального распределения вплоть до $v^2 \approx 0,08$. Устойчивое положение моды распределения на оси радиусов частиц и узость распределения позволяют предположить, что существует практически не зависящий от горючего материала механизм, в процессе горения жестко стабилизирующий формирование распределения вблизи строго определенного размера частиц. Для процесса пиролиза это $r = 0,25 \div 0,3$ мк, причем в эту область хорошо ложатся результаты и комплексных, и предварительного экспериментов. Режим горения для открытого пламени и выхлопов двигателей дает сходные кривые узких ($v^2 = 0,1$) распределений с $r = 0,08 \div 0,1$ мк. В комплексных экспериментах горение происходило при дефиците кислорода и дымы горения больше походили на дымы пиролиза, нежели на дымы открытого пламени, это отразилось в характере распределений их частиц. Ширина распределения оказалась для них более изменчива: $v^2 = 0,07 \div 0,3$. Для торфа, например, оба режима дали очень близкие распределения (см. рис. 1, *б*), но в режиме пиролиза частицы дыма получились слабопоглощающими $\chi \approx 0,03$, а в режиме горения – сильнопоглощающими $\chi \approx 0,09$. Насколько разные по микрофизическим характеристикам дымы может дать один и тот же горючий материал, иллюстрирует рис. 1, *в*. Здесь приведены распределения частиц двух каменноугольных дымов в экспериментах 1986 (кривая 1) и 1988 гг. (кривая 2, квазинепрерывная развертка). Модальный размер во втором дыме втрое больше, чем в первом. Необычное распределение получилось для древесного дыма, когда в составе дров была береза с корой (берестой), рис. 1, *д*. Это, пожалуй, единственный дым с максимумом распределения на величине радиуса $r = 0,16$; у других дымов, в тех случаях, когда фиксируется мода малых частиц (см. рис. 1, *з*), в этой области радиусов всегда расположен глубокий минимум, разделяющий моды. В предварительном эксперименте дым частей березовых дров получился относительно мелкодисперсным и сильнопоглощающим ($r = 0,08$, $\chi \approx 0,1$ [1]). Наличие в навеске березы и обусловило, судя по всему, характер распределения.

Источник дыма	Параметры распределения (первый метод)				Параметры аппроксимирующего распределения (второй метод)			
	r	v^2	n	χ	r	v^2	n	χ
Предварительный эксперимент								
Бензиновый двигатель	0,03	0,5	1,55	0,1	0,1	0,1	1,5	0,0
Дизель, холостой ход	0,11	0,2	1,5	0,0	0,13	0,15	1,55	0,0
Дизель, форсаж	0,27	0,1	1,54	0,2	0,23	0,1	1,65	0,2
Резина, копящее пламя	< 0,07	0,5	1,7	–	0,075	0,15	1,65	0,3
Оргстекло, копящее пламя	< 0,03	0,5	1,7	–	0,08	0,15	1,7	0,2
Еловые дрова	0,21	0,1	1,66	0,0	0,25	0,07	1,5	0,03
Сосновые дрова	0,19	0,1	1,66	0,0	0,25	0,07	1,5	0,03
Комплексный эксперимент, 1986 г.								
Торф, горение N 18	0,23	0,3	1,7	0,14	0,2	0,2	1,7	0,09
Торф, пиролиз N 17	0,25	0,3	1,68	0,05	0,22	0,2	1,7	0,03
Городская смесь, горение N 4	0,28	0,3	1,68	0,05	0,28	0,15	1,75	0,03
Дровяная смесь, горение N 11	0,27	0,3	1,62	0,0	0,24	0,12	1,7	0,0
Дровяная смесь, пиролиз N 12	0,24	0,3	1,56	0,05	0,16	0,3	1,7	0,06
Городская смесь, горение N 16	0,25	0,3	1,7	0,1	0,27	0,07	1,7	0,09

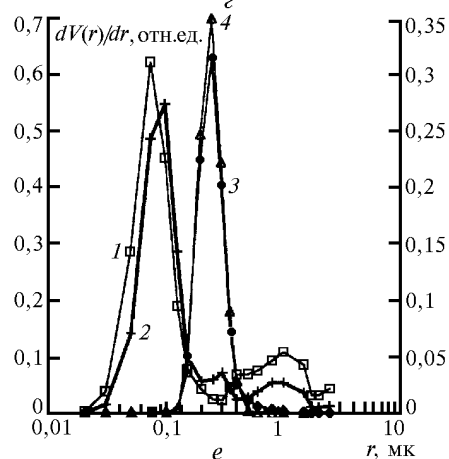
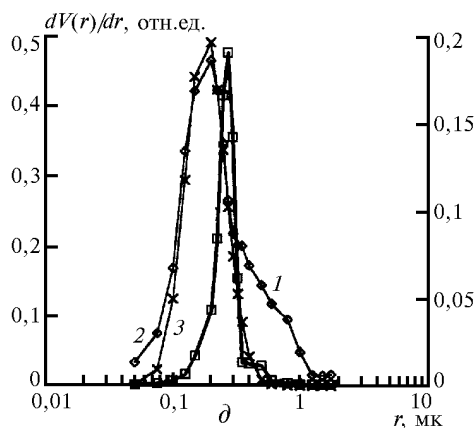
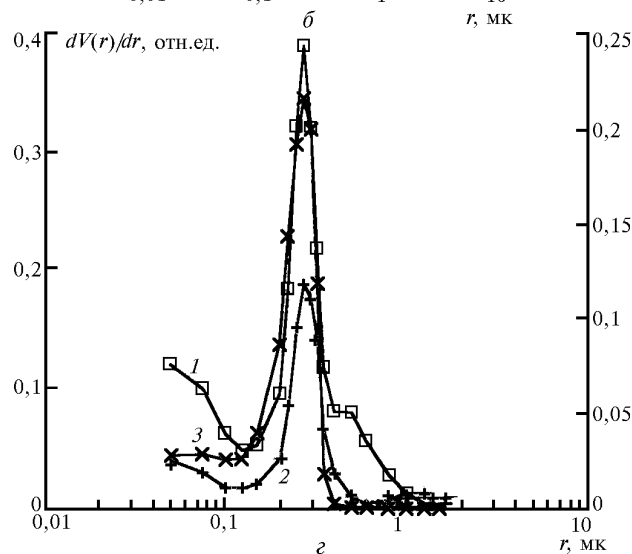
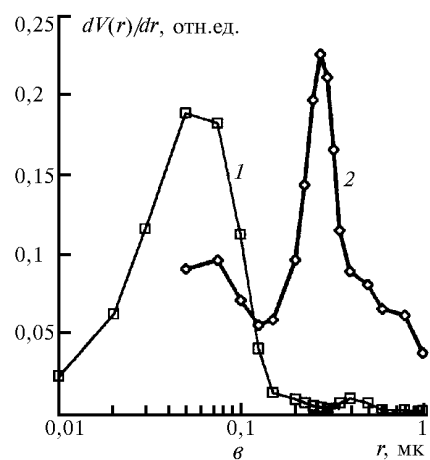
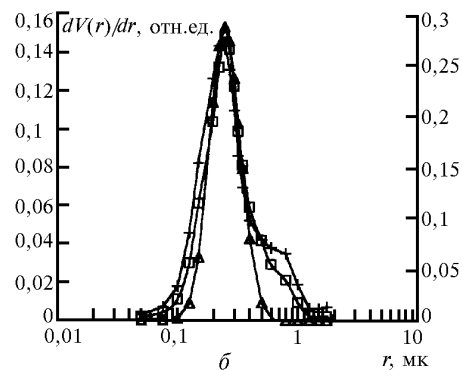
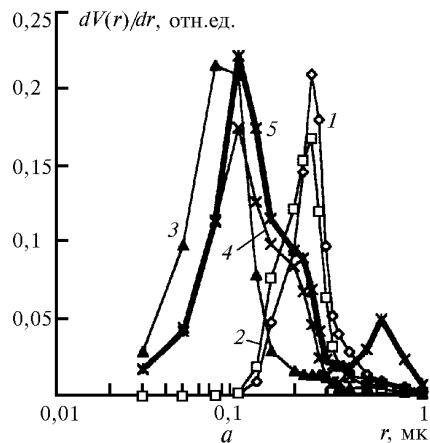


Рис. 1. Примеры восстановленных распределений объемов частиц по размерам $dV(r)/dr$: *a* – для дымов предварительного эксперимента. Кривая 1 – сосновые дрова, 2 – еловые (оба пиролиз); 3 – выхлоп бензинового двигателя; 5 – дизельного на холостом ходу; 4 – сигаретный дым; *б* – для дымов горения (1) и пиролиза (2) торфа; кривая 3 – подгоночное распределение; *в* – для двух каменноугольных дымов 1986 – 1 и 1988 г. – 2; *г* – для дымов комплексного эксперимента 1988 г. «городская смесь». Кривая 1 – горение; 2 – пиролиз; 3 – дровяная смесь, пиролиз; *д* – для дымов пиролиза «городской смеси» (1), горения дровяной смеси с берестой (2), 3 – модельное распределение; *е* – для «черных» дымов предварительного эксперимента. Оргстекло – кривая 1, резина – 2, выхлоп дизеля в режиме форсажа – 3, модель – 4

Особо следует остановиться на сильнопоглощающих «черных» дымах. В [6] средствами электрооптики было установлено, что лишь в дымах пиролиза полностью отсутствуют оптические проявления несферичности частиц, в дымах горения несферичность может сказываться, в первую очередь это касается именно «черных» дымов. Это проявилось уже в

заметно больших, около 15%, ошибках восстановления, что следует учитывать при рассмотрении рис. 1, *е*. Здесь наряду с основным по амплитуде колоколом распределения $r \approx 0,08$ присутствует второй широкий максимум в области около микрона по радиусу. Для того чтобы более аккуратно прописать в распределениях эту область размеров частиц, специ-

ально для сильнопоглощающих дымов была рассчитана отдельно сетка ядер с большим граничным размером по радиусу и большим поглощением. Поскольку время жизни этих дымов около 10 мин, можно предположить, что второй максимум на распределении – это не успевшие осесть агрегаты сажевых частиц.

Выхлоп дизельного двигателя в режиме форсажа дал единственный зарегистрированный дым, у которого распределение (см. рис. 1, д) по размерам получилось как у дымов пиролиза, а показатель поглощения $\chi \approx 0,2$ скорее соответствует коптящим мелкодисперсным дымам. Оценки и его параметров, и выхлопа холостого хода двумя методами – близкие.

В эксперименте 1988 г. на первом этапе матрица рассеяния регистрировалась на 20 длинах волн в диапазоне 0,37–0,85 мк. Поскольку для большинства дымов в синеволновой области спектра отчетливо проявлялись изменения характера зависимостей степени линейной поляризации (см. раздел «Аномалии спектрального хода...»), для решения обратной задачи спектральная область была сужена до $\lambda = 0,45 \div 0,85$, а для сокращения до семи (шаг по длине $\Delta\lambda = 0,5$ мк) числа опорных точек по длине волны для всех оптических характеристик были построены аппроксимирующие полиномы по методу наименьших квадратов. Оговоримся сразу, что с точки зрения решения обратной задачи радикального увеличения информативности подробная запись по спектру не дала, т.е. наборы четырех длин волн из двадцати различаются не настолько, чтобы существенно изменить характер решения обратной задачи. Распределения (см. рис. 1, з) относятся к дымам 1988 г. и, пожалуй, единственно, чем они отличаются от других, это наличием второй моды мелких частиц, т.е. для диагностики, по крайней мере основной моды, оказалось вполне достаточно шестнадцати параметров.

Тем не менее более подробная запись все же полезна. В первых, в случае, когда число измеренных параметров равно или незначительно превышает количество точек на получаемом распределении, решение наиболее стабильно. Во вторых, именно по результатам 1988 г. в заметно большем (в процентном отношении) числе дымов, в том числе и пиролиза, обращение показало наличие мелкодисперсной $r \approx 0,07 - 0,08$ фракции. В-третьих, относительный модальный размер частиц дымов $\rho = 2\pi r/\lambda \approx 4$, что для реализовавшихся величин показателя преломления как раз соответствует положению вблизи первого максимума кривой фактора эффективности (кривая Стреттона). Из-за этого на спектральных зависимостях ослабления ξ и $D_{11}(45^\circ)$ в видимой области спектра при достаточно узком распределении частиц по размерам появляется максимум. При заданном распределении точное его положение зависит от показателя преломления вещества частиц (кстати, вариации показателя преломления могут по крайней мере частично объяснить изменчивость спектрального хода ослабления, обсуждавшуюся в [5]), таким образом, подробная запись по спектру позволяет более надежно определять показатель преломления.

Аномалии спектрального хода оптических характеристик. Влияние полосы поглощения на спектральный ход оптических характеристик дымовых аэрозолей полуколичественно можно проследить (см., например, [6]) на простейшей модели гармонического осциллятора. Зависимость от частоты ω вещественной ε_1 и мнимой ε_2 комплексного показателя преломления вблизи резонансной частоты ω_0 такого осциллятора описывается следующим выражением:

$$\varepsilon_1 = 1 + \frac{Nf(\omega_0^2 - \omega^2)}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \gamma^2 \omega^2}; \quad \varepsilon_2 = \frac{Nf\gamma\omega}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \gamma^2 \omega^2}, \quad (2)$$

где γ – полуширина резонансной кривой; f – так называемая сила осциллятора, а N – их число в единице объема. Из этих выражений легко получаются формулы для вещественной n и мнимой χ частей комплексного показателя преломления:

$$n = \sqrt{\frac{\sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2} + \varepsilon_1}{2}}; \quad \chi = \sqrt{\frac{\sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2} - \varepsilon_1}{2}}. \quad (3)$$

Вещественная и мнимая части показателя преломления подчиняются соотношениями Крамера–Кронига, поэтому, несмотря на простоту, модель в состоянии описывать реальное поведение оптических констант вещества по крайней мере полуколичественно, более или менее реальную картину их поведения можно получить подбором параметров f и γ .

Характер влияния полосы поглощения на спектральный ход оптических характеристик дымов рассчитывался для модельных логонормальных распределений с типичными для большинства исследовавшихся дымов параметрами – модальный радиус $r = 0,2 \div 0,3$ мк, полуширина распределения $v = 0,07 \div 0,1$, центр полосы был выбран на $\lambda = 0,6$ мк, относительная полуширина полосы $\gamma = 0,05 \div 0,1$. Пример результатов расчетов приведен на рис. 2. Из рис. 2 видно, что оптические характеристики дымов весьма чувствительны к наличию полос поглощения, причем наиболее сильные вариации связаны с уменьшением показателя преломления n в области аномальной дисперсии.

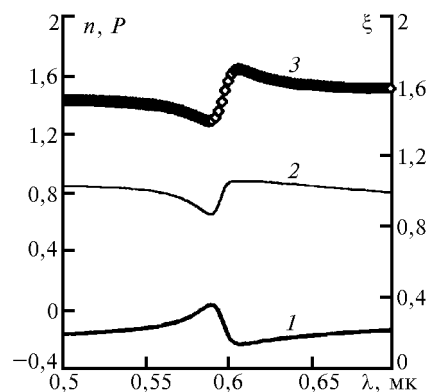


Рис. 2. Модель гармонического осциллятора, спектральные зависимости в области полосы поглощения степени линейной поляризации рассеянного света P – кривая 1, действительной части показателя преломления n (левая ось ординат), коэффициент ослабления ξ (правая ось) для логонормального распределения частиц по размерам

На рис. 3 приведены спектральные зависимости этих же оптических характеристик (дискретный набор длин волн), полученных для дровяного дыма в режиме горения. Флуктуации сигналов при записи, как отмечалось выше, могли достигать 10%. В области $\lambda \approx 0,65$ мк на кривой ослабления наблюдается глубокий минимум, далеко выходящий за пределы суммарной погрешности, а на кривой степени поляризации – синхронный с ним максимум, также превышающий погрешность. Сходная, но слабее выраженная картина получалась и для дыма пиролиза дровяной смеси. Длина волны $\lambda = 0,61$ мк, на которой наблюдается немонотонность, несколько смещена в коротковолновую область.

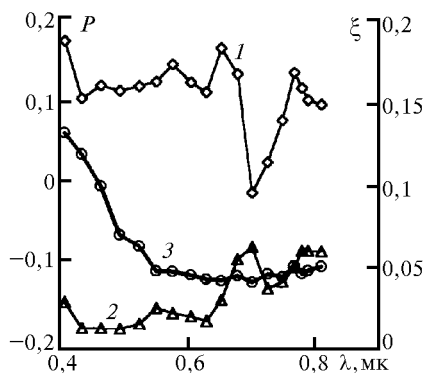


Рис. 3. Спектральные зависимости коэффициента ослабления (кривая 1), степени линейной поляризации рассеянного света (2) для дыма горения дровяной смеси; кривая 3 – степень поляризации для каменноугольного дыма (1988 г., квазинепрерывная развертка)

Подробная запись по спектру, помимо возможного существования полосы поглощения в красной области, позволила во многих дымах получить подтверждение быстрого роста поглощения (по типу сажевого, «серого») в сине-фиолетовой ($\lambda \leq 0,45$ мк) области спектра. На рис. 3 кривая 3 (каменноугольный дым) иллюстрирует типичное для многих дымов горения изменение знака степени поляризации рассеянного света в фиолетовой области спектра, что отчетливо указывает на рост поглощения.

Выводы. 1. В большинстве дымов их оптические характеристики в видимой области спектра определяются основной фракцией частиц, хорошо описываемой одновершинным логнормальным распределением. Отклонения от модели, если таковые есть, проявляются либо в существенном замедлении скорости спада распределения в области больших размеров, либо в виде второй фракции с характерными размерами ~ 1 мк по радиусу, иногда проявляется мода микродисперсных ($r < 0,1$ мк) частиц.

2. В дымах пиролиза (тления) независимо от материала горючей смеси формируются узкие, с полушириной аппроксимирующего логнормального распределения $\sqrt{v^2} = 0,07 \div 0,15$ и модальным радиусом $r = 0,25 \div 0,3$ мк фракции частиц. По-видимому, существует механизм, стабилизирующий форму и размеры частиц распределения. Поглощение в видимой области спектра практически отсутствует, величина показателя преломления зависит от горючего материала и находится в пределах $n = 1,55 \div 1,75$.

3. Характер распределения частиц в дымах горения существенно зависит от его режима – открытое пламя (и выхлопы двигателей) формируют узкие мелкодисперсные (характерные размеры $r = 0,07 \div 0,1$), при дефиците кислорода даже при температуре 900°C размеры частиц близки к таковым дымов пиролиза и распределение часто более широкое – $\sqrt{v^2} = 0,1 \div 0,3$. Поглощение может отсутствовать (вы-

хлоп бензинового двигателя), быть слабым ($\chi \approx 0,03$, древесина хвойных), средним ($\chi \approx 0,06$, береста, «городская смесь») и сильным – коптящие дымы нефти, оргстекла, резины и т.д. ($\chi \approx 0,1-0,3$). В среднем действительная часть показателя преломления в дымах горения выше, чем для пиролиза. В тех случаях, когда в дымах сосуществуют мелкодисперсная и крупнодисперсная фракции, положение минимума, разделяющего их, практически всегда приходится на $r \approx 0,15$ мк.

4. В видимой области спектра $\lambda = 0,45 \div 0,75$ мк (за исключением участков аномалий) оптика основной фракции в первом приближении описывается тремя – четырьмя компонентами матрицы рассеяния, измеренными на четырех длинах волн в этом диапазоне; для диагностики мнимой части показателя преломления наиболее существенно отношение коэффициента ослабления к величине D (45°).

5. Подробная запись спектральных зависимостей оптических характеристик дымов позволила зафиксировать в ряде дымов наличие слабоселективного поглощения в фиолетовой и предположительно полосы поглощения в красной областях спектра.

1. Лукишин В.В., Исаков А.А. Оптические характеристики дымовых аэрозолей // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1988. Т. 24. № 3. С. 250–257.
2. Исаков А.А., Лукишин В.В., Свириденков М.А. Спектрорелометрические исследования дымовых аэрозолей // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1988. Т. 24. № 3. С. 258–262.
3. Голицын Г.С., Шукуров А.Х., Гинзбург А.С., Суругин А.Г., Андропова А.В. Комплексное исследование микрофизических и оптических свойств дымового аэрозоля // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1988. Т. 24. № 3. С. 227–234.
4. Андропова А.В., Костина Е.М., Кутов А.С., Минашкин В.М., Пирогов С.М., Обвинцев Ю.И., Суругин А.Г. Оптические и микрофизические свойства аэрозолей, получаемых при горении различных материалов // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1988. Т. 24. № 3. С. 235–243.
5. Аникин П.П., Шукуров А.Х. Спектральное ослабление излучения дымовым аэрозолем // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1988. Т. 24. № 3. С. 244–249.
6. Борен К., Хафмен Д. Поглощение и рассеяние света малыми частицами. М.: Мир, 1986. 664 с.
7. Капустин В.Н., Корнеев А.А. Исследование процессов агрегатобразования и оптических проявлений несферичности частиц различных дымов // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1988. Т. 24. № 3. С. 280–289.
8. Исаков А.А. О возможности исследования полупрозрачных облаков методами солнечного ореола // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1994. Т. 30. № 2. С. 241–246.
9. Веретенников В.В., Козлов В.С., Наац И.Э., Фадеев В.Я. К определению оптических постоянных и микроструктуры дымовых аэрозолей из поляризационных оптических измерений // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1980. Т. 16. № 3. С. 270–275.
10. Козлов В.С., Панченко М.В., Тумаков А.Г. О влиянии режима сжигания углеводородных топлив на оптические свойства дымовых аэрозолей // Оптика атмосферы и океана. 1993. Т. 6. N 10. С. 1278–1286.

A.A. Isakov. Some Results of Investigation of Optical and Microphysical Characteristics of Smokes.

The results of complex experiments on smoke aerosol study are presented. The complex inverse problem has been solved for the data of light scattering matrix measurements for a number of smokes. That has allowed retrieving the volume particle's size distributions as well as real and imaginary parts of refractive index of particle matter. It was found that the majority of smokes, in particle's radii region $r = 0.05-2 \mu\text{m}$ have narrow single modal volume size distribution which can be approximated by lognormal one. The connections between materials, which were burned, method of particles burning and their refractive indices were displayed. For some smokes, the anomalous spectral dependencies of the extinction coefficient and the degree of linear polarization were detected. The calculations by means of the harmonical oscillator model showed that this effect can be explained by the existence of an absorption band in that spectral region.