

## Некоторые методические дополнения к решению обратной задачи для восстановления параметров дисперсной структуры дымов смешанного состава

Р.Ф. Рахимов, Э.В. Макиенко\*

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

Поступила в редакцию 28.04.2009 г.

На основе спектрофелометрических измерений рассмотрена динамика изменения поляризационных и микроструктурных характеристик дымовых аэрозолей. Практика решения обратных задач аэрозольного светорассеяния по спектрофелометрическим данным показала, что для восстановления дисперсной структуры дымов смешанного состава необходимо более детальное определение показателя преломления частиц, чем в дымах пиролиза. Для адекватного восстановления спектра размеров смешанных дымов данные о комплексном показателе преломления должны быть уточнены как минимум для двух смежных интервалов шкалы размеров с промежуточной границей по радиусу частиц от 200 до 400 нм. Оценки показывают, что значения реальной и мнимой частей показателя преломления варьируются в зависимости от интервала размеров дымовых частиц.

*Ключевые слова:* дымы пиролиза и горения, оптические постоянные, методика восстановления; smoke particles, mixed composition, refractive index, optical properties.

### Введение

Основным условием для достижения режима пиролиза древесных материалов (ДМ) является ограничение доступа кислорода в камеру термического разложения (КТР) муфельной печи. Это позволяет при достаточно низкой температуре прогрева древесных образцов ( $T_{\text{п}} \sim 300\text{--}400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) обеспечить в основном только эмиссию и накопление в КТР прогретых паров смолистых соединений [1–4]. Анализ результатов обращения спектрофелометрических измерений, выполненный в [3, 4], показывает, что при поступлении прогретых паров смолистых соединений из КТР в относительно холодную аэрозольную камеру объемом  $\sim 1800\text{ м}^3$  формируются дисперсные смеси, в которых содержатся достаточно крупные, но слабо поглощающие частицы размером по радиусу  $r$  до 1,5–3 мкм и комплексным показателем преломления (КПП)  $m = n - i\chi \sim 1,55 - i \cdot 0,005$  [2, 3]. Свободный доступ кислорода в КТР ведет к заметному повышению температуры в зоне прогрева, возникает пламя, процесс приобретает признаки экзотермического [1] и переходит из стадии пиролиза в стадию горения.

С повышением температуры при горении ДМ происходят не только эмиссия смол, но и разрушение сложных органических соединений до углеводородных радикалов  $C_nH_m$  [1, 2], из которых формируется

тонкодисперсная поглощающая компонента аэрозолей (нанометрового диапазона), так называемый «black carbon», или сажевые частицы. Предварительные оценки эффективного значения КПП дисперсной смеси частиц показывают, что для дымов горения более характерны аэрозоли с  $m \sim 1,80 - i \cdot 0,80$  [5, 6].

Относительная невязка между измеряемыми в экспериментах с дымами горения спектрально-угловыми характеристиками светорассеяния и восстанавливаемыми из решения обратной задачи в предположении о независимости  $m$  от размера частиц значительно превышает уровень погрешности измерений. В этом случае относительная невязка между восстановленными и измеренными значениями исходных оптических характеристик в среднем находится на уровне 50%, а для отдельных углов рассеяния (в частности,  $\theta = 110, 135^{\circ}$ ) отклонения могут достигать 70–90%.

Причинами рассогласования могут быть такие факторы, как оптическое проявление несферичности частиц, влияние электрических полей, приводящих к преимущественной ориентации [7] или недостаточность предположения о независимости КПП от размера частиц и длины волны в дымах горения.

В настоящей статье обсуждается методика интерпретации данных дымовых экспериментов на основе решения обратной задачи, позволяющая учесть неоднородность состава сложных дымовых смесей от нескольких источников с разными режимами термического разложения [2–4], а именно изменчивость КПП по диапазонам дисперсности частиц.

\*Рустам Фуатович Рахимов (temur@iao.ru); Эдуард Васильевич Макиенко (mev@iao.ru).

## Методика и некоторые результаты

Методика определения параметров микроструктуры аэрозоля и показателя преломления частиц по данным спектрофелометрических измерений подробно изложена в [2, 3]. В частности, для определения функции  $s(r) = \pi r^2 n(r)$ , мкм · см<sup>-3</sup>, где  $n(r) = dN/dr$ , мкм<sup>-1</sup> · см<sup>-3</sup>, – плотность распределения счетной концентрации частиц по размерам, применяется регуляризирующий алгоритм, в котором искомая функция аппроксимируется некоторой ступенчатой функцией (гистограммой)  $s^*(r)$  [8]. Функция  $s^*(r)$  определяется на основе минимизации сглаживающего функционала:

$$F_\alpha(S, m) = \sum_j \eta_j \sum_i \left( \sum_l^k q_{jil} S_l - \beta_{ji} \right)^2 + \alpha \left[ p_0 \sum_l^k S_l^2 + p_1 \sum_l^{k-1} (\Delta S_{l+1,l})^2 \right], \quad (1)$$

где  $\beta_{ji} = \beta(\theta_j, \lambda_i)$  – измеряемые спектрофелометром значения коэффициентов направленного светорассеяния (КНС) под углом  $\theta_j$  и для длины волны  $\lambda_i$ ;  $p_0$  и  $p_1$  – масштабные коэффициенты;  $\alpha$  – параметр регуляризации;  $\{q_{jil}\}$  – элементы матрицы, рассчитываемые на основе квадратур [8] по эффективным значениям сечения направленного светорассеяния  $K(m, r, \theta_j, \lambda_i)$  аэрозольной частицы радиуса  $r$  для фиксированной сетки узлов  $\{r_l\}$  ( $l = 1, 2, \dots, k$ ), длины волны излучения  $\{\lambda_i\}$  ( $i = 1, 2, \dots, 9$ ) и углов рассеяния  $\theta_j$  ( $j = 1, 2, \dots, 5$ );  $m = n - i\chi$  – комплексный показатель преломления частиц;  $\eta_j$  – весовые множители, регулирующие относительную значимость используемых спектральных зависимостей, измеренных для различных углов рассеяния.

Компоненты вектора решения  $S_l$  представляют суммарное геометрическое сечение частиц на интервалах  $\Delta_l$  с границами:

$$r'_l = (r_{l-1} + r_l)/2; \quad r''_l = (r_{l+1} + r_l)/2, \\ r'_1 = (R_1 + r_1)/2 \quad \text{и} \quad r''_k = (R_2 + r_k)/2.$$

Левая граница  $R_1$  интервала решения  $R$  выбиралась априори из области значений  $0,03 \div 0,05$  мкм. Правая граница  $R_2$  находилась по модифицированной в [9] методике, предложенной в [8]. Значение  $s_l$  ступенчатой функции  $s^*(r)$  на интервале  $\Delta_l$  определяется отношением  $S_l/\Delta_l$ . Величина параметра регуляризации выбиралась по критерию «квазиоптимального» значения [10] на основе анализа поведения нормы отклонения двух последовательных регуляризованных решений для убывающей последовательности значений  $\alpha$ .

Исследование факторов, определяющих микроструктуру древесных дымов и специфику их трансформации в большой аэрозольной камере [3, 4], показало, что оптические свойства дисперсных смесей низкотемпературного пиролиза ( $T_n \sim 300 \div 400$  °С) определяются в основном слабо поглощающими аэро-

зольными частицами с вещественной частью комплексного показателя преломления в диапазоне  $1,52 \div 1,58$  и мнимой частью  $\sim 0,005$ . Для дымов пиролизной генерации из различных пород ДМ независимая от размера частиц оценка КПП оказалась достаточной для удовлетворительного решения обратной задачи. Достижимый уровень невязки между измеренными и восстановленными оптическими характеристиками обычно не превышал уровня 10%, что является приемлемым при имеющихся погрешностях спектрофелометрических измерений.

При интерпретации данных спектрофелометрических измерений в дымах низкотемпературного пиролиза применялся алгоритм [8, 11], основанный на методе последовательных приближений, в котором параметры микроструктуры дисперсной смеси определялись путем минимизации функционала (1) при фиксированных значениях  $m$ . Получаемые регуляризованные решения  $s^*(r)$  использовались для нахождения уточненных оценок  $m^*$  из условия минимума по  $m$  невязки между измеренными и восстановленными оптическими характеристиками.

Общая схема процедуры определения параметров микроструктуры и показателя преломления частиц в смешанных дымах остается той же, что и для дымов пиролиза. В предположении независимости КПП от размера частиц находится первое приближение  $s^*(r)$  и  $m^*$ . На следующем этапе предполагается, что полученная оценка  $m^*$  соответствует среднему и грубодисперсному аэрозолю и находится новое приближение  $s^*(r)$  на всем интервале дисперсности дымовых частиц из условия минимума функционала (1) и уточненная оценка  $m^*$  для тонкодисперсной фракции частиц из условия минимума невязки по параметру  $m$ . При найденном значении  $m^*$  по аналогичной схеме находятся новое приближение  $s^*(r)$  и оценка  $m^*_{сд}$  для среднедисперсной и при необходимости  $s^*(r)$  и  $m^*_{гд}$  для грубодисперсной фракции.

На каждом этапе поиск приближения  $s^*(r)$  и  $m$  проводится по итерационному алгоритму до выполнения условий

$$\|s_{k+1} - s_k\| < \eta_1 \sigma; \quad |n_{k+1} - n_k| < \eta_2 \sigma; \quad |\chi_{k+1} - \chi_k| < \eta_3 \sigma,$$

где  $k$  – номер итерации;  $\eta_1, \eta_2, \eta_3$  – некоторые доверительные коэффициенты;  $\sigma$  – погрешность оптических измерений;  $n$  и  $\chi$  – вещественная и мнимая части КПП.

Границы фракций определялись из физических соображений с учетом известных данных по микроструктуре дымовых аэрозолей (см., например, [6]) и уточнялись на каждом этапе по фактически восстановленным распределениям  $s^*(r)$ .

Рассмотрим результаты дымового эксперимента в большой аэрозольной камере (БАК) ИОА СО РАН (объемом 1800 м<sup>3</sup>), в котором коэффициенты направленного светорассеяния дымовой смеси  $\beta(\theta_j, \lambda_i)$  регистрировались с помощью автоматизированного поляризационного спектрофелометра [6].

Измерения проводились на пяти углах рассеяния  $\theta_j = 15; 45; 110; 135; 165^\circ$  и девяти длинах волн  $\lambda_i$ , в интервале  $\sim 0,44 \div 0,69$  мкм. Поскольку спектральный

интервал, на котором проводятся нефелометрические измерения, охватывает относительно узкий (видимый) диапазон оптического излучения, в последующих оценках КПП спектральные изменения мнимой и действительной частей  $m$  не рассматриваются.

Для формирования смешанного дыма процесс задымления БАК состоял из двух этапов. На первом этапе в результате низкотемпературного разложения 375 г ДМ (сосны) внутри КТР муфельной печи в режиме пиролиза формировалась концентрированная дымовая смесь, которая в виде конвективной струи поступала в БАК, где постепенно рассеивалась.

На рис. 1 представлена временная развертка значений КНС, измеренных спектрофелометром под углом  $\theta_j = 15^\circ$  и на длинах волн  $\lambda_i = 0,48; 0,56; 0,66; 0,69$  мкм.

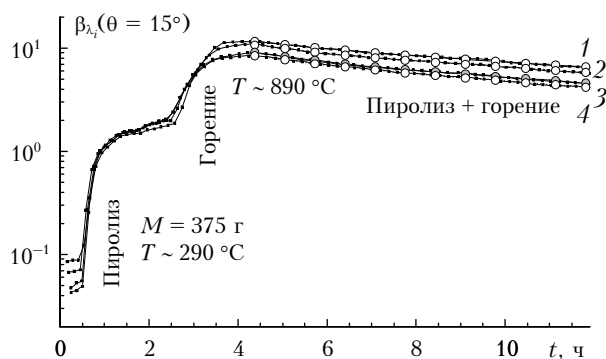


Рис. 1. Временная развертка значений КНС, измеренных спектрофелометром на  $\lambda = 0,48; 0,56; 0,66; 0,69$  мкм (кривые 1–4 соответственно) для угла рассеяния  $\theta = 15^\circ$

На рис. 2 приведены восстановленные распределения  $dS/dr$ , которые сформировались на первом «пиролизном» этапе эксперимента при температуре 290 °C. Результаты получены из обращения данных

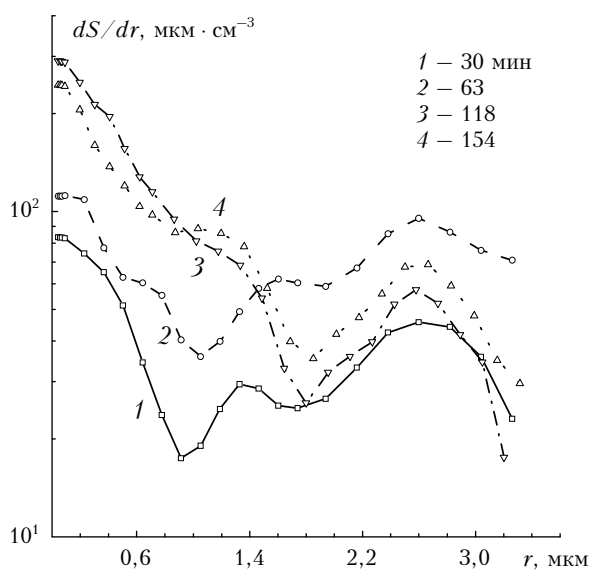


Рис. 2. Восстановленные распределения геометрического сечения частиц по размерам для дыма пиролиза обработанных древесных образцов сосны (без коры)

нефелометрических измерений во временном интервале от 30 по 154 мин (рис. 3), т.е. в течение первых 3 ч от начала эксперимента.

Анализ результатов обращения спектрофелометрических данных, измеренных на начальном этапе эксперимента, показывает, что при низких температурах и продолжительном накоплении паров эмиссии (летучих смол) в камере термического разложения в БАК поступает значительная доля крупных дымовых частиц  $r \sim 1,5$  мкм. Содержание крупных частиц в спектре дымовых аэрозолей продолжает увеличиваться примерно 1 ч. Накопление мелких частиц проявляется с задержкой примерно 20–30 мин. Через 1 ч на фоне роста тонкодисперсной с  $r < 0,35$  мкм и среднелдисперсной ( $0,3 < r < 0,9$  мкм) фракций доля крупных частиц начинает постепенно уменьшаться. Это объясняется более эффективным оседанием крупных частиц (по сравнению с мелкими) в магистралях подачи дымовой смеси в камеру оптических измерений спектрофелометра и в магистралях, по которым обедненная дымовая смесь возвращается в БАК.

Как видно из представленных на рис. 3 кривых, на этапе генерации дыма пиролиза для восстановления искомого распределений частиц по размерам можно ограничиться оценками на основе одного «эффективного» для всего диапазона дисперсности значения КПП. Поиск минимума невязки между измеренными и восстановленными спектральными значениями коэффициентов направленного светорассеяния позволил получить осредненную для всей дымовой смеси оценку  $m \sim 1,600 - i \cdot 0,003$  и достичь величины относительной невязки  $\sim 10-15\%$ .

В то же время аналогичные дымовые эксперименты в БАК показывают [4], что при повышении температуры в КТР от 350 до 500 °C в режиме пиролиза в составе дыма также появляются частицы с заметным поглощением ( $\chi \sim 0,01 \div 0,03$ ), при дальнейшем повышении температуры их доля может нарастать. По-видимому, даже при пониженном доступе кислорода в зону прогрева древесных образцов (режиме пиролиза) продолжительное пребывание паров эмиссии (органических соединений, смол) в хорошо прогретой КТР оказывается достаточным, чтобы некоторая часть продуктов эмиссии при температуре 400–500 °C распадалась до углеводородных радикалов, формируя таким образом дымы смешанного состава.

Затруднения в решении обратной задачи без учета изменчивости КПП по спектру размеров частиц по данным спектрофелометрических измерений, полученным при повышенной температуре пиролиза, хотя и возрастали, увеличивалась невязка между измеренными и восстановленными данными, но тем не менее она оставалась на приемлемом для адекватных оценок уровне 15–20% [4].

При интерпретации спектрофелометрических данных, измеренных в дымах горения, ситуация с применением традиционной методики решения обратных задач аэрозольного светорассеяния становится еще более проблематичной. Уровень отклонений между измеренными и восстановленными оптическими характеристиками для отдельных углов рассеяния возрастает до  $\sim 80-90\%$  (рис. 4, на углах рассеяния  $\theta_j = 110; 135^\circ$ ).

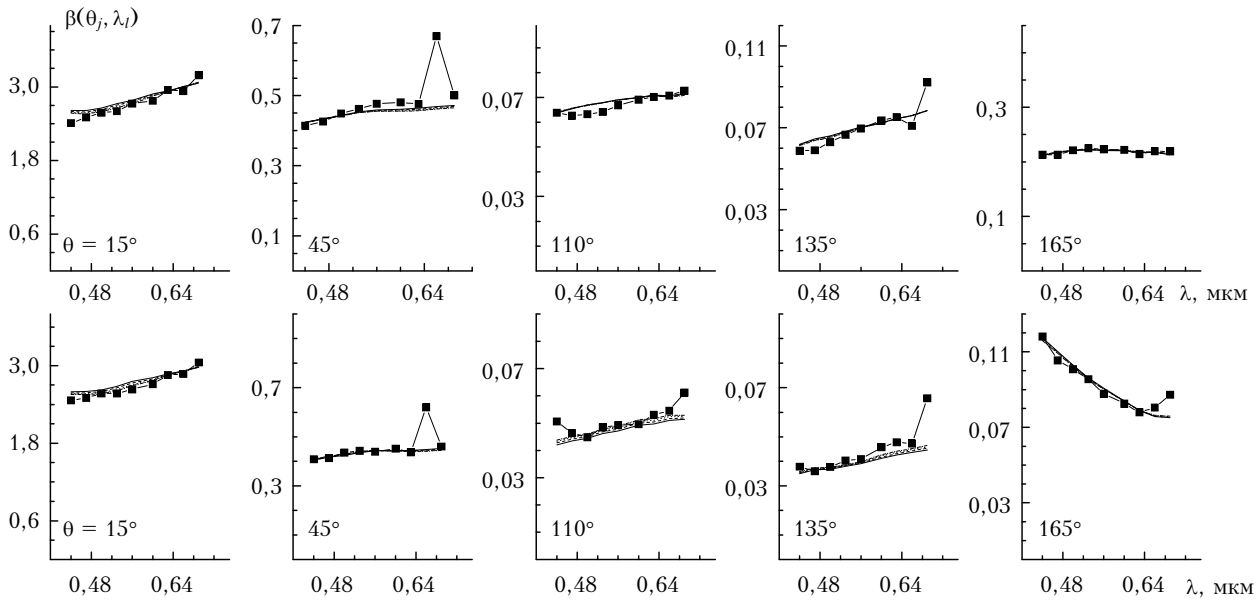


Рис. 3. Спектральные зависимости поляризационных компонент КНС, измеренные на пяти углах  $\theta = 15; 45; 110; 135; 165^\circ$  (квадраты) для дыма пиролиза в сравнении с восстановленными данными. Здесь (и на рис. 4 и 6) верхний ряд рисунков соответствует значениям КНС ортогонально поляризованной компоненты, нижний ряд – параллельной

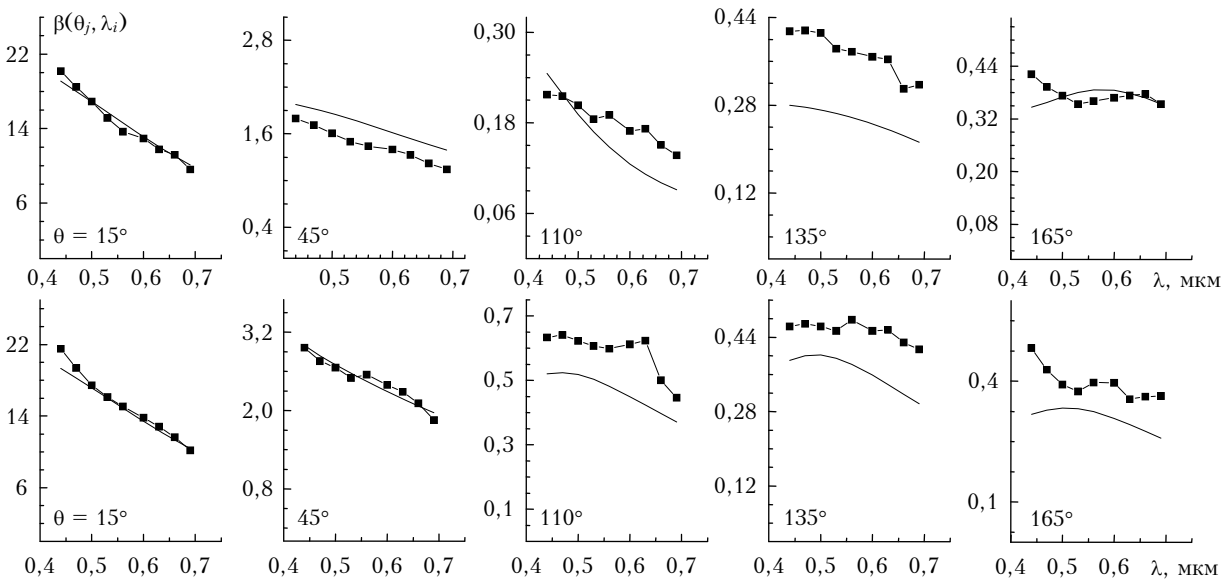


Рис. 4. Спектральные значения поляризационных компонент коэффициентов направленного светорассеяния, измеренные на пяти углах  $\theta = 15; 45; 110; 135; 165^\circ$  (квадраты), для дыма горения в сравнении с восстановленными данными (сплошные линии)

В частности, после добавления в БАК продуктов горения (см. рис. 1) значения оптических сигналов на всех длинах волн спектрального диапазона 0,48–0,69 мкм переходят на все более высокий уровень, что естественно при увеличении общего количества дыма. Значение коэффициента направленного светорассеяния, измеренного на длине волны 0,48 мкм, становится выше, чем на длине волны 0,69 мкм, т.е. для большинства углов рассеяния качественно меняется наклон спектральных зависимостей с ростом длины волны. Таким образом (даже не решая обрат-

ную задачу в полном объеме), можно заключить, что в составе смешанных дымов растет оптическое влияние дымовых частиц относительно малых размеров, их содержание существенно увеличивается.

Решение обратной задачи по данным спектро-нефелометрических измерений на втором этапе эксперимента для дыма смешанного состава, в предположении о постоянстве значений  $m$  во всем диапазоне дисперсности, приводит (как и для дымов горения, см. рис. 4) к существенным расхождениям между измеренными и восстановленными оптическими

характеристиками  $\beta(\theta_j, \lambda_i)$ , для углов рассеяния  $\theta_j = 110; 135$  и  $165^\circ$ . Здесь уровень невязки не снижается ниже 55%.

При решении обратной задачи по тем же исходным данным с уточнением  $m$  в двух диапазонах дисперсности (для тонкодисперсных частиц в области  $r < 0,3$  мкм и для средне- и грубодисперсных с  $r > 0,3$  мкм) относительную невязку в отдельных реализациях удается понизить до уровня 25–30%.

Дополнительным аргументом предлагаемого подхода к понижению относительной невязки служит и то обстоятельство, что при интерпретации спектро-нефелометрических данных, измеренных в дымах пиролиза, рассогласование измеренных и восстановленных оптических данных возрастает в первую очередь в тех экспериментах, в которых мнимая часть КПП (оцениваемая по традиционной методике) также увеличивается.

Уточняющие численные оценки показали, что интервал размеров поглощающей фракции варьирует и охватывает по совокупности рассмотренных экспериментов интервал значений по  $r$  от 0,08 до 0,20 мкм, т.е. находится внутри аккумулятивной фракции.

Представленная выше методика определения параметров микроструктуры аэрозоля по данным спектро-нефелометрических измерений с уточнением  $m$  в трех диапазонах дисперсности была применена для интерпретации данных первого и второго этапов эксперимента. Полученные результаты приведены в таблице.

Для тонкодисперсных аэрозолей в дымах пиролиза ( $t = 30; 154$  мин) изменения показателя преломления оказались существенными по сравнению с оценками  $m$  без разделения по аэрозольным фракциям и достигли значений  $\chi = 0,070 \div 0,080$ . Оценки показателя преломления для более крупных частиц изменились незначительно. В частности, мнимая часть уменьшилась на 30–35% и несколько возросла действительная часть. В связи с низкой концентрацией тонкодисперсных поглощающих аэрозолей их оптическое влияние проявляется достаточно слабо. Относительная невязка между восстановленными и измеренными значениями исходных оптических характеристик для уточненных значений  $m$  находи-

лась на уровне 7–9% (при традиционной методике без разделения  $m$  по дымовым фракциям) ~ 12–15%.

Для дымов смешанного состава оценки  $m$  в трех диапазонах дисперсности представлены в таблице для  $t = 244; 479; 1004$  мин. Как видно, в составе смешанных дымов присутствуют тонкодисперсные частицы с повышенным поглощением ( $m_1 = 1,72 - i \cdot 0,38$ ), близким к значениям КПП сажи  $m = 1,74 - i \cdot 0,95$  [6]. Уровень невязки между восстановленными оптическими характеристиками и измеренными в этом случае снизился до 13–21%.

Распределения  $dS/dr$ , восстановленные по оптическим данным второго этапа эксперимента, после пополнения БАК дымами горения представлены на рис. 5 (кривые 2–4).

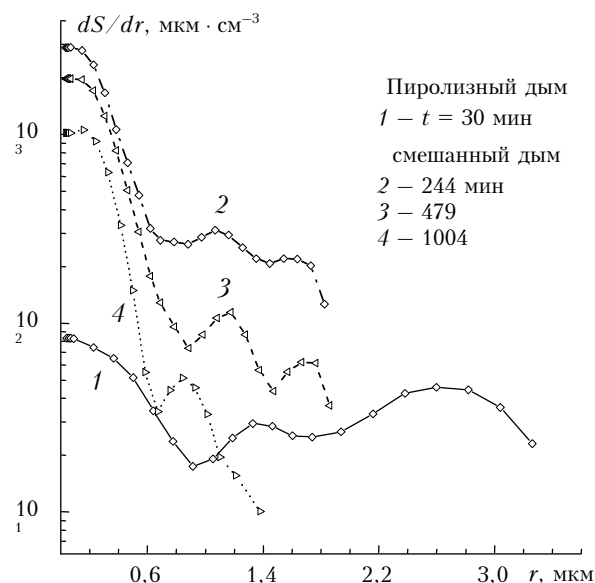


Рис. 5. Распределения геометрического сечения частиц по размерам, восстановленные на этапе перехода пиролизного дыма к смешанному (пиролиз + горение) после пополнения БАК продуктами горения

Здесь же для сравнения приведено распределение (кривая 1), восстановленное для первого этапа эксперимента. Наиболее существенные изменения прослеживаются в интервале размеров 0,05–0,7 мкм.

$t$ , мин	Интервал размеров					
	I		II		III	
1	2	3	4	5	6	7
30	$r_n = 0,03$ $n = 1,75$	$r_k = 0,089$ $\chi = 0,070$	$r_n = 0,090$ $n = 1,58$	$r_k = 0,250$ $\chi = 0,090$	$r_n = 0,251$ $n = 1,62$	$r_k = 3,48$ $\chi = 0,001$
154	$r_n = 0,03$ $n = 1,80$	$r_k = 0,089$ $\chi = 0,080$	$r_n = 0,090$ $n = 1,53$	$r_k = 0,250$ $\chi = 0,075$	$r_n = 0,251$ $n = 1,61$	$r_k = 3,36$ $\chi = 0,001$
244	$r_n = 0,03$ $n = 1,72$	$r_k = 0,094$ $\chi = 0,38$	$r_n = 0,095$ $n = 1,60$	$r_k = 0,29$ $\chi = 0,004$	$r_n = 0,291$ $n = 1,550$	$r_k = 1,92$ $\chi = 0,006$
479	$r_n = 0,03$ $n = 1,64$	$r_k = 0,094$ $\chi = 0,34$	$r_n = 0,095$ $n = 1,59$	$r_k = 0,29$ $\chi = 0,003$	$r_n = 0,291$ $n = 1,54$	$r_k = 1,96$ $\chi = 0,005$
1004	$r_n = 0,03$ $n = 1,52$	$r_k = 0,094$ $\chi = 0,32$	$r_n = 0,095$ $n = 1,58$	$r_k = 0,29$ $\chi = 0,001$	$r_n = 0,291$ $n = 1,54$	$r_k = 1,55$ $\chi = 0,003$

Примечание. Жирным выделены значения КПП.

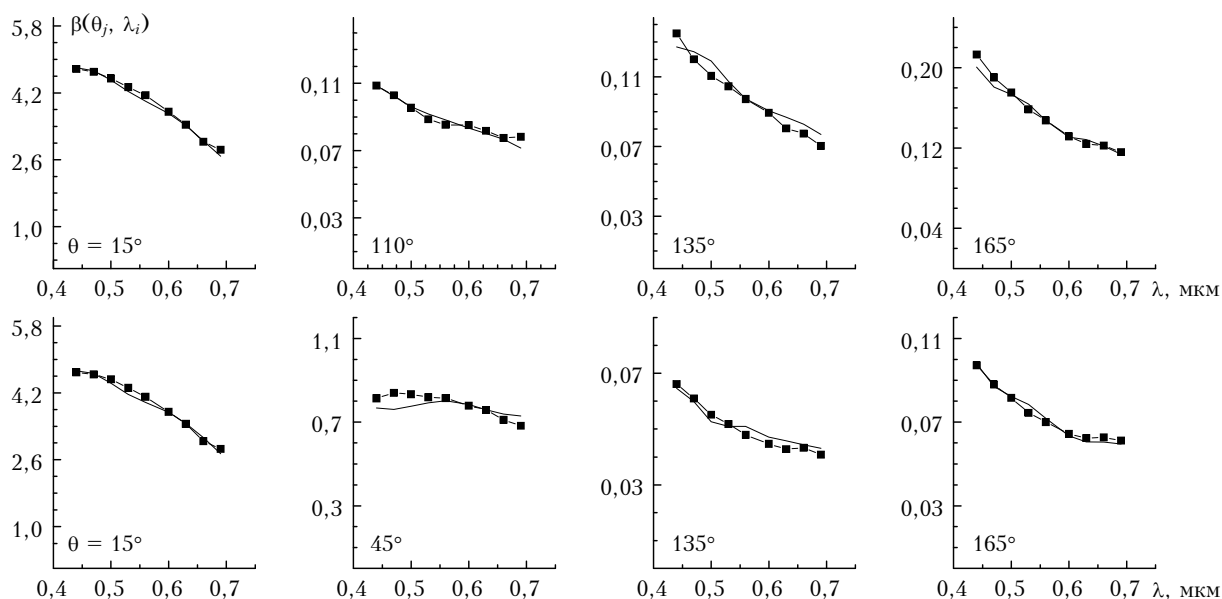


Рис. 6. Измеренные спектральные зависимости поляризационных компонент коэффициентов направленного светорассеяния на четырех углах  $\theta = 15; 45; 135; 165^\circ$  (квадраты) для смешанных дымов в сравнении с восстановленными из решения обратной задачи по методике с уточненной оценкой КПП на трех интервалах дисперсности частиц

Таким образом, при горении наблюдается резкий рост измеряемых сигналов с 3–4,5 ч (см. рис. 1), добавляются в основном частицы с  $r < 0,7$  мкм (см. рис. 5). Средние по интервалу размеров частиц значения КПП:  $m_1 = 1,72 - i \cdot 0,380$  для  $r < 0,09$  мкм;  $m_2 = 1,60 - i \cdot 0,004$  для  $0,09 < r < 0,25$  мкм и  $m_3 = 1,50 - i \cdot 0,012$  для частиц размерами  $0,25 < r < 1,95$  мкм.

Высокий уровень счетной концентрации мелких поглощающих частиц в составе смешанных дымов (пиролиз + горение) может стать причиной наблюдаемой (см. таблицу) динамики изменения КПП на интервале размеров средне- и грубодисперсной фракции. В таблице указаны границы интервала радиусов (начальное  $r_n$  и конечное  $r_k$ , мкм), для которого оценивался эффективный показатель преломления частиц.

На начальном этапе смешивания дымов пиролиза и горения значения мнимой части показателя преломления в среднелдисперсном диапазоне размеров (колонки 4, 5) оказались несколько выше, чем для более крупных частиц (см. колонки 6, 7), особенно в дымах пиролиза. На последующих стадиях поглощение в составе крупных частиц более существенное, чем в среднелдисперсном диапазоне, т.е. в смешанных дымах, как в неравновесной дисперсной смеси, тонкодисперсная сажа, оседая и накапливаясь в составе более крупных частиц, обнаруживает признаки миграции по шкале размеров в состав более крупных частиц.

Содержание крупных частиц с  $r > 2,0$  мкм восстановить не удастся. Возможно, это связано с электризацией дымовых частиц в процессе горения и усилением стока крупных частиц в магистралях, обеспечивающих поступление их в камеру спектрофелометра. Для проверки данной гипотезы необходимы целенаправленные эксперименты, дополненные воз-

действием электростатических полей в магистралях поступления дымовой смеси в камеру спектрофелометра.

На рис. 6 показана степень соответствия измеренных и восстановленных значений спектрально-угловых коэффициентов светорассеяния  $\beta(\theta_j, \lambda_i)$ , в частности для  $t = 1004$  мин.

Как видно из рис. 6, при определении параметров микроструктуры смешанного дыма с оценкой КПП в трех диапазонах дисперсности достигается удовлетворительное согласие измеренных и восстановленных спектральных зависимостей оптических характеристик для все углов рассеяния.

## Заключение

Применение уточненной методики оценки КПП по диапазонам дисперсности аэрозоля в смешанных дымах (пиролиз + горение) позволяет приблизить расчетные спектрально-угловые характеристики, полученные при решении обратной задачи, к измеренным в БАК как по абсолютной величине, так и по спектральному ходу коэффициентов направленного светорассеяния  $\beta(\theta_j, \lambda_i)$ .

Для большинства экспериментов со смешанными дымами восстановление параметров микроструктуры аэрозоля с учетом изменчивости КПП по диапазонам дисперсности частиц позволяет обеспечить невязку оптических характеристик на уровне 10–15%.

Однако в отдельных экспериментах, особенно при повышении в составе дисперсной смеси дымов горения, не удается обеспечить приемлемый уровень аппроксимации оптических характеристик, что может быть обусловлено неучетом влияния фактора несферичности дымовых частиц или грубыми «промахами» в процессе измерений.

Полученные оценки показывают, что наличие в составе смешанных дымов тонкодисперсной поглощающей компоненты проявляет себя в постепенном повышении мнимой части показателя преломления в интервале размеров средне- и грубодисперсной фракций (см. таблицу), что свидетельствует об активной миграции сажевых частиц по шкале размеров при продолжительном выстаивании дымов внутри БАК. Взаимодействие сажи и умеренно поглощающих дымовых частиц может привести к формированию сложных дымовых смесей не только по спектру размеров, но и с заметной вариацией диэлектрических постоянных по фракциям.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 06-05-64842, 09-05-00064).

1. Канев Э.В. Физические основы горения растительных материалов. Новосибирск: Наука, 1977. 239 с.
2. Рахимов Р.Ф., Козлов В.С., Макиенко Э.В. Некоторые особенности формирования дисперсной структуры дымовых аэрозолей при термическом разложении хвойной древесины. 1. Вариации массы сжигаемых образцов // Оптика атмосф. и океана. 2008. Т. 21. № 3. С. 218–222.
3. Рахимов Р.Ф., Козлов В.С., Макиенко Э.В. Некоторые особенности формирования дисперсной структуры дымовых аэрозолей при термическом разложении хвойной древесины. 2. Вариации температуры // Оптика атмосф. и океана. 2008. Т. 21. № 4. С. 288–293.
4. Рахимов Р.Ф., Козлов В.С., Макиенко Э.В. Некоторые особенности формирования дисперсной структуры

дымовых аэрозолей при термическом разложении хвойной древесины. 3. Дожигание неразложившихся остатков // Оптика атмосф. и океана. 2008. Т. 21. № 5. С. 386–392.

5. Рахимов Р.Ф., Макиенко Э.В., Козлов В.С. Микрофизические особенности формирования дымовых аэрозолей при дожигании древесных углей // 7-я Междунар. конф. «Математическое моделирование опасных природных явлений и катастроф»: Матер. конф. Томск: ТГУ. 30 июня – 4 июля 2008. С. 93–94.
6. Козлов В.С., Панченко М.В., Шмаргунов В.П., Рахимов Р.Ф. Влияние режима горения на изменчивость концентраций субмикронного аэрозоля и сажи в древесных дымах в аэрозольной камере большого объема // Изв. вузов. Физ. 2009. № 2/2. С. 128–132.
7. Пхалагов Ю.А., Ипполитов И.И., Нагорский П.М., Одицов С.Л., Панченко М.В., Смирнов С.В., Ужegov В.Н. Связь аномальных атмосферных условий с изменчивостью электрического поля // Оптика атмосф. и океана. 2009. Т. 22. № 1. С. 25–30.
8. Зуев В.Е., Наац И.Э. Обратные задачи лазерного зондирования атмосферы. Новосибирск: Наука, 1982. 195 с.
9. Веретенников В.В. Интерпретация модели спектрального ослабления дымки морского прибрежного района // Оптика атмосф. 1990. Т. 3. № 10. С. 1026–1033.
10. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных обратных задач. М.: Наука, 1974. 224 с.
11. Макиенко Э.В., Наац Э.В. Обратные задачи аэрозольного светорассеяния применительно к лазерной локации атмосферных загрязнений приземного слоя // Проблемы дистанционного зондирования атмосферы. Томск: Изд. ИОА СО АН СССР, 1976. С. 42–51.

***R.F. Rakhimov, E.V. Makienko. Some methodical additions to the solution of the inverse problem of retrieving the dispersion structure parameters of smokes of mixed composition.***

Dynamics of variations of the polarization and microstructural characteristics of smoke aerosols is considered based on spectral nephelometric measurements. The practice of solution of the inverse problems of aerosol light scattering using the spectral nephelometric data has shown that more detailed determination of the refractive index of particles is necessary for retrieval of the disperse structure of the smokes of mixed composition, than for the smokes of pyrolysis. To adequately retrieve the size spectra of mixed smokes, the data on CRI should be determined at least in two neighbor size ranges with intermediate boundary for the particle radii from 200 to 400 nm. The estimates show that the values of the real and imaginary parts of the refractive index vary depending on the size of smoke particles.