

Р.Ф. Рахимов, Э.В. Макиенко, В.С. Козлов, М.В. Панченко, В.П. Шмаргунов

Методика и некоторые результаты исследования дымов в большой аэрозольной камере

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 22.12.2006 г.

Обсуждаются некоторые методические особенности проведения и интерпретации результатов дымовых экспериментов в большой аэрозольной камере. Эксперименты с дымами показали, что, несмотря на достаточно стабильные условия развития дымов в большой аэрозольной камере, микроструктура дымов испытывает существенные качественные и количественные изменения. В рамках замкнутого численного эксперимента показано, что успех при интерпретации спектрофелометрических данных существенно зависит от точности предварительной оценки среднеэффективного комплексного показателя преломления дымовых частиц. Анализ результатов некоторых дымовых экспериментов позволяет предположить, что применяемая методика обеспечивает возможность адекватной оценки эффективного показателя преломления и спектра размеров частиц при наличии случайной аппаратурной погрешности измерений, не превышающей 10–14%.

Оценки эффективных значений показателя преломления показывают, что в дымах могут присутствовать как слабопоглощающие частицы, так и приближающиеся по своим свойствам к характеристикам сажи. В динамике изменения характерного размера дымовых частиц на разных интервалах шкалы размеров проявляются разнообразные тенденции, обусловленные возникновением разных пропорций в содержании частиц среднедисперсного диапазона размеров.

Введение

Ранее в [1–3] анализ микроструктурных изменений дымовых аэрозолей проводился на основе лабораторных экспериментов в малой аэрозольной камере объемом 100 л. В ходе указанных экспериментов обнаружилось, что при относительно небольшом объеме камеры накопления дымовых частиц эффективность процесса оседания (стока) аэрозолей на стенки камеры, поверхность трубок, обеспечивающих подачу дисперсной смеси в камеру измерений спектрофелометра, превалирует над другими факторами микроструктурных изменений. Вследствие этого циклы спектрофелометрических измерений оказались непродолжительными ~2–3 ч. Проследить последствия более длительных процессов в дисперсной смеси вследствие ограниченной чувствительности оптического прибора не представлялось возможным.

В настоящей статье микроструктурные изменения дымов исследовались в замкнутом объеме большой аэрозольной камеры объемом 1800 м³. Это позволило заметно увеличить продолжительность наблюдений до ~70 ч, расширить список исследуемых факторов, влияющих на специфику микроструктурных изменений дымов.

В ходе экспериментов были рассмотрены механизмы образования дымов при различных режимах термического разложения древесных материалов. Изучена специфика разложения древесных материалов в режиме горения (с возникновением пламени при свободном доступе кислорода), а также в результате пиролиза. Рассмотрены микроструктурные изменения дымов при вариациях массы сжигаемых образцов

и температуры разложения. Увеличение длительности наблюдаемых процессов, неоднородное заполнение большого объема аэрозольной камеры продуктами горения потребовали изучения некоторых методических особенностей постановки лабораторных экспериментов. В данной статье рассмотрены дополнения к методике организации лабораторных и замкнутых численных экспериментов при анализе результатов измерений.

Методика исследования

Для оптической диагностики микроструктурных изменений в качестве исходной информации были использованы результаты измерений поляризационных компонент коэффициента направленного светорассеяния древесных дымов $\beta_s^q(\lambda)$ в контролируемых условиях с помощью поляризационного спектрофелометра на девяти длинах волн в интервале 0,44–0,69 мкм под углами рассеяния $\theta = 15; 45; 110; 135; 165^\circ$.

Таким образом, в эксперименте последовательно измерялось 90 значений поляризационных компонент коэффициента направленного светорассеяния (КНС), которые использовались для решения обратной задачи. Процесс измерения осуществлялся в автоматизированном режиме. Управление режимом регистрации параметров светорассеяния осуществлялось компьютером на основе разработанного алгоритма, с пофайловым процессом накопления оптических данных в экспериментах разной направленности. Полный цикл измерений КНС как функции угла рассеяния и длины волны составлял 8–9 мин,

что потребовало применить методику предварительного сглаживания и синхронизации измеренных данных. С этой целью временные развертки измеренных значений $\beta_s^0(\lambda)$ для отдельных углов рассеяния и длин волн аппроксимировались полиномами (в линейном или логарифмическом масштабе, в зависимости от темпа микроструктурных изменений) и измеренные одновременно оптические характеристики пересчитывались на один момент времени.

Используемый подход позволил снизить погрешность одновременной регистрации оптических параметров, сгладить флуктуации оптических сигналов, возникающих вследствие пространственной неоднородности распределения дымовых фракций (при малых коэффициентах диффузии), а также электронных шумов измерительного тракта. Таким образом, микроструктурные параметры оценивались с некоторым объемным осреднением.

В экспериментах применялась невысокая скорость подачи дисперсной смеси в камеру нефелометра, поэтому объем пространственного осреднения практически совпадал с объемом камеры нефелометра и составлял ~ 5 л.

На заключительных этапах экспериментов (при малых оптических плотностях дисперсной смеси) применяемая методика позволила минимизировать влияние различных помех (шумов) измерительного тракта (фотоприемников высокой чувствительности ФЭУ-84-3).

На рис. 1 представлены пример временной развертки значений $\beta_s^0(\lambda)$ и соответствующие модельные аппроксимации полиномом шестой степени (обозначены кружочками).

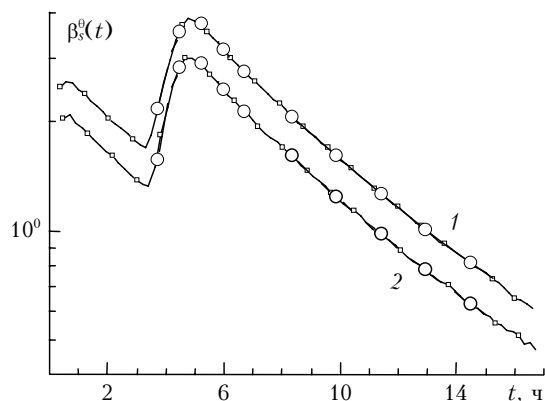


Рис. 1. Временная развертка сигналов спектрофелометра для угла рассеяния $\theta = 110^\circ$, измеренных при $\lambda = 0,53$ (кривая 1); $0,69$ мкм (кривая 2). Кружочками указаны точки синхронизации, квадратиками — моменты регистрации сигналов. (Двукратная загрузка муфельной печи древесными образцами)

Нерегулярность изменения экспериментальных данных возникла вследствие необходимости двукратной загрузки муфельной печи древесными образцами, суммарная масса которых составила 2 кг.

Для оценки возможных шумов измерительного тракта, а также характерного уровня оптических сигналов в отсутствие дымов был осуществлен предварительный эксперимент. В ходе этого эксперимента были проведены продолжительные (10 ч и более) измерения сигналов при заборе дисперсной смеси

из атмосферы за пределами лабораторного корпуса, при свободном доступе, и через набор аэрозольных фильтров (АФА ХП), обеспечивающих эффективный отбор аэрозолей размерами более 10 нм. Таким образом, удалось изучить возможные шумы регистрации оптических сигналов и фоны камеры спектрофелометра. Соответствующие результаты показаны на рис. 2.

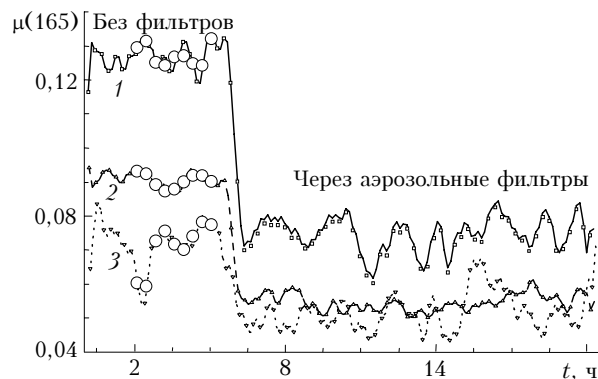


Рис. 2. Временная развертка фоновых сигналов спектрофелометра $\mu(\theta)$ для угла рассеяния $\theta = 165^\circ$ с использованием аэрозольных фильтров и без них. Сигналы измерены на $\lambda = 0,44; 0,50; 0,63$ мкм — кривые 1—3 соответственно. Кружочками указаны точки синхронизации

Результаты экспериментов в большой аэрозольной камере показали, что обычный уровень оптических сигналов, регистрируемый (на углах $\theta \approx 110-135^\circ$) на заключительных стадиях выстаивания дымов, соответствует значениям коэффициентов направленного светорассеяния $\sim 0,04-0,08$ км $^{-1}$, что приближается к уровню сигналов (см. рис. 2). Фактически потенциал чувствительности спектрофелометра позволяет для решения обратной задачи светорассеяния использовать оптические сигналы, измеренные на временных рядах продолжительностью не менее $\sim 60-70$ ч от начала процесса пиролиза. Некоторое увеличение длительности экспериментов возможно как результат увеличения исходной массы сжигаемых древесных образцов.

Таким образом, на указанных временных интервалах измерений шумы измерительного тракта остаются пренебрежимо малыми по сравнению с абсолютной величиной регистрируемых сигналов аэрозольного светорассеяния, а следовательно, последние могут быть использованы для анализа микроструктурных изменений дымов на основе методов решения обратной задачи.

Результаты экспериментов показывают, что эффективность генерации дымовых частиц используемой муфельной печью оказалась достаточной для того, чтобы равномерно заполнить аэрозольную камеру дисперсной смесью за 1—2 ч. На этом этапе измерений вследствие неоднородности пространственного заполнения наблюдается наибольшее рассогласование сигналов, регистрируемых для разных углов и длин волн, а также компонент поляризации рассеянного излучения. Нестабильность исследуемой среды в этот период измерений приводит к повышенной зависимости результатов решения обратной задачи от эффективности

методики синхронизации и степени предварительного сглаживания результатов измерений. Повышение степени сглаживания ведет к увеличению объема дисперсной смеси, по которому проводится осреднение оптических характеристик дыма.

На следующих стадиях эксперимента возрастает равномерность заполнения дымом аэрозольной камеры и регистрируемые сигналы приобретают все более согласованную и относительно сглаженную динамику временных изменений. Некоторые особенности синхронизации данных проявлялись при анализе результатов экспериментов, в которых рассматривались последствия смещения дымов разных режимов генерации.

Методика замкнутого численного моделирования

Апробация развиваемого подхода и методов решения обратной задачи в рамках замкнутых численных экспериментов показывает [2], что эффективность интерпретации спектрофелометрических данных существенно зависит от точности предварительной оценки среднеэффективного комплексного показателя преломления (КПП) дымовых частиц. При дефиците априорной информации относительно показателя преломления возникает необходимость в проведении предварительных численных расчетов параметров аэрозольного светорассеяния. Ранее в [1] для предварительного анализа результатов спектрофелометрических измерений оптических свойств дымов в экспериментах с малой дымовой камерой нами привлекались данные целенаправленного прямого численного моделирования параметров аэрозольного светорассеяния. Сопоставление окрестности вариаций параметров, характеризующих форму поляризационной индикатрисы рассеяния (степень ее вытянутости вперед и назад) [4], с результатами модельных оценок позволяет в ряде случаев оценить окрестность вариации среднеэффективного значения КПП дымовых частиц.

Поэтому прежде чем восстанавливать спектр размеров дымовых частиц из данных спектрофелометрических измерений была проведена серия численных экспериментов с тем, чтобы уточнить геометрическое место точек, определяющих параметры вытянутости формы дымовой индикатрисы рассеяния. По этим данным устанавливалась окрестность вариаций значений КПП. Поскольку при этом использовались как методы прямого моделирования параметров аэрозольного светорассеяния, так и методы решения обратной задачи, эти численные оценки в совокупности образовывали замкнутый численный эксперимент. Результаты прямого численного моделирования использовались как начальные точки для оценки КПП на основе поиска минимума сглаживающего функционала Тихонова [5], который применительно к рассматриваемой обратной задаче записывается в виде функционала (1), приведенного ниже. Метод определения параметров микроструктуры аэрозоля и показателя преломле-

ния частиц по данным комплексных оптических экспериментов подробно изложен в [6]. Некоторые результаты его применения в исследовании дымовых аэрозолей по данным поляризационной спектрофелометрии приведены в [2, 3, 7].

Для определения функции

$$s(r) = \pi r^2 n(r) \text{ [мкм/см}^3\text{]},$$

где $n(r) = dN/dr$ – плотность распределения счетной концентрации частиц по размерам ($\text{мкм}^{-1}/\text{см}^3$), применялся регуляризирующий алгоритм, основанный на приближенной аппроксимации искомой функции некоторой ступенчатой гистограммой $s^*(r)$ [6]. Функция $s^*(r)$ определяется на основе минимизации сглаживающего функционала:

$$F_\alpha = \sum_i^5 \eta_i \sum_j^9 \left(\sum_l^k q_{jl} S_l - q_j \right)^2 + \alpha \left[p_0 \sum_l^k S_l^2 + p_1 \sum_l^{k-1} (\Delta S_{l+1,l})^2 \right], \quad (1)$$

где p_0 и p_1 – масштабные коэффициенты; α – параметр регуляризации; $\{q_{j,l}\}$ – элементы матрицы, рассчитываемые по значениям фактора эффективности светорассеяния $K(r, \lambda)$ для конкретного размера частиц и соответствующего угла рассеяния θ_k ; η_i – весовые множители, регулирующие относительную значимость используемых спектральных зависимостей для различных углов рассеяния. Компоненты вектора решения S_l представляют собой суммарное геометрическое сечение частиц на интервалах Δ_l с границами r'_l и r'_{l+1} . Среднее значение ступенчатой функции $s^*(r)$ на указанном интервале определяется отношением S_l/Δ_l .

Методика прямого численного моделирования опирается на результаты численных экспериментов, в которых вариации микроструктурных параметров дисперсных смесей определялись на основе полифракционной структуры спектра размеров частиц вида

$$n(r) = \frac{dN}{dr} = Ar^{-3} \sum_{i=1}^l M_i \exp \left\{ -b_i \left[\ln \frac{r}{r_{i0}} \right]^2 \right\}. \quad (2)$$

Фактически значения среднеэффективного показателя преломления (среднего для анализируемого интервала размеров полидисперсного ансамбля частиц) оценивались для каждой реализации лабораторного эксперимента на основе предварительного решения обратной задачи и с учетом результатов прямого численного моделирования. Это позволило при возникновении дымов со сложной неоднородной микроструктурой сопоставить полученные результаты спектрофелометрических измерений с результатами численного моделирования, изучить ряд гипотез относительно возможных микрофизических особенностей дымов, обнаруженных по результатам измерений поляризационных характеристик в экспериментах конкретной направленности. Например, в некоторых ситуациях в рамках замкнутого численного эксперимента предварительно изучались возможные варианты

изменения КПП по спектру размеров частиц, проявление в рассеивающем объеме частиц неоднородной диэлектрической структуры (двух-, трехслойности частиц) и степени влияния случайных погрешностей оптических измерений.

В качестве примера на рис. 3 приведены результаты замкнутого численного эксперимента, в котором предварительно изучалась возможность восстановления спектра размеров и показателя преломления частиц для бинарной дисперсной смеси при наличии случайных погрешностей различного уровня в измерении спектрофелометрических данных.

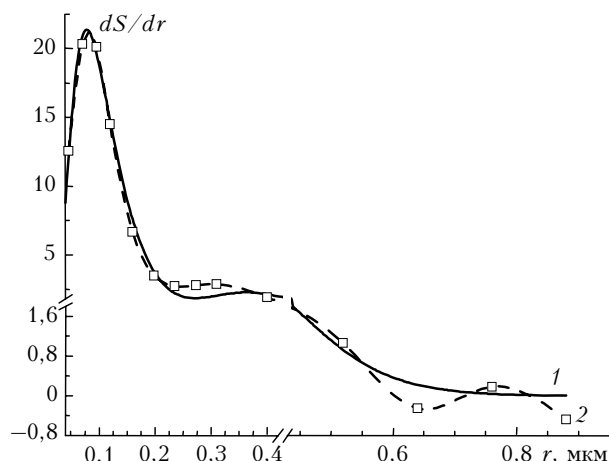


Рис. 3. Результаты замкнутого численного эксперимента по восстановлению спектра размеров частиц бинарной дисперсной смеси: кривая 1 — исходный спектр, кривая 2 — восстановленный

При решении обратной задачи использовались результаты прямого численного моделирования параметров аэрозольного светорассеяния $\beta_s^0(\lambda)$ в указанном ранее интервале длин волн и углов рассеяния. Спектр размеров частиц модельной среды определялся, исходя из соотношения (1), но при этом расчеты проводились в предположении, что дисперсный состав сформирован как бинарная смесь частиц, для которой в прямых расчетах использовались два значения КПП. Частицы с $r < 0,3$ мкм предполагались сильно поглощающими (сажевыми) с $m = 1,84 - 0,79i$, в то время как с $r > 0,3$ мкм были частицами с умеренным поглощением — $m = 1,54 - 0,05i$. Фактически, при прямом моделировании, была рассмотрена смесь сажевых частиц и смолистых соединений (канифоли) не только в составе отдельной частицы, но и дисперсной смеси в целом.

Численные эксперименты показали, что для удовлетворительного восстановления спектра размеров частиц и определения показателя преломления, различного в двух диапазонах дисперсности, случайная погрешность спектрофелометрических измерений не должна превышать 10–14%. При таком уровне погрешностей удастся установить окрестность возможных значений комплексного показателя преломления и границу между разнородными фракциями.

Результаты

Проведенный цикл лабораторных экспериментов в большой аэрозольной камере (более 50 реализаций) позволил отработать методику калибровки измерительного тракта и получить значительный экспериментальный материал для анализа динамики трансформации спектра размеров дымовых образований, оценить интервал вариаций КПП и возможные факторы изменений как действительной, так и мнимой частей. В частности, результаты обращения данных спектрофелометра, полученных в ходе экспериментов по формированию и развитию дымовых аэрозолей в большой аэрозольной камере, подтвердили выводы в [3] о влиянии температуры разложения древесных материалов на среднеэффективные значения КПП и особенно мнимой части. Предварительные результаты анализа экспериментальных данных показали, что в составе дымов могут присутствовать как достаточно прозрачные частицы (в дымах пиролиза и тления), так и сильно поглощающие (в дымах горения), близкие к параметрам «черного углерода» (так называемый «black carbon»), что согласуется с оценками [8, 9].

Нами рассмотрены в основном результаты анализа микроструктуры дымов пиролиза (без доступа воздуха в зону термического разложения) для одного типа древесного образца (сосны). Основанием для отдельного рассмотрения и выводов о типовой своеобразии и специфичности дымов пиролиза по сравнению с другими дымами послужили данные, полученные при других режимах термического разложения древесных материалов. В частности, результаты обращения спектрофелометрических данных, полученные в режиме горения, показали, что дымы горения существенно более тонкодисперсны и имеют значительное поглощение [9].

На рис. 4 представлены восстановленные по нефелометрическим измерениям спектры размеров частиц древесных дымов на этапе нерегулярных изменений их дисперсного состава.

Нерегулярность изменения оптических сигналов в данном случае обусловлена тем, что пиролиз древесных образцов, вследствие ограниченности камеры термического разложения муфельной печи, в указанном эксперименте проводился двумя порциями. Вследствие этого на втором этапе обсуждаемого эксперимента было зафиксировано некоторое повышение концентрации аэрозольных частиц. В целом длительность процесса термического разложения двухкилограммовой порции древесины (из-за ограниченности объема муфельной печи) достигла 5 ч. Вследствие этого представленные на рис. 4 результаты получены фактически на этапе наполнения аэрозольной камеры пиролизным дымом и смешения дымов, оставшихся после разложения первой порции древесных образцов и образовавшихся из новой порции древесины.

Данные обращения показывают, что до второй загрузки (кривые 1–3) вследствие высокой концентрации частиц сток частиц на стенки камеры достаточно эффективен и спектр размеров, слабо меняясь

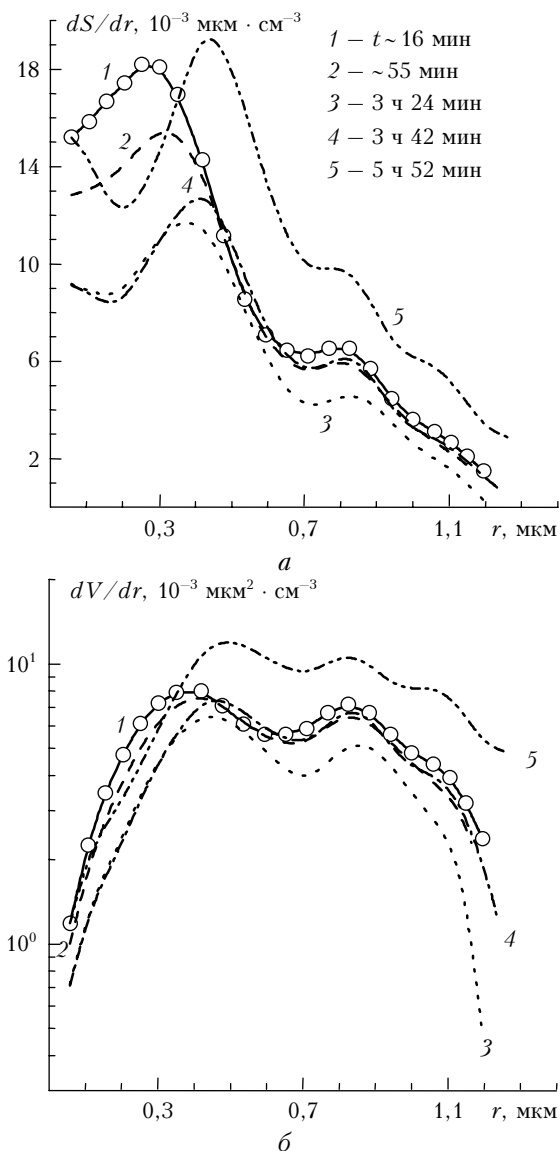


Рис. 4. Изменение плотности распределения суммарного сечения (а) и объемов (б) дымовых частиц по размерам; при пиролизе древесных образцов (сосны) в муфельной печи использована двукратная загрузка (суммарная масса 2 кг)

по форме, довольно быстро теряет уровень концентрации частиц практически на всем интервале размеров. После второй загрузки в спектре размеров наблюдаемые изменения наиболее сильно проявляют себя в диапазоне частиц средней дисперсности в интервале $r \sim 0,4-1,3$ мкм (кривые 4–5 на рис. 4, а). В то же время генерация тонкодисперсных частиц после второй загрузки не приводит к существенному увеличению их концентрации, что можно объяснить увеличением стока на поверхность более крупных частиц, накопившихся в процессе пиролиза древесного образца первой загрузки. С ростом массы сжигаемого образца происходит в основном расширение главной оптически значимой моды распределения дымовых частиц.

Согласно полученным оценкам для пиролизного дыма начальные значения КПП частиц, осредненные по всему интервалу размеров $m = 1,545 - 0,003i$, из-

менялись по ходу эксперимента, с незначительным возрастанием и действительной и мнимой частей до значений $1,567 - 0,005i$.

На последующих стадиях релаксации дымовых накоплений (рис. 5) наиболее эффективный сток частиц на стенки камеры наблюдается для крупных частиц $r > 0,6$ мкм. Эффект коагуляционной трансформации спектра размеров по восстановленным данным прослеживается лишь на начальных этапах развития дыма при максимальных концентрациях и практически слабо отслеживается на заключительных стадиях развития, когда концентрация частиц в дисперсной смеси существенно падает. В целом форма спектра приобретает более изрезанную фракционную структуру. Кривая 1 на рис. 5 совпадает с кривой 5 на рис. 4 и соответствует достигнутому в данном эксперименте максимуму наполнения аэрозольной камеры дымовыми частицами. В динамике трансформации спектра dS/dr (рис. 5, а) на интервале размеров $0,22-0,32$ мкм необходимо отметить

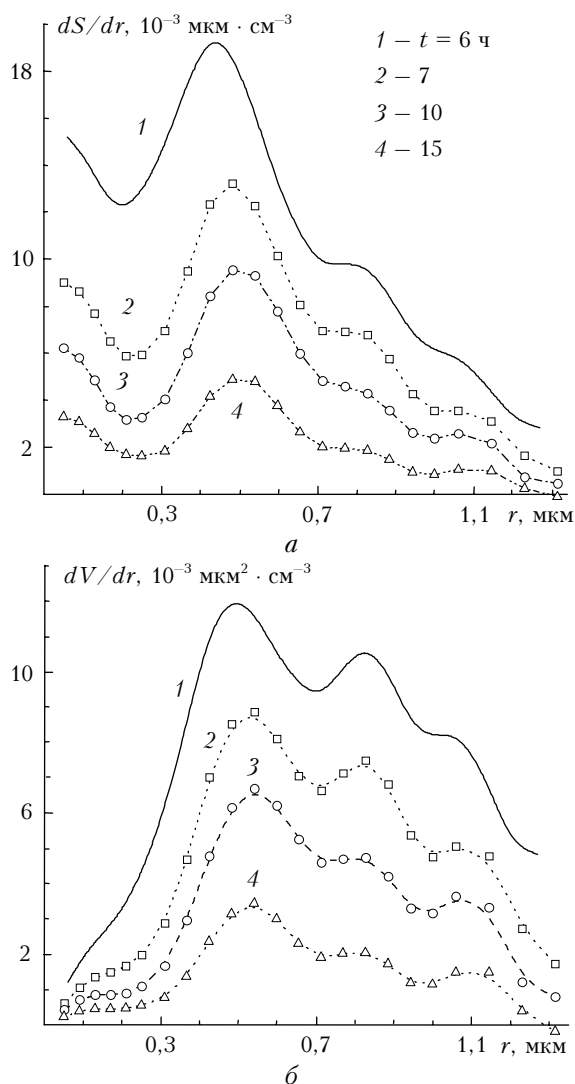


Рис. 5. Последующие (к рис. 4) стадии изменения распределения суммарного сечения (а) и объемов (б) дымовых частиц по размерам; t — время регистрации оптических данных (приблизительно ± 10 мин); $m = 1,565 - 0,0058i$

устойчивое сохранение минимума, что, возможно, связано с эффективным стоком частиц данного размера в магистралях подачи дисперсной смеси дымов из аэрозольной камеры в камеру нефелометра. Для проверки данной гипотезы необходимы целенаправленные эксперименты.

На 2-е сут развития остатков дымовых образований спектр размеров частиц приобретает бимодальную форму (рис. 6) с характерными размерами около 0,47 и 0,85 мкм.

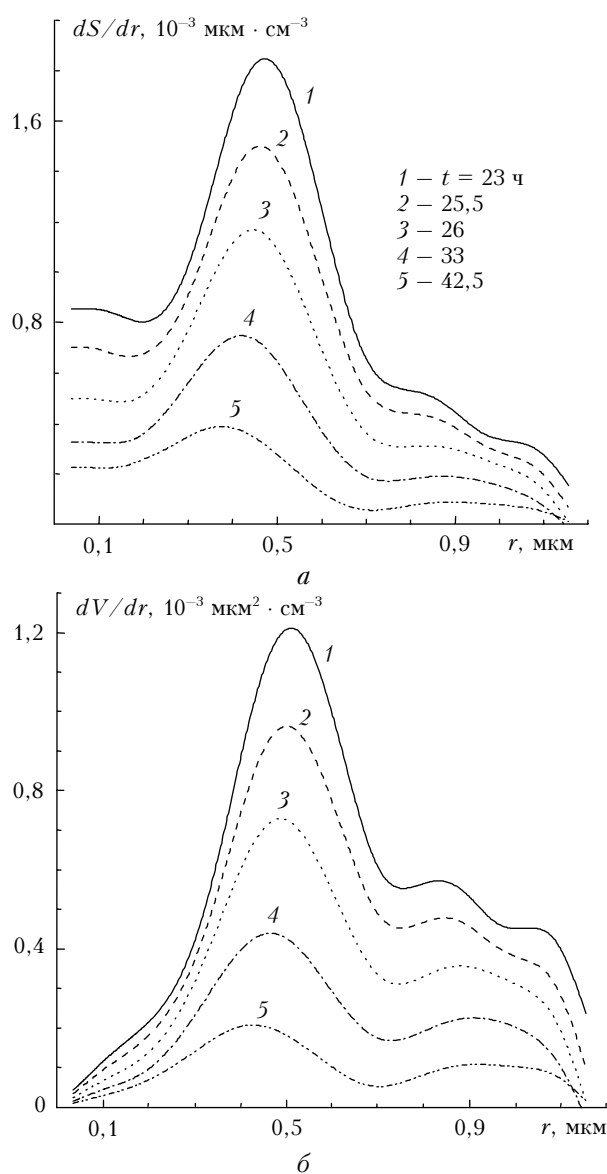


Рис. 6. Следующие (к рис. 5) стадии изменения распределения суммарного сечения (а) и объемов (б) дымовых частиц по размерам; t — время регистрации оптических данных; $m = 1,565 - 0,0042i$

Наибольшее оптическое влияние на этом этапе развития дымов имеют частицы с характерным размером $\sim 0,3-0,7$ мкм, т.е. первой моды среднedisперсных частиц. Оценки показали, что к заключительным стадиям развития пиролизных дымов значения КПП несколько уменьшаются и достигают

$m \sim 1,565 - 0,004i$, что характерно для КПП канифоли. Как показали дальнейшие эксперименты, вывод об устойчивом формировании двух дымовых фракций справедлив и для других дымов пиролиза независимо от массы сжигаемых образцов ($M \sim 0,25; 0,5; 1$ кг). Отметим, что относительное объемное содержание тонкодисперсных частиц в процессе выствания дымов неуклонно уменьшается. Возможно, указанная особенность присуща лишь замкнутому объему аэрозольной камеры, сказывается постоянное присутствие стенок. В условиях реальной атмосферы этот эффект, скорее всего, будет менее выражен, хотя и там сохраняется возможность сухого осаждения тонкодисперсной фракции на различные элементы шероховатости подстилающей поверхности, в частности на кроны деревьев лесных массивов.

Табл. 1–3 показывают динамику интегральных характеристик (концентрации N , суммарного геометрического сечения S и объема V) дымовых частиц на характерных для различных фракций интервалах шкалы размеров в течение 40 ч. Значения указанных в табл. 1–3 характеристик рассчитаны по спектрам, представленным на рис. 4–6.

Таблица 1

Временная динамика интегральных характеристик дымовых частиц для $r < 0,35$ мкм при пиролизе 2 кг древесины (сосны)

| t , ч | N , см^{-3} | S , $\text{мкм}^2 \cdot \text{см}^{-3}$ | V , $\text{мкм}^3 \cdot \text{см}^{-3}$ | $r_{\text{эф}}$, мкм |
|---------|------------------------|---|---|-----------------------|
| 0,3 | 59288 | 23382 | 1381 | 0,177 |
| 0,9 | 57024 | 22296 | 1311 | 0,176 |
| 1,5 | 48282 | 19390 | 1155 | 0,179 |
| 3,0 | 32183 | 13234 | 798,0 | 0,181 |
| 3,6 | 31342 | 12970 | 784,6 | 0,181 |
| 4,7 | 49157 | 18879 | 1100 | 0,175 |
| 6,4 | 33830 | 11421 | 624,0 | 0,164 |
| 7,2 | 27961 | 10801 | 631,3 | 0,175 |
| 9,7 | 17851 | 6557,1 | 373,7 | 0,171 |
| 15,4 | 9710,4 | 3283,2 | 179,5 | 0,164 |
| 23,0 | 3328,0 | 1372,0 | 82,84 | 0,181 |
| 25,0 | 2727,3 | 1163,4 | 71,45 | 0,184 |
| 27,7 | 1982,7 | 908,02 | 57,78 | 0,191 |
| 32,6 | 1298,2 | 623,87 | 40,67 | 0,196 |
| 41,5 | 927,85 | 416,79 | 26,27 | 0,189 |

Таблица 2

Временная динамика интегральных характеристик дымовых частиц для $0,35 < r < 0,75$ мкм

| t , ч | N , см^{-3} | S , $\text{мкм}^2 \cdot \text{см}^{-3}$ | V , $\text{мкм}^3 \cdot \text{см}^{-3}$ | $r_{\text{эф}}$, мкм |
|---------|------------------------|---|---|-----------------------|
| 0,3 | 5702,7 | 15387,3 | 2376,7 | 0,463 |
| 0,9 | 5647,7 | 15268,8 | 2360,8 | 0,464 |
| 1,5 | 5488,9 | 14807,4 | 2286,9 | 0,463 |
| 3,0 | 4684,6 | 12677,5 | 1961,1 | 0,464 |
| 3,6 | 5286,2 | 14673,8 | 2298,9 | 0,470 |
| 4,7 | 8321,8 | 23866,5 | 3800,6 | 0,478 |
| 6,4 | 6125,4 | 18036,2 | 2910,2 | 0,484 |
| 7,2 | 5071,0 | 15705,2 | 2599,0 | 0,496 |
| 9,7 | 3613,1 | 11334,4 | 1887,7 | 0,500 |
| 15,4 | 1763,1 | 5455,25 | 902,32 | 0,496 |
| 23,0 | 720,28 | 2197,70 | 360,98 | 0,493 |
| 25,0 | 586,05 | 1773,34 | 290,07 | 0,491 |
| 27,7 | 451,00 | 1332,82 | 215,45 | 0,485 |
| 32,6 | 277,64 | 788,463 | 124,94 | 0,475 |
| 41,5 | 127,83 | 339,896 | 52,116 | 0,460 |

Таблица 3

Временная динамика интегральных характеристик
дымовых частиц для $0,75 < r < 1,3$ мкм

| t , ч | N , см ⁻³ | S , мкм ² ·см ⁻³ | V , мкм ³ ·см ⁻³ | $r_{эф}$, мкм |
|---------|------------------------|--|--|----------------|
| 0,3 | 929,3 | 8877,3 | 2580 | 0,872 |
| 0,9 | 904,4 | 8548,6 | 2471 | 0,867 |
| 1,5 | 834,8 | 7829,2 | 2255 | 0,864 |
| 3,0 | 647,4 | 6080,8 | 1752 | 0,865 |
| 3,6 | 864,9 | 8362,7 | 2445 | 0,877 |
| 4,7 | 1496 | 15285 | 4595 | 0,902 |
| 6,4 | 1069 | 10875 | 3262 | 0,900 |
| 7,2 | 998,9 | 10223 | 3075 | 0,902 |
| 9,7 | 646,9 | 6555,7 | 1962 | 0,898 |
| 15,4 | 258,2 | 2523,2 | 741,7 | 0,882 |
| 23,0 | 66,87 | 660,71 | 195,3 | 0,887 |
| 25,0 | 55,35 | 540,68 | 158,9 | 0,882 |
| 27,7 | 41,23 | 403,81 | 118,8 | 0,883 |
| 32,6 | 24,88 | 242,72 | 71,28 | 0,881 |
| 41,5 | 11,93 | 120,96 | 36,22 | 0,898 |

Не менее сложная динамика наблюдается для эффективного размера частиц указанных диапазонов. На рис. 7 представлены результаты оценок, иллюстрирующих динамику изменения характерного размера частиц аккумулятивной и двух среднелдисперсных фракций дымового аэрозоля.

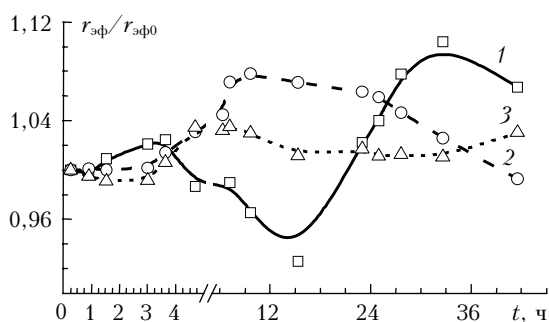


Рис. 7. Динамика изменения характерного размера частиц аккумулятивной (1) и двух среднелдисперсных (первая 2, вторая 3) фракций дымового аэрозоля

Анализ результатов показывает, что вторая среднелдисперсная фракция дымовых аэрозолей со временем приобретает устойчивый размер и, по-видимому, может переноситься в атмосфере, слабо изменяясь по спектру в присутствии других фракций дымового аэрозоля. Состояние частиц тонкодисперсной фракции (спектр и характерный размер) существенно зависит от уровня содержания частиц среднелдисперсного диапазона, которые могут способствовать эффективному стоку тонкодисперсной фракции из атмосферы.

Выводы

Для дымов пиролиза сосновых образцов древесины в большой аэрозольной камере (1800 м³) оценки вещественной части показателя преломления, средние в области размеров частиц $r < 2,5$ мкм, на разных стадиях термического разложения образцов находятся в интервале $m = 1,5-1,6$ и мнимой части

$k < 0,005$ с высокой повторяемостью в многократно проведенных экспериментах. Полученный результат соответствует средней оценке $m = 1,55$ ($k < 0,005$) в области $r < 0,9$ мкм для дымов пиролиза в малогабаритной камере (100 л) без дополнительного увлажнения воздуха.

Оценки эффективного значения показателя преломления показали, что в дымах присутствуют как слабо поглощающие аэрозоли, так и частицы, которые по своим свойствам приближаются к характеристикам сажи.

Эффективность генерации частиц тонкодисперсной составляющей (ТДС) дымов с $r < 0,35$ мкм заметно зависит от уровня содержания частиц среднелдисперсного диапазона $0,35 < r < 1,2$ мкм. Термическое разложение повторных порций древесных материалов не приводит к существенному увеличению концентрации ТДС вследствие увеличения эффективности стока тонкодисперсных частиц и паров возгонки на поверхность более крупных частиц, накопившихся в процессе пиролиза древесных образцов первой загрузки камеры.

Применяемая методика интерпретации данных спектрофелометра в экспериментах с дымами обеспечивает возможность адекватной оценки эффективного показателя преломления и спектра размеров частиц при наличии случайной аппаратной погрешности измерений, не превышающей 10–14%.

Лабораторные эксперименты с дымами показали, что, несмотря на достаточно стабильные условия развития дымов в большой аэрозольной камере, дисперсный состав испытывает существенные качественные и количественные изменения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 06-05-64842.

1. Рахимов Р.Ф., Козлов В.С., Панченко М.В., Тумаков А.Г., Шмаргунов В.П. Микроструктурные изменения дымовых аэрозолей в замкнутом объеме // Оптика атмосф. и океана. 2001. Т. 14. № 8. С. 681–686.
2. Рахимов Р.Ф., Козлов В.С., Макиенко Э.В., Шмаргунов В.П. Оптико-микрофизические свойства пиролизных дымов по данным поляризационной спектрофелометрии // Оптика атмосф. и океана. 2002. Т. 15. № 4. С. 328–336.
3. Рахимов Р.Ф., Козлов В.С., Макиенко Э.В., Шмаргунов В.П. Изменение микроструктуры древесных дымов в малогабаритной аэрозольной камере под воздействием различных факторов // Оптика атмосф. и океана. 2003. Т. 16. № 4. С. 337–346.
4. Глушко В.Н., Иванов А.И., Лифищ Г.Ш., Федюлин И.А. Рассеяние инфракрасного излучения в безоблачной атмосфере. Алма-Ата: Наука, 1974. 212 с.
5. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных обратных задач. М.: Наука, 1974. 224 с.
6. Zuev V.E., Naats I.E. Inverse problem of lidar sensing of the atmosphere. Springer-Verlag, 1983. 260 p.
7. Веретенников В.В., Козлов В.С. Оптическое зондирование дымов и определение микрофизических параметров методами обращения поляризационных измерений // Исследование атмосферного аэрозоля методами лазерного зондирования. Новосибирск: Наука, 1980. С. 186–202.

8. Исаков А.А. Оптические и микрофизические характеристики дымов лесных пожаров в Подмоскowie в июле–сентябре 2002 г. // Оптика атмосф. и океана. 2003. Т. 16. № 10. С. 886–892.
9. Горчаков Г.И., Аникин П.П., Волох А.А., Емиленко А.С., Исаков А.А., Копейкин В.М., Пономарева Т.Я.,

Семутникова Е.Г., Свириденков М.А., Шукуров К.А. Исследование состава задымленной атмосферы Москвы во время пожаров торфяников летом-осенью 2002 г. // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2004. Т. 40. № 3. С. 366–380.

R.F. Rakhimov, E.V. Makienko, V.S. Kozlov, M.V. Panchenko, V.P. Shmargunov. **Methods and some results of study of smokes in big aerosol chamber.**

Some peculiarities of methods of conducting, and interpretation of smoke experiment results in the big aerosol chamber are discussed. The experiments have shown that despite sufficiently stable conditions for development of smokes in the chamber, the smoke microstructure undergoes essential qualitative and quantitative variations. A closed numerical experiment has shown that the adequate interpretation of the spectral-nephelometric data strongly depends on the accuracy in preestimated mean-effective complex index of refraction of smoke particles. Analysis of some results allows an assumption that the used method gives an adequate estimate of the efficient index of refraction and particle size spectrum in the presence of a random instrumental error not exceeding 10–14%.

Estimates of efficient values of the index of refraction show that there can be both weakly-absorbing particles and particles close to soot by their characteristics. In the dynamics of the smoke particle characteristic sizes, there appear different trends at different intervals of size scale, which are due to appearance of different proportions in the content of particles of the middle-dispersion fraction.