

**ИССЛЕДОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ  
И ДИСПЕРСНОГО СОСТАВА  
ДРЕВЕСНЫХ ДЫМОВЫХ АЭРОЗОЛЕЙ**

УДК 551.510.42 : 551.521.3

**В. С. Козлов, М. В. Панченко**

**Институт оптики атмосферы СО РАН, 634055 Томск**

*Методами поляризационной нефелометрии, фотоэлектрического счета частиц и электронной микроскопии исследованы особенности микроструктуры и оптических характеристик древесных дымовых аэрозолей в зависимости от режима сжигания, интенсивности дымообразования, «старения» во времени, искусственного изменения относительной влажности воздуха и нагрева частиц. Предложена трехфракционная модель дисперсного состава частиц и обоснована роль каждой фракции на стадиях дымообразования и последующей трансформации. Показано, что определяющим фактором для образования сильнопоглощающих частиц (сажесодержания) является режим сгорания. Оценены параметры поглощения и содержания летучих соединений в веществе дымовых частиц.*

**ВВЕДЕНИЕ**

Изучение микрофизических и оптических свойств дымовых аэрозолей (дисперсных продуктов сгорания лесных горючих материалов (ЛГМ)) представляет интерес для совершенствования моделей лесных пожаров, развития оптических и радиационных методов обнаружения и мониторинга очагов пожаров [1, 2]. Образующиеся дымовые частицы, находясь в зоне горения, активно воздействуют на распространение пожара, непосредственно участвуя в процессах массопереноса и передачи тепла излучением. Лесные пожары являются мощными генераторами большого количества аэрозольных частиц, которые, поступая в атмосферу, значительно изменяют ее оптические (видимость, светорассеяние), радиационные (температурные эффекты), термодинамические (ядра конденсации в процессах погодообразования) и экологические (загрязнение воздуха) характеристики. Известно [3], что по своим климатическим и экологическим последствиям лесные пожары рассматриваются как природный аналог массовых ядерных взрывов. Следует отметить, что вопросы создания необходимых для отмеченных задач микрофизических и оптических моделей дымовых аэрозолей, адекватно описывающих свойства дымов при сгорании ЛГМ, и в частности древесины, в равной мере как и вопросы кинетики дымообразования при лесных пожарах, исследованы недостаточно.

В настоящей статье рассматриваются некоторые результаты исследований особенностей изменчивости оптических характеристик и микроструктуры древесных дымов в зависимости от ряда контролируемых факторов.

## АППАРАТУРА И МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЙ

В Институте оптики атмосферы СО РАН в течение ряда лет выполнено несколько циклов экспериментальных исследований оптических свойств и микроструктуры древесных дымовых аэрозолей [4–6]. В видимой области спектра ( $\lambda = 0,42\text{--}0,63$  мкм) измерялись аэрозольные коэффициенты ослабления  $\epsilon$  ( $\text{м}^{-1}$ ) и рассеяния  $\sigma$  ( $\text{м}^{-1}$ ), входящие в уравнение Бугера [7] и характеризующие степень замутнения воздуха дымом; коэффициент направленного рассеяния (индикатриса)  $\mu(\varphi)$  ( $\text{м}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$ ), где  $\varphi$  — угол рассеяния; угловая зависимость степени линейной поляризации рассеянного света  $p(\varphi) = (\mu_1 - \mu_2)/(\mu_1 + \mu_2)$ , где  $\mu_1(\varphi)$  и  $\mu_2(\varphi)$  — ортогонально поляризованные перпендикулярная и параллельная компоненты индикатрисы соответственно.

Коэффициент ослабления измерялся базовым методом [7] с помощью лазерного измерителя прозрачности на длине волны 0,63 мкм [8]. Для измерений угловых характеристик и коэффициента рассеяния применялись методы пассивной и активной (с искусственным воздействием на аэрозоль) поляризационной нефелометрии рассеянного света. С этой целью использовались поляризационный угловой нефелометр с аэрозольной кюветой объемом 0,1 м<sup>3</sup> для измерений в диапазоне углов рассеяния 5–170° на длине волны 0,63 мкм [9] и проточный поляризационный нефелометр [10] для измерений на длинах волн 0,44, 0,52 и 0,60 мкм для двух углов рассеяния (45 и 90°) с возможностью изменения в аэрозольном потоке относительной влажности воздуха до 95% и нагрева частиц до 350 °С.

При изучении микрофизических свойств рассматривались счетная концентрация частиц  $N$  ( $\text{см}^{-3}$ ), функции распределения по размерам концентрации  $N(a)$  ( $\text{см}^{-3}$ ) и удельного объема частиц  $\nu(a) = (4/3)\pi a^3 N(a)$ , где  $a$  — радиус частиц, а также показатели преломления  $n$  и поглощения  $\chi$  вещества частиц. Оценка микрофизических параметров может выполняться методом обращения поляризационных нефелометрических данных в приближении однородных сферических частиц [6]. Наряду с этим с помощью фотоэлектрического счетчика частиц (ФСЧ) разработки ИХКГ СО РАН [11] проводились измерения микроструктуры в диапазоне  $a = 0,15\text{--}10$  мкм,  $N \leq 10^6$   $\text{см}^{-3}$ . Один из циклов нефелометрических измерений сопровождался забором проб частиц на фильтры с последующим изучением морфологии и микроструктуры частиц радиусом 0,05–5 мкм методом электронной микроскопии [12].

Методической особенностью поляризационной нефелометрии является то, что в диапазоне  $\varphi = 10\text{--}175^\circ$  определяющий вклад в формирование оптических характеристик в видимой области спектра вносит мелкодисперсная фракция частиц ( $a \approx 0,05\text{--}0,5$  мкм). Поэтому нефелометрические данные информативны в основном относительно содержания и свойств именно этой фракции [7, 13]. Использование, наряду с нефелометрией, ФСЧ и электронной микроскопии позволяет расширить исследуемый диапазон размеров частиц до  $a \approx 5$  мкм.

Оптические измерения в дымах выполнялись в основном для двух пространственных масштабов дымовой среды: а) в малом объеме аэрозоля, создаваемого в аэрозольной кювете углового нефелометра [9], и б) в крупногабаритных аэрозольных камерах ИОА СО РАН объемом 217 и 1800 м<sup>3</sup> [8]. Дымы образовывались при сжигании в муфельных электропечах определенной массы древесины (сосна, береза, хвоя) в двух режимах: 1) пиролиз — сравнительно низкотемпературное разложение при 500 °С без пламени (иногда для этого режима дымообразования используют термин «тление» [1]); 2) горение — высокотемпературное сгорание (900 °С) с пламенем при свободном доступе кислорода.

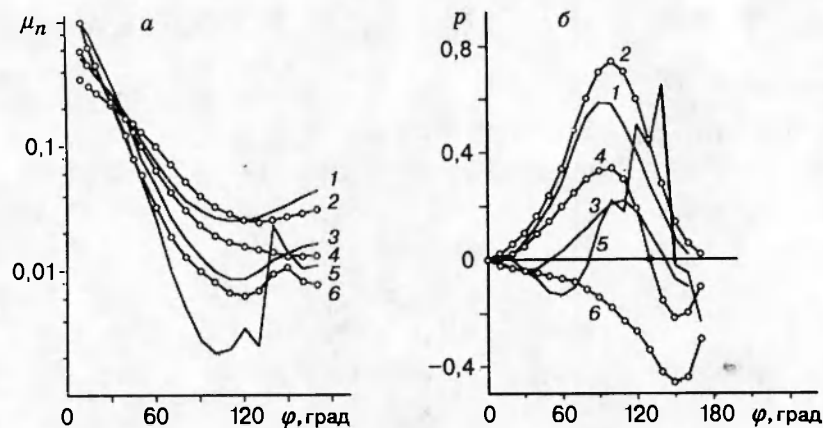


Рис. 1. Характерные зависимости и пределы вариаций нормированных индиктрис (а) и степени линейной поляризации (б) в видимой области спектра для древесных дымов (2, 4, 6):

1, 3 — данные [13] для атмосферных дымок ( $S_m = 50$  (1) и 5 км (3)); 5 — водный туман

Измерения в аэрозольных камерах, как правило, проводились в следующей последовательности. В заданном режиме сжигался древесный материал ( $\sim 0,2-1$  кг) при невысоких значениях относительной влажности ( $\sim 10-30\%$ ) и температуры окружающего воздуха ( $\sim 20$  °С). Дым первоначально поднимался в верхнюю часть камеры и через небольшой интервал времени равномерно заполнял весь объем. После этого в однородном дыме периодически выполнялись измерения со средним временем одного цикла измерений около суток.

### ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДРЕВЕСНЫХ ДЫМОВ

В общей сложности в различных условиях измерений получено более 600 зависимостей индикатрис рассеяния  $\mu(\varphi)$  и степени поляризации  $p(\varphi)$ , которые позволили рассмотреть особенности формы угловых характеристик, пределы их изменения и провести сопоставление оптических свойств дымов с основными типами атмосферных аэрозольных образований. На рис. 1 приведены характерные угловые зависимости нормированных индикатрис рассеяния  $\mu_n(\varphi) = \mu(\varphi)/\sigma$  и степени поляризации  $p(\varphi)$  для древесных дымов. Отметим, что кривые 2 и 6 на рис. 1 задают области возможных значений оптических характеристик по нашим измерениям, а также иллюстрируют основные особенности формы. Для индикатрис рассеяния характерны значительные вариации вытянутости  $\mu(\varphi)$  в направлениях вперед ( $\varphi < 50^\circ$ ) и назад ( $\varphi > 90^\circ$ ), проявление в плотных дымах ( $\epsilon > 0,2$  м<sup>-1</sup>) локального экстремума в области углов  $\varphi = 155-160^\circ$ , а также разделение «дымовых» индикатрис на два типа:

- «острый» — с выраженной вытянутостью индикатрис назад (кривые 2, 6),
  - «пологий» — отсутствие вытянутости индикатрисы в заднюю полусферу (кривая 4).
- Пределы вариаций степени линейной поляризации очень широки: от зависимостей с ярким выраженным максимумом положительной поляризации при  $\varphi \approx 100^\circ$  (линия 2) до кривых с двумя экстремумами (линия 4) и одним глубоким максимумом отрицательной поляризации при  $\varphi = 150-160^\circ$ , достигающей значений  $p \approx -0,5$  (кривая 6).

Сопоставление оптических характеристик дымов с данными, приведенными на рис. 1

для некоторых основных типов атмосферного аэрозоля: атмосферных дымок (кривые 1, 3 — эмпирическая статистическая модель [13] в широком диапазоне метеорологической дальности видимости  $S_m = 0,5-50$  км) и водного тумана (кривые 5) — показывает, что по особенностям формы и диапазону вариаций характеристик рассеяния наблюдается значительное сходство дымок с атмосферными дымками.

Обращает, однако, на себя внимание тот факт, что пределы изменения значений  $\mu_n$  и  $p$  для древесных дымок перекрывают области вариаций атмосферных дымок. При этом специфическими различиями оптических свойств являются два признака, которые в определенных условиях могут использоваться для оптической селекции дымок от дымок: 1) проявление в дымах глубоких отрицательных значений поляризации; 2) «пологий» тип индикатрис, что, как показал анализ, свойственно дымам с сильнопоглощающими частицами. Для атмосферных дымок указанные особенности не наблюдаются [7, 13].

Для измеренных и оцененных основных оптических параметров диапазоны предельных значений, характеризующих динамику рассеивающих и поглощающих свойств древесных дымок в видимой области спектра, следующие:  $\epsilon = 0,007 \div 0,6$ ;  $A_1 = 10 \div 110$ ;  $R_1 = 0,7 \div 2,0$ ;  $p(100^\circ) = -0,2 \div 0,8$ ;  $p(160^\circ) = -0,5 \div 0,1$ ;  $K_a = 4 \div 21$ ;  $\alpha_\lambda = 0 \div 0,6$ ;  $\tau_\lambda = 0,32 \div 0,95$ ;  $\rho(\lambda) = 0,005 \div 0,20$ . Здесь  $A_1 = \mu(15^\circ)/\mu(110^\circ)$  и  $R_1 = \mu(165^\circ)/\mu(110^\circ)$  — параметры вытянутости индикатрисы вперед и назад;  $p(100^\circ)$  и  $p(160^\circ)$  — значения степени поляризации в экстремальных точках;  $K_a = \tau_\lambda/\rho_\lambda$  — коэффициент асимметрии индикатрисы, равный отношению световых потоков, рассеянных аэрозолем в переднюю и заднюю полусферы (вычисляется интегрированием  $\mu(\varphi)$ );  $\alpha_\lambda = (1 - \Lambda)$  — эффективный коэффициент поглощения частиц, где  $\Lambda = \sigma/\epsilon$  — вероятность выживания кванта. Видно, что характерные параметры формы индикатрисы и степени поляризации изменяются в несколько раз (до порядка величины). В свою очередь, приближенные оценки для спектральных коэффициентов поглощения  $\alpha_\lambda$  (степень «черноты» частиц), пропускания  $\tau_\lambda$  и отражения  $\rho_\lambda$ , обычно используемых в задачах переноса излучения [1, 7], дают информацию о возможном интегральном перераспределении излучения, падающего на дымовые частицы. Так, доля поглощенной частицами энергии может составлять  $\sim 60\%$ . При этом доля пропущенного дымом излучения, как правило, существенно превосходит отраженную (в 5 и более раз). Безусловно, установленная высокая динамика оптических параметров дымок тесно связана со значительными вариациями микроструктуры и оптических постоянных дымовых частиц.

Выполненный анализ показывает, что даже рассматриваемый здесь один тип дыма (древесные дымы) является очень динамичной аэрозольной системой, что делает сомнительными попытки использовать некие средние характеристики для описания оптического и микрофизического образов дымок и с необходимостью ставит вопрос об исследовании роли различных факторов.

### ТРАНСФОРМАЦИЯ СВОЙСТВ ДЫМОВ ПОД ВЛИЯНИЕМ ДИНАМИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ

Обращение нефелометрических измерений методом регуляризации [6] позволило рассмотреть особенности изменения характеристик дымок в зависимости от интенсивности дымообразования (изменение массы сжигаемой древесины), «старения» во времени и увеличения относительной влажности воздуха.

Отметим, что наши поляризационные измерения в дымах показали, что при облуживании

чении среды линейно поляризованным излучением в рассеянном свете деполаризация не наблюдается. Это является показателем близости формы частиц к сферической [7, 13] и дает основания для обращения нефелометрических данных с использованием теории рассеяния Ми [6]. Подобный вывод также подтверждается нашими измерениями методом электронной микроскопии, согласно которым дымовые частицы представляют собой коагулянты из множества мелких частиц, близких по форме к сферам в диапазоне размеров  $a = 0,05-0,4$  мкм (величина форм-фактора, равного отношению максимального размера частицы к минимальному,  $\delta < 1,5$ ). В случае более крупнодисперсных частиц ( $a > 0,5$  мкм) наблюдается несферичность коагулянтов.

Рис. 2-4 на примере дымов пиролиза, исследованных в малом объеме нефелометра [9], иллюстрируют влияние отмеченных факторов на дисперсный состав частиц. Для изучения влияния плотности задымления поляризационные индикатрисы измерялись в течение 10-15 мин после сгорания различных масс древесины при влажности воздуха 30-40 %. При этом плотность задымления локального объема воздуха, характеризующая величиной коэффициента ослабления  $\epsilon$ , является показателем интенсивности процесса дымообразования. Величина  $\epsilon$  изменялась в среднем в пределах  $0,007-0,3$  м<sup>-1</sup>.

Оптические измерения и результаты их обработки показали, что дымы, сформировавшиеся в условиях различной интенсивности дымообразования, кардинальным образом отличаются по своим свойствам, т. е. плотность задымления воздуха при дымообразовании является важным, масштабирующим фактором в формировании оптико-микрофизических параметров дыма.

Так, изменение  $\epsilon$  в указанных пределах приводит к тому, что оптические характеристики фактически заполняют весь диапазон возможных вариаций  $\mu(\varphi)$  и  $p(\varphi)$  для дымов (см. рис. 1). Рост задымления выражается в увеличении асимметрии рассеяния вперед и назад, в характерной перестройке поляризационной зависимости от одного положительного максимума через состояние с двумя экстремумами к зависимостям с глубоким отрицательным экстремумом. Важными оптическими признаками плотных дымов ( $\epsilon > 0,15$  м<sup>-1</sup>) являются локальный максимум на индикатрисе и глубокая отрицательная поляризация при  $\varphi = 150-160^\circ$ .

Как видно из рис. 2, с увеличением плотности задымления происходит образование всё более крупнодисперсных дымов. Для зависимостей нормированных значений счетной концентрации  $N(a)$  это проявляется, прежде всего, в уменьшении наклона кривых и, следовательно, увеличении доли крупных частиц в спектре размеров. Из зависимостей удельного объема  $v(a)$  следует, что укрупнение дымовых частиц происходит за счет увеличения медианного радиуса частиц в области ядер Айткена ( $a < 0,1$  мкм) в интервале  $a_0 = 0,04-0,1$  мкм, а также за счет роста полидисперсности функции распределения, характеризующей дисперсией натурального логарифма радиусов частиц  $S^2 \approx 0,2-0,5$ . Отметим, что при невысоких плотностях задымления ( $\epsilon < 0,1$  м<sup>-1</sup>) образуются мелкодисперсные дымы, микроструктура которых удовлетворительно описывается одновершинными логнормальными распределениями. Однако в плотных дымах ( $\epsilon > 0,2$  м<sup>-1</sup>) распределения частиц становятся явно бимодальными: наряду с широкой модой частиц в области ядер Айткена в спектре размеров отчетливо проявляется квазимонодисперсная мода в области «больших» [7] частиц с параметрами  $a_0 \approx 0,4-0,5$  мкм и  $S^2 \approx 0,05$ .

Эта мода слабо изменяет счетную концентрацию (см. рис. 2, а), однако вносит значительный вклад в массовую концентрацию дыма (до 50 % и более; см. рис. 2, б) и, как показал анализ, является ответственной за появление на индикатрисе локального макси-

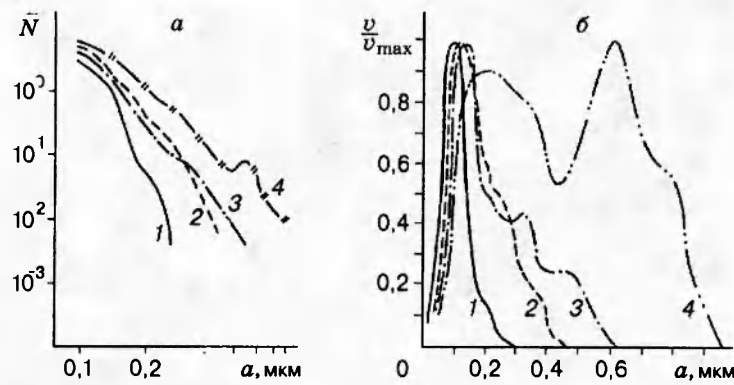


Рис. 2. Влияние плотности задымления на формирование распределений по размерам концентрации (а) и удельного объема (б) частиц:  
 $\epsilon, \text{ м}^{-1}$ : 1 — 0,007; 2 — 0,03; 3 — 0,045; 4 — 0,22

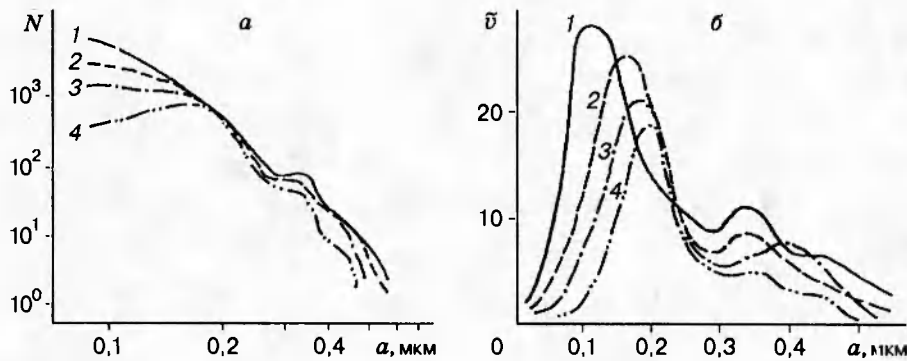


Рис. 3. Трансформация во времени распределений концентрации (а) и удельного объема (б) частиц:  
 значения времени «старения» дыма,  $t$ , мин: 1 — 5, 2 — 30, 3 — 50, 4 — 120; начальное значение  $\epsilon = 0,045 \text{ м}^{-1}$

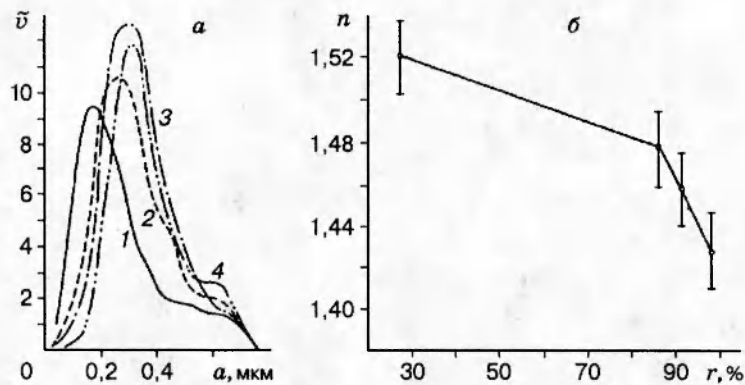


Рис. 4. Конденсационная изменчивость микроструктуры (а) и показателя преломления (б) дымовых частиц:  
 относительная влажность,  $r$ , %: 1 — 27; 2 — 87; 3 — 92; 4 — 97



мума при  $\varphi = 155\text{--}160^\circ$  (см. рис. 1, *a*, кривая 5).

Рис. 3 иллюстрирует особенности трансформации дыма при «старении» во времени. При выстаивании дымов происходит среднеэффективное укрупнение дисперсного состава за счет уменьшения концентрации частиц в области  $a < 0,15$  мкм (см. рис. 3, *a*) и смещения моды распределения к значениям  $a \approx 0,2$  мкм (см. рис. 3, *b*). Типичной особенностью такого процесса в целом является то, что при старении дыма наблюдаются: а) сужение функции распределения ( $S^2 \rightarrow 0,1\text{--}0,2$ ); б) тенденция смещения распределения в интервал отмеченной выше второй моды дымовых частиц ( $a_0 \rightarrow 0,3\text{--}0,5$  мкм) и накопление частиц в этой области размеров.

На рис. 4 приведены зависимости распределения по размерам удельного объема и показателя преломления частиц  $n$  при увеличении относительной влажности воздуха от 30 до 97%. Наблюдаемые с ростом влажности укрупнение частиц от  $a_0 \approx 0,1$  мкм до  $a_0 \approx 0,3$  мкм и увеличение их суммарного объема (см. рис. 4, *a*), сопровождаемые одновременным уменьшением величины показателя преломления (см. рис. 4, *b*), — характерные признаки конденсационного обводнения частиц в поле влажности [13, 14].

Отметим, что значение показателя преломления изменяется от  $n \approx 1,53$  для «сухого» дыма до  $n \approx 1,42$  для обводненного. Анализ оптических данных и результатов обращения показал, что для описания конденсационной изменчивости индикатрисы и микроструктурных параметров при увеличении влажности воздуха применимы формулы типа формул Кастена — Хенела, справедливые для механизма равновесно-растворной ассимиляции влаги частицами [14]. В частности, для удельного объема (фактора заполнения) на рис. 4, *a* эта формула имеет следующий вид (со средней погрешностью  $\approx 5\%$ ):

$$\nu(r) = \nu_0(1 - r)^{-\psi} = 9 \cdot 10^{-9}(1 - r)^{-0,53}, \quad (*)$$

где  $r$  — относительная влажность воздуха;  $\psi$  — параметр конденсационной активности;  $\nu_0$  — удельный объем сухой основы вещества частиц.

В качестве важной отличительной особенности влияния  $r$  на оптические свойства дыма отметим сильное возрастание асимметрии рассеяния вперед, особенно значительное при  $r > 80\%$ . При этом коэффициент асимметрии  $K_a$  может достигать величины 20–21, тогда как его максимальные значения для сухих крупнодисперсных дымов не превышают 11.

### ТРЕХФРАКЦИОННАЯ МИКРОСТРУКТУРНАЯ МОДЕЛЬ ДЫМОВ

На рис. 5 представлены микроструктурные данные ФСЧ-измерений для плотных древесных дымов. Здесь  $\Delta N$  — количество частиц в единице объема воздуха, размер которых изменяется от  $\lg a$  до  $\lg a + \Delta \lg a$ ;  $\Delta \lg a$  — достаточно узкий интервал шкалы логарифмов радиусов. Интегрирование зависимости, представленной на рис. 5, дает полную концентрацию частиц в диапазоне измерений прибора. Данные рис. 5 согласуются с результатами решения обратной задачи из поляризационной нефелометрии и дополняют их. Обращают на себя внимание выраженный полимодальный характер функции распределения частиц на стадии, близкой к стадии дымообразования (кривая 1), и последующее нивелирование полимодальности при «старении» дыма.

В распределении частиц наряду с частью мелкодисперсной фракции, мода которой, как известно, расположена за пределами чувствительности ФСЧ (в области ядер Айткена), проявляется узкодисперсная мода «больших» частиц (среднедисперсная фракция,

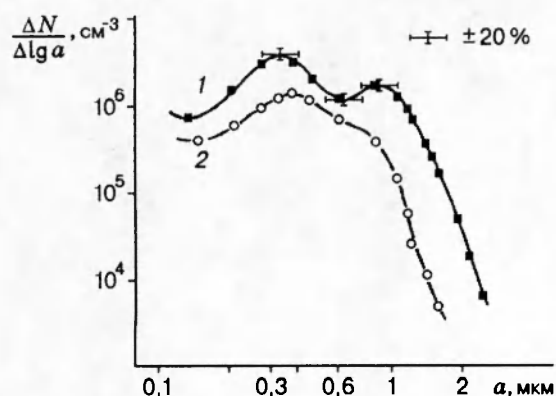


Рис. 5. Трансформация во времени распределения частиц по размерам для плотного древесного дыма ( $\epsilon = 0,6 \text{ м}^{-1}$ ):  $t$ , ч: 1 — 0,5; 2 — 5

Таблица 1

Фракции частиц	$a_0$ , мкм	$S^2$	Вклад фракций в объем для дымов, %		
			слабый дым	плотный дым	«старый» дым
Мелкая	0,03–0,06	0,3–0,5	95–98	1–2	2–3
Средняя	0,3–0,5	0,05–0,1	2–5	3–5	18–20
Крупная	1,0–1,5	0,1	—	90–95	75–80

$a = 0,3\text{--}0,5$  мкм) и узкая мода крупных частиц ( $a = 1,0\text{--}1,5$  мкм, крупнодисперсная фракция). Аналогичные проявления полимодальности наблюдаются и по результатам электронной микроскопии дымовых частиц.

Анализ совокупных данных нефелометрии, ФСЧ и электронной микроскопии позволяет предложить трехфракционную микроструктурную модель (табл. 1) для качественного описания дисперсного состава дымовых частиц. Параметры каждой из фракций определены на основе аппроксимации одновершинными логнормальными распределениями.

В целом динамику дисперсного состава следует объяснять совокупным действием процессов коагуляции и седиментации частиц, и, по-видимому, в основных чертах она соответствует следующему описанию. Условиям слабой интенсивности дымообразования свойственна сравнительно невысокая эффективность коагуляционных процессов, приводящих к формированию основной мелкодисперсной фракции частиц. При увеличении интенсивности дымообразования имеет место более эффективный коагуляционный рост, вследствие чего появляется среднедисперсная фракция «больших» частиц, а агломерация укрупненных коагулянтов стимулирует образование фракции крупнодисперсных частиц. По данным микроскопии именно последней фракции свойственны проявления несферичности частиц. Крупнодисперсная фракция наиболее подвержена седиментации (кривая 2 на рис. 5) и поэтому должна наблюдаться в основном в зоне постоянно действующих интенсивных источников дыма. «Старение» дымов, покинувших зону сгорания, проявляется в том, что коагуляция со стороны мелких и седиментация со стороны крупных частиц приводят к сужению спектра размеров и накоплению частиц в области среднедисперсной фракции. Последнюю в этом отношении можно рассматривать как основную фракцию «старого» дыма. Положение среднедисперсной фракции на шкале размеров соответствует верхней границе эффективности коагуляции частиц [13].

В табл. 1 также приведены некоторые оценки вклада фракций в удельный объем (массовую концентрацию) дымового аэрозоля. Как видно, в мелкодисперсных дымах массовая



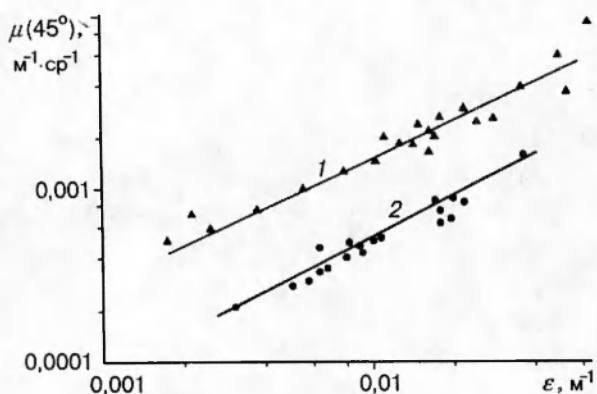


Рис. 6

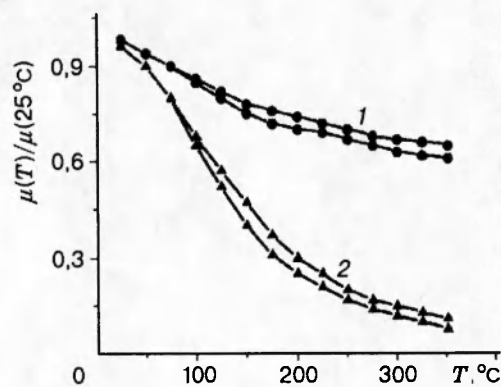


Рис. 7

Рис. 6. Диаграмма связи коэффициента направленного рассеяния  $\mu(45^\circ)$  и коэффициента ослабления  $\varepsilon$  для древесных дымов пиролиза (1) и горения (2)

Рис. 7. Типичные термограммы при «дожигании» древесных дымов горения (1) и пиролиза (2)

концентрация определяется мелкодисперсной фракцией, а в плотных дымах — крупнодисперсной фракцией. Вместе с тем при «старении» дыма наблюдается рост массовой доли среднелдисперсной фракции.

### ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА СЖИГАНИЯ НА СВОЙСТВА ДРЕВЕСНЫХ ДЫМОВ

Оптические измерения в условиях крупногабаритной аэрозольной камеры ( $1800 \text{ м}^3$ ) показали, что режим дымообразования является определяющим фактором в поглощении света дымовыми частицами (сажесодержания) [5].

На рис. 6 для древесных дымов приведена диаграмма связи коэффициента направленного рассеяния  $\mu(45^\circ)$  для  $\lambda = 0,52 \text{ мкм}$  с коэффициентом ослабления  $\varepsilon$ , которая позволяет выполнить приближенную оценку вероятности выживания кванта  $\Lambda$ . Результаты измерений для дымов горения и пиролиза отчетливо разделились, группируясь вдоль нанесенных по экспериментальным точкам прямых. Из подобного разделения следует, что дымы пиролиза обладают слабым поглощением ( $\Lambda \approx 1$ ), тогда как дымы горения характеризуются наличием значительного поглощения ( $\Lambda \approx 0,4$ ).

Выполненные оценки находятся в качественном согласии с результатами измерения термограмм дымов. Представленные на рис. 7 значения параметра  $\mu(45^\circ)$  при нагреве аэрозоля до  $350 \text{ }^\circ\text{C}$  показывают, что термограммы дымов горения и пиролиза имеют качественно различный вид.

Дымам режима горения свойственно сравнительно небольшое уменьшение  $\mu(45^\circ)$ . При этом параметр эффективности «выгорания» частиц при нагреве  $\eta = \mu(25 \text{ }^\circ\text{C})/\mu(350 \text{ }^\circ\text{C}) < 2$ . Между тем в дымах пиролиза наблюдается значительное выгорание частиц ( $\eta \approx 5-10$ ). Поскольку  $\mu(45^\circ)$  через коэффициент рассеяния связан с массовой концентрацией аэрозоля [13], градиент уменьшения  $\mu(45^\circ)$ , характеризуемый параметром  $\eta$ , является показателем доли летучих химических соединений в веществе дымовых частиц.

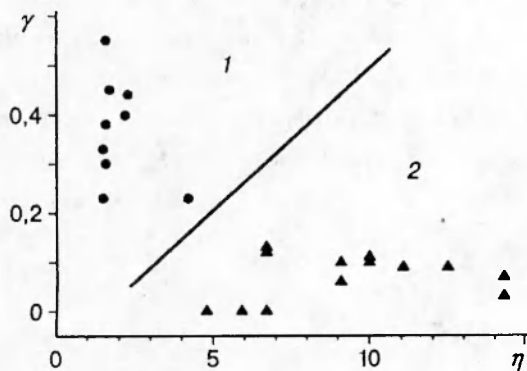


Рис. 8. Диаграмма связи параметра конденсационной активности  $\gamma$  и параметра выгорания  $\eta$  для древесных дымов горения (1) и пиролиза (2)

Таблица 2

Режим сгорания	$\alpha_\lambda$	$\eta$	$V_s, \%$	$\gamma$
Горение	$\approx 0,6$	$\leq 2$	$\leq 40$	0,4-0,5
Пиролиз	0	5-10	$\geq 80$	0-0,1

Исходя из подобной оценки, следует предположить, что дымы пиролиза состоят из частиц с большим содержанием ( $V_s \geq 80\%$ ) легколетучих углеводородов (вероятно, смолистых и других соединений), обладающих значительной летучестью при нагревании (здесь  $V_s$  — объемная доля летучих компонентов в аэрозоле). В свою очередь, в частицах дымов горения значителен вклад ( $V_s < 40\%$ ) «тяжелых» малолетучих соединений, включая сажу, инертных при нагреве дымов до  $350^\circ\text{C}$ . Отметим, что микрокристаллический углерод (сажа) эффективно выгорает в диапазоне температур  $425\text{--}500^\circ\text{C}$  [15].

Регистрация гигрограмм роста  $\mu(45^\circ)$  позволила оценить значения параметра конденсационной активности дымов  $\gamma$ , входящего в формулу типа формулы Кастена — Хенела (\*) и характеризующего конденсационную трансформацию коэффициента рассеяния (табл. 2). Анализ показывает, что вариации параметра  $\gamma$  тесно связаны с режимом сгорания. На рис. 8 приведена диаграмма связи конденсационного параметра  $\gamma$  и параметра интенсивности выгорания частиц  $\eta$ , которая свидетельствует об устойчивой тенденции взаимосвязанного изменения этих параметров в зависимости от режима сгорания. Так, дымы горения, характеризующиеся слабым выгоранием частиц (летучестью), проявляют достаточно высокую конденсационную активность (область 1). В противоположность этому дымы пиролиза, которым свойственно сильное выгорание ( $\eta > 5$ ), характеризуются слабым изменением коэффициента рассеяния ( $\gamma \leq 0,1$ , область 2).

Графические данные и результаты оценок оптико-микрофизических параметров дымового аэрозоля, приведенные в табл. 2, однозначно свидетельствуют о качественном различии химического состава дымовых частиц, образовавшихся при разных режимах дымообразования. Установленные особенности проявления сильного поглощения и изменения содержания летучих соединений в частицах древесных дымов достаточно просто интерпретировать, если предположить, что динамика дымообразования в рассматриваемых условиях согласуется с кинетической теорией сажеобразования при термическом разложении углеводородов в газовой фазе [16]. В рамках применимости этого механизма вполне естественно, что химический состав дымовых частиц, образующихся при конденсации газообразных продуктов сгорания, будет изменяться в зависимости от степени окисления

дымообразующих газов. В связи с этим для дымов горения достигается более высокая степень окисления газообразных продуктов, и, как следствие, частицы содержат небольшую долю летучих и более значительную долю «тяжелых» углеводородов и сажи. Соответственно менее эффективное окисление газовой фазы при пиролизе должно приводить к тому, что конденсированные дисперсные частицы содержат много легколетучих смолистых соединений, которые активно выгорают в данных измерениях при искусственном нагреве (дожигании) частиц.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Измерения в контролируемых условиях позволили исследовать трансформацию свойств древесных дымов под воздействием динамических факторов и изучить специфику влияния каждого из них. Анализ показал, что дымовые аэрозоли являются высокодинамичной аэрозольной системой с широкими пределами вариаций по микроструктуре и химическому составу частиц. Предложена трехфракционная модель дисперсного состава дымов и обоснована роль каждой фракции на стадиях дымообразования и последующей трансформации. Показано, что в зависимости от режима сгорания формируются дымы с сильным различием светопоглощающих свойств (сажесодержания в частицах). Из оценок спектрального поглощения следует, что оптические характеристики дымовых частиц в видимой области спектра существенно отличаются от модели абсолютно черного тела, что необходимо учитывать при моделировании процессов горения. В целом результаты исследований показали, что поляризационная нефелометрия в сочетании с методом ФСЧ-измерений является эффективным средством для изучения и контроля динамики оптико-микрофизических параметров дымов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Гришин А. М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. Новосибирск: Наука, 1992.
2. Аэрокосмические методы исследования лесов / Под ред. А. С. Исаева. Красноярск: ИЛиД СО АН СССР, 1984.
3. Голицын Г. С., Гинзбург А. С. Природные аналоги ядерной катастрофы // Климатические и биологические последствия ядерной войны. М.: Наука, 1987. С. 100–123.
4. Козлов В. С., Панченко М. В., Тумаков А. Г. Исследования динамики оптических и микрофизических свойств древесных дымовых аэрозолей // Материалы Международ. конф. «Лесные пожары: возникновение, распространение и экологические последствия». Томск: Изд-во ТГУ, 1995. С. 83–85.
5. 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, № 8. С. 1278–1288.
6. Веретенников В. В., Козлов В. С. Оптическое зондирование дымов и определение микрофизических параметров методами обращения поляризационных измерений // Исследования атмосферного аэрозоля методами лазерного зондирования. Новосибирск: Наука, 1979. С. 186–202.
7. Зуев В. Е., Кабанов М. В. Перенос оптических сигналов в атмосфере (в условиях помех). М.: Сов. радио, 1977.

8. Вилочкин Г. М., Козлов В. С., Ошлаков В. Г., Полькин В. В. Экспериментальный комплекс аппаратуры для исследования оптико-микрофизических характеристик аэрозолей в условиях аэрозольных камер // VII Всесоюз. симпоз. по распространению лазерного излучения в атмосфере. Томск: ИОА СО АН СССР, 1983. С. 269–272.
9. Козлов В. С., Ирисов А. Л., Фадеев В. Я. Лабораторный нефелометр для измерения матриц рассеяния света аэро- и гидрозолями // Рассеяние и рефракция оптических волн в атмосфере. Томск: ИОА СО АН СССР, 1976. С. 78–95.
10. Панченко М. В., Тумаков А. Г., Терпугова С. А. Бортовая установка для исследования атмосферного аэрозоля с использованием термо- и гирооптического методов // Аппаратура дистанционного зондирования параметров атмосферы. Томск: ИОА СО АН СССР, 1987. С. 40–46.
11. Анкилов А. Н., Гольдман Б. И., Куценогий К. П. и др. Фотоэлектрический анализатор спектра аэрозольных частиц // Тр. ИЭМ. 1977. № 7(75). С. 38–48.
12. Козлов В. С., Панин В. Ф., Рапопорт Г. А., Фадеев В. Я. Исследование оптических и микрофизических характеристик дымовых аэрозолей // Рассеяние и рефракция оптических волн в атмосфере. Томск: ИОА СО АН СССР, 1976. С. 109–128.
13. Розенберг Г. В., Горчаков Г. И., Георгиевский Ю. С., Любовцева Ю. С. Оптические параметры атмосферного аэрозоля // Физика атмосферы и проблемы климата. М.: Наука, 1980. С. 216–257.
14. Hanel G. The properties of atmospheric aerosol particles as functions of the relative humidity at thermodynamic equilibrium with the surrounding moist air // Adv. Geophys. 1976. V. 19. P. 73–188.
15. Gundel L. A., Dod R. L., Rosen H., Novakov T. The relationship between optical attenuation and black carbon concentration for ambient and source particles // Sci. Total Environ. 1984. V. 36. P. 197–202.
16. Теснер П. А. Образование углерода из углеводов газовой фазы. М.: Химия, 1972.

*Поступила в редакцию 25/III 1996 г.*

---