

## Оптико-микрофизические свойства смешанных дымов от нескольких разнесенных источников

Р.Ф. Рахимов, Э.В. Макиенко, М.В. Панченко\*

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

Поступила в редакцию 19.02.2010 г.

Выполнена серия дымовых экспериментов, направленных на исследование специфики формирования дымов смешанного состава от нескольких разнесенных источников термического разложения разнородных древесных материалов, показано, что для адекватного прогноза оптических свойств дымовых аэрозолей необходимо учитывать не только сложную неоднородную структуру дисперсного состава (плотности распределения дымовых частиц по размеру  $s(r)$ ), но и вариации комплексного показателя преломления (КПП)  $m = n - i\chi$  по спектру размеров дымовых частиц. При смешивании продуктов термического разложения лесных горючих материалов образуются дымы, состоящие в основном из двух разнесенных по шкале размеров аэрозольных компонент: тонкодисперсной (размерами  $< 250$  нм) с мнимой частью КПП  $\chi \sim 0,1 \div 0,25$  и среднедисперсной ( $> 300$  нм) с мнимой частью  $\chi \sim 0,005 \div 0,08$ . Показано, что увеличение среднеэффективных по диапазону размеров значений  $n$  и  $\chi$  является следствием не внешнего смешения дисперсных компонент, а проникновения тонкодисперсной поглощающей компоненты в структуру частиц других диапазонов.

*Ключевые слова:* дымы смешанные, оптические постоянные, спектр размеров частиц; mixed smokes, refractive index, particle size distributions.

### Введение

В предыдущих работах [1–3] анализировались результаты спектрофелометрических измерений, полученные в экспериментах с дымами, генерируемыми в большой аэрозольной камере (БАК) одним источником термического разложения. В этих экспериментах по результатам обращения спектрально-угловых зависимостей коэффициента направленного светорассеяния (КНС) была изучена специфика изменения распределения дымовых частиц по размерам в зависимости от вариаций температуры  $T_{\text{п}}$  и режима термического разложения (пиролиз или горение), массы и типа древесных образцов.

Анализ результатов обращения [1–3] показал, что дисперсный состав дымов зависит не только от перечисленных факторов формирования, т.е. не только от пропорций между массой и типами сжигаемых лесных горючих материалов, но также и от геометрических размеров камеры термического разложения (КТР). Не последнюю роль играет и объем свободного пространства, в котором в процессе разложения прогреваются продукты распада до априори заданной температуры, прежде чем поступают в БАК, где дисперсная смесь достаточно быстро остывает до температуры  $T_{\text{БАК}} \sim 17\text{--}20$  °С.

Из данных лабораторных экспериментов, описанных в настоящей статье, для исследования микроструктуры аэрозолей, выносимых от очагов реальных лесных пожаров [7, 8], были выбраны данные измерений оптических характеристик дымов, состав которых формировался одновременно от нескольких разнесенных источников. В экспериментах источники различались не только геометрическими размерами КТР, но и температурой прогревания  $\sim T_{\text{п}}$ , составом и массой древесных образцов внутри КТР. Проводилось смешивание продуктов термического разложения древесных материалов, полученных в режиме их пиролиза, с аналогичными продуктами от другого источника, образовавшимися в результате горения. Таким образом формировались сложные дисперсные смеси из умеренно и сильно поглощающих компонентов углеводородных аэрозолей.

### Методика исследования и результаты

Для исследования микроструктурных изменений сложных дымовых смесей в БАК ИОА СО РАН объемом  $1800 \text{ м}^3$  были реализованы четыре дымовых эксперимента продолжительностью  $t \sim 50$  ч каждый. Продукты термического разложения лесных горючих материалов (ЛГМ), которые поступали из КТР двух муфельных печей, обеспечивающих контроль и стабильность температуры прогревания  $T_{\text{п}}$ , смешивались в БАК в единую дисперсную смесь при комнатной температуре. Объем КТР  $V_{\text{КТР}}$  первой муфельной печи составлял  $\sim 10$  л, второй  $\sim 4$  л.

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

В первых трех дымовых экспериментах дисперсная смесь в БАК формировалась только от двух муфельных печей. В четвертом дымовом эксперименте в дополнение к муфельным печам в БАК поступали продукты открытого горения ЛГМ от источника, который располагался на покрытой землей поверхности в виде костра.

В первом дымовом эксперименте для образования дымов смешанного состава в качестве ЛГМ были использованы древесные образцы березы и осины. Образцы березы массой  $M_1 \sim 500$  г подвергались термическому воздействию в КТР первой печи (с объемом КТР  $V_{КТР}$  10 л) при  $T_{п}$  500 °С в режиме пиролиза, т.е. при ограниченном доступе кислорода.

Термическое разложение древесных образцов осины массой  $M_2 \sim 300$  г проводилось в КТР второй печи (объемом  $V_{КТР}$  4 л), в режиме горения при температуре  $T_{п}$  650 °С, с приоткрытой дверцей КТР, т.е. при свободном доступе воздуха в зону прогрева образцов. Процессы разложения древесных образцов в обеих печах начинались одновременно, и продукты распада поступали в БАК на расстоянии 15 м друг от друга.

Во втором дымовом эксперименте в качестве ЛГМ использовались аналогичные типы древесных образцов. Но в этом случае образцы осины  $M_1 \sim 400$  г прогревались в КТР первой муфельной печи при  $T_{п}$  440 °С и разлагались в режиме пиролиза. Березовые образцы  $M_2 \sim 300$  г подвергались термическому воздействию во второй печи в режиме горения при  $T_{п}$  650 °С. Процессы термического разложения древесных образцов, так же как и во всех остальных экспериментах, начинались одновременно.

В третьем дымовом эксперименте условия образования дымов смешанного состава практически повторяли условия второго эксперимента, как по температуре нагревания древесных образцов, так и по их массе. Различие состояло лишь в том, что в первую печь вместо осиновых образцов закладывались березовые с той же массой, что и во втором эксперименте  $M_1 \sim 400$  г, а во вторую муфельную печь осиновые с массой  $M_2 \sim 300$  г. Температуры прогрева обеих печей сохранялись такими же, как и во втором дымовом эксперименте, —  $T_{п} \sim 440$  и 650 °С соответственно.

В четвертом дымовом эксперименте состав дымовой смеси формировался в результате рассеяния внутри БАК продуктов термического разложения трех источников. Кроме продуктов термического разложения из двух муфельных печей использовались продукты из третьего источника, который располагался на покрытой землей подложке и обеспечивал приток дымовых аэрозолей в режиме открытого горения. Сжигаемая биомасса третьего источника включала обычные для бореальных лесов материалы: хвойные ветви, березовую и осиную кору, листву и т.д. общей массой около 1,5 кг. Поскольку третьим источником обеспечивался заметный прогрев почвы, авторы не исключают небольшую эмиссию аэрозольных частиц почвенного происхождения. В качестве ЛГМ первой муфельной использовались смолистые образцы хвойной древесины (сосны,

кедра)  $M_1 \sim 500$  г, которые прогревались до температуры 500 °С и разлагались в режиме пиролиза. Во второй муфельной печи был реализован режим горения 300 г древесных образцов осины при температуре 650 °С.

Изменения микроstructures дымовых дисперсных смесей в БАК анализировались по результатам обращения спектрально-угловых значений коэффициента направленного светорассеяния  $\beta(\theta_j, \lambda_i)$ , полученных поляризационным спектрофелометром на 9 длинах волн  $\lambda_i$  в интервале 440–690 нм, под углами рассеяния  $\theta_j = 15; 45; 110; 135; 165^\circ$ . По данным оптических измерений спектрально-угловых характеристик аэрозольного светорассеяния с использованием методики, подробно описанной в [4], определялись параметры микроstructures дымового аэрозоля и комплексный показатель преломления частиц в трех диапазонах дисперсности.

Таким образом, исходную оптическую информацию для решения обратной задачи светорассеяния и восстановления микроstructures параметров дыма для каждого момента времени составляли 90 последовательно измеренных значений поляризационных компонент коэффициента направленного рассеяния  $\beta(\theta_j, \lambda_i)$ .

Процесс измерения выполнялся в автоматизированном режиме. Управление регистрацией параметров светорассеяния осуществлялось компьютером на основе разработанного алгоритма с последовательной записью и накоплением оптических данных в отдельных файлах. Полный цикл измерений по углам и длинам волн составлял 8–9 мин.

На рис. 1 для сравнения сведены временные зависимости значений коэффициента направленного светорассеяния, измеренные во всех четырех экспериментах спектрофелометром на длине волны  $\lambda = 500$  нм, для четырех углов светорассеяния  $\theta = 15; 45; 135; 165^\circ$ .

Из представленных на рис. 1 кривых (значения КНС по ординате оценивались по логарифмической шкале) прослеживается линейная тенденция изменения, что указывает на характерную экспоненциальную динамику изменения оптических сигналов практически для всех углов светорассеяния.

Как было показано ранее в [3], основной причиной тому является экспоненциальное изменение интегральных характеристик микроstructures дымовой смеси: в первую очередь счетной концентрации  $N$ . В результате процесса «сухого осаждения» дымовой смеси на стенках БАК существенно снижалась общая концентрация частиц  $N$ . Процесс «сухого осаждения» дымовой смеси идет не только при перемещениях внутри БАК, но и внутри трубок, предназначенных для подачи дисперсной смеси в рассеивающий объем спектрофелометра и ее возврата в камеру.

Экспоненциальное уменьшение уровня измеряемых оптических характеристик светорассеяния при одновременности их регистрации спектрофелометром приводит к систематической погрешности. Для понижения уровня погрешности измерения спектрально-угловых значений КНС применялась процедура

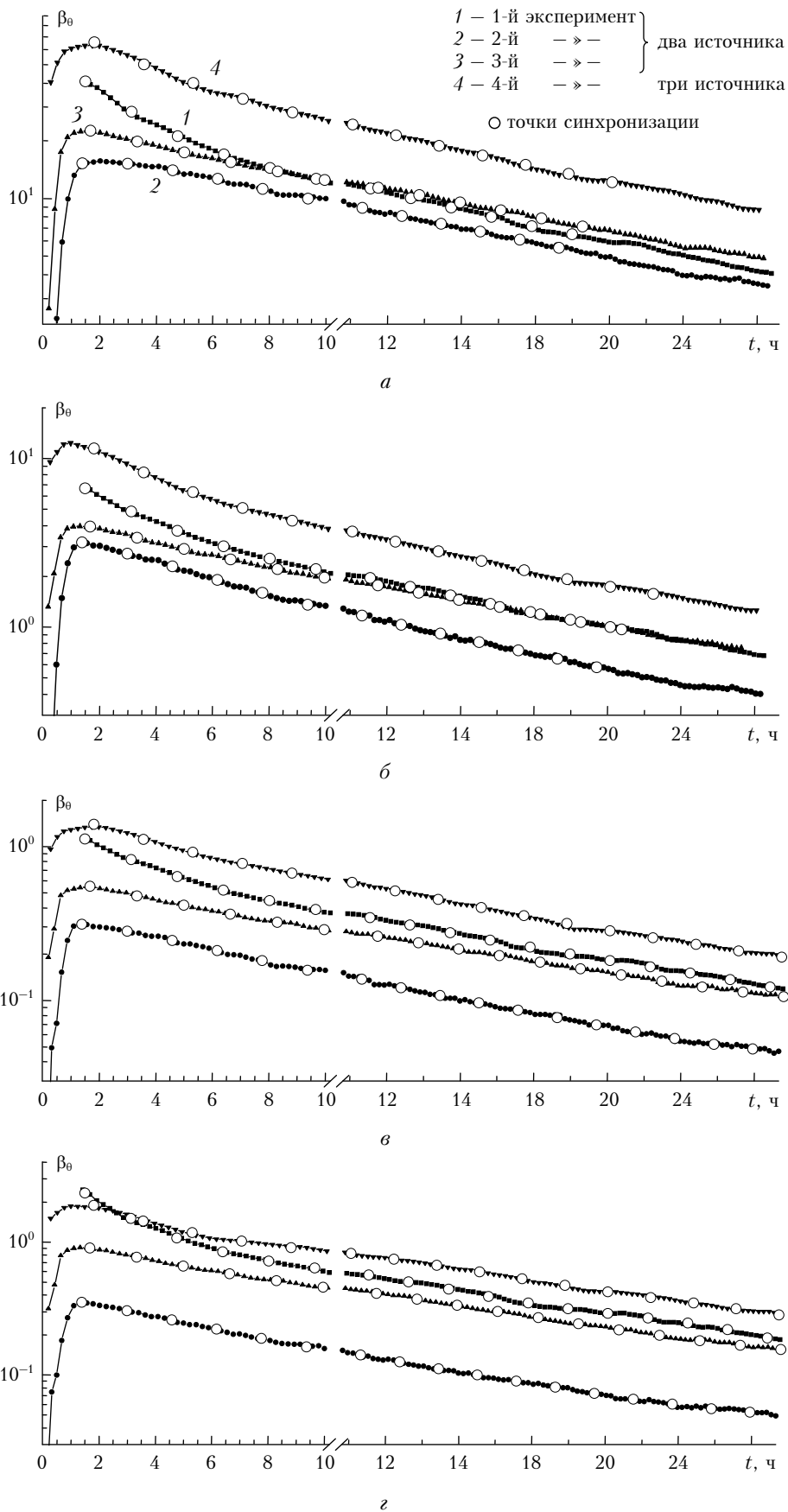


Рис. 1. Временная развертка значений КНС, измеренных на  $\lambda = 500 \text{ нм}$ , для углов рассеяния  $\theta = 15; 45; 135$  и  $165$

их синхронизации [2]. В результате все 90 значений КНС, следуя аппроксимации экспоненциальной зависимости, пересчитывались на один момент времени (см. рис. 1, кружочки).

Решение обратной задачи по спектрофелометрическим данным, полученным для дымов смешанного состава в предположении о постоянном значении  $m$  во всем диапазоне дисперсности, приводит к существенным расхождениям между измеренными и восстановленными оптическими характеристиками  $\beta(\theta_j, \lambda_i)$  для углов рассеяния  $\theta_j = 110, 135$  и  $165^\circ$ . В этом случае уровень рассогласования оптических характеристик на указанных углах рассеяния может достигать 50% и более.

В [4] было отмечено, что указанные различия можно существенно уменьшить, если использовать более детализированную методику определения оптических постоянных дымовых частиц. На рис. 2 представлены плотности распределения геометрического сечения частиц  $M_i$  по размерам  $s(r) = dS/dr$ , восстановленные по данным спектрофелометрических измерений (в дымах смешанного состава) с применением методики оценки среднеэффективных (по трем диапазонам дисперсности) значений КПП.

Результаты обращения спектрально-угловых функций КНС показали, что уточнение  $m$  в трех диапазонах дисперсности позволяет уменьшить относительную невязку между измеренными и расчетными значениями оптических характеристик до 7–10%.

Соответствующие оценки  $n$  и  $\chi$  в трех диапазонах дисперсности, полученные при анализе результатов первого дымового эксперимента, приведены во 2–7-й колонках табл. 1.

В первом дымовом эксперименте при прогревании древесных образцов в КТР муфельных печей были использованы достаточно высокие температуры термического разложения. Характерные тенденции изменения формы восстановленных распределений дымовых частиц по размерам  $s(r)$  подтвердили полученные ранее в [2] выводы. В частности, при повышении температуры пиролиза в начальных распределениях  $s(r)$  наблюдается достаточно резкое уменьшение содержания крупных частиц  $r > 650$  нм,

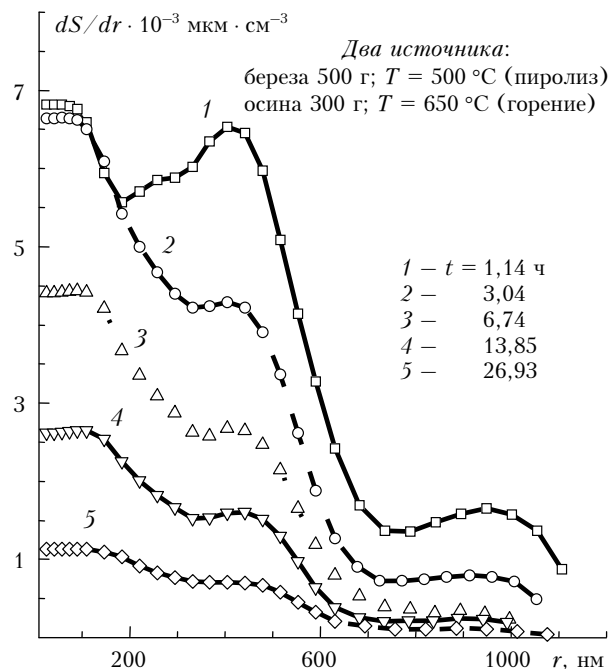


Рис. 2. Восстановленные плотности распределения геометрического сечения частиц по размерам для смешанных дымов, сформированных от двух источников в рамках первого эксперимента

но в то же время в составе дымовой смеси отмечено относительно высокое содержание частиц среднедисперсного интервала размеров  $r \sim 200 \div 700$  нм.

Из табл. 1 видно, что конкретные значения  $n$  и  $\chi$ , восстановленные по результатам первого эксперимента, достаточно резко меняются при переходе от первого интервала размеров ко второму и достаточно близки при переходе от второго интервала к третьему. Крупные частицы ( $r > 300$  нм) в дымах смешанного состава, по-видимому, образуются в основном в процессе пиролиза. На это указывают сделанные ранее в [2] оценки, из которых следует, что частицы дисперсной смеси низкотемпературного пиролиза в основном имеют слабое поглощение с  $\chi \sim 0,001 \div 0,007$ .

Таблица 1

$t, \text{ч}$	Диапазон, нм						$N \cdot 10^{-4}, \text{см}^{-3}$	$S \cdot 10^{-3}, \text{мкм}^2 \cdot \text{см}^{-3}$	$V \cdot 10^{-2}, \text{мкм}^3 \cdot \text{см}^{-3}$	$r_{\text{эф}}, \text{нм}$
	I		II		III					
1,1	$r_n = 30$ $n = 2,56$	$r_k = 190$ $\chi = 0,18$	$r_n = 190$ $n = 1,62$	$r_k = 310$ $\chi = 0,044$	$r_n = 310$ $n = 1,55$	$r_k = 1220$ $\chi = 0,014$	15,09	17,89	22,20	372
3,0	$r_n = 30$ $n = 2,35$	$r_k = 222$ $\chi = 0,21$	$r_n = 223$ $n = 1,673$	$r_k = 326$ $\chi = 0,055$	$r_n = 327$ $n = 1,56$	$r_k = 1050$ $\chi = 0,016$	14,44	13,22	13,56	308
6,7	$r_n = 30$ $n = 2,36$	$r_k = 212$ $\chi = 0,255$	$r_n = 213$ $n = 1,715$	$r_k = 345$ $\chi = 0,070$	$r_n = 346$ $n = 1,55$	$r_k = 1050$ $\chi = 0,017$	9,61	8,34	7,85	282
13,9	$r_n = 30$ $n = 2,29$	$r_k = 222$ $\chi = 0,252$	$r_n = 223$ $n = 1,743$	$r_k = 317$ $\chi = 0,083$	$r_n = 318$ $n = 1,562$	$r_k = 1040$ $\chi = 0,018$	5,72	4,96	4,67	282
26,9	$r_n = 30$ $n = 2,17$	$r_k = 242$ $\chi = 0,236$	$r_n = 243$ $n = 1,752$	$r_k = 329$ $\chi = 0,084$	$r_n = 330$ $n = 1,562$	$r_k = 1040$ $\chi = 0,020$	2,47	2,27	2,26	298

Примечание.  $r_n$  и  $r_k$  – начальная и конечная границы интервалов в нанометрах по шкале радиусов;  $n$  и  $\chi$  – реальная и мнимая части КПП дымовых частиц для соответствующего интервала размеров.

Из оценок КПП (см. табл. 1) также следует, что добавление продуктов горения в состав смешанных дымов ведет к появлению существенно поглощающей компоненты в интервале размеров 30–190 нм. Присутствие этой компоненты в составе дисперсной смеси ведет к заметному загрязнению средне- и грубо-дисперсной фракций дымовых частиц.

В частности, если показатель поглощения крупных частиц на начальном этапе увеличился (по сравнению с пиролизными дымами) примерно в 3–4 раза, то эффективность поглощения среднелдисперсной фракции увеличилась сразу на порядок. Причем эффект загрязнения дымовых частиц «пиролизного» происхождения выявляется не только в начале эксперимента, но и по ходу спектрофелометрических измерений. Причем изменения  $\chi$  в первом интервале достигают 25, во втором ~ 70 и в третьем 35%.

Результаты решения обратной задачи также показали, что даже небольшие изменения границ интервалов  $r_n$  и  $r_k$  ведут к увеличению относительной невязки между восстановленными и измеренными оптическими характеристиками. Отметим также, что, несмотря на достаточно существенные изменения значений КПП по шкале размеров, особенно  $\chi$ , восстановленные из решения обратной задачи распределения  $s(r)$  представляют собой достаточно гладкие кривые, скачков и резких спадов не наблюдается.

В первом дымовом эксперименте масса древесных образцов, используемых для пиролиза, в первой печи  $M_1 \sim 500$  г почти вдвое превосходила массу древесных образцов, используемых в процессе горения  $M_2 \sim 300$  г, т.е. образовавшаяся дымовая смесь была преимущественно пиролизного происхождения. В [2] было установлено, что с повышением температуры пиролиза выше 450 °С мнимая часть показателя преломления дымовых частиц возрастает. В связи с этим во втором и третьем дымовых экспериментах было решено уменьшить относительную долю дымовых частиц, генерируемых в процессе пиролиза, и повысить относительное содержание частиц дымов горения. Поэтому, оставив прежней массу образцов ( $M_2 \sim 300$  г), взятых для процесса горения, мы уменьшили массу образцов  $M_1$ , используемых в процессе пиролиза, до 400 г. Кроме того, чтобы увеличить различие КПП дымовых частиц пиролиза и горения, была понижена также температура пиролиза до  $T_{п} \sim 440$  °С.

Результаты обращения данных второго и третьего дымовых экспериментов в целом подтвердили ранее полученные выводы и оценки для смешанных дымов от одного источника [4], но в то же время обнаружили и некоторую специфику формирования состава смешанных дымов от нескольких разнесенных источников.

Например, оценки  $n$  и  $\chi$ , полученные для среднелдисперсных и крупных частиц во втором эксперименте (табл. 2), достаточно хорошо отразили увеличение в составе дисперсной смеси относительной доли дымов горения. В частности, полученные оценки для второго эксперимента показывают, что мнимая часть КПП частиц второго и третьего интервалов дисперсности по сравнению с первым экспериментом (на начальных стадиях процесса) увеличились практически вдвое.

В то же время все (и первый, и второй, и третий) дымовые эксперименты подтвердили, что между частицами тонкодисперсной фракции  $r < 200$  нм и оптическими свойствами частиц других более крупных фракций  $r > 200$  нм имеются существенные различия по КПП. Хорошо прослеживается и единая тенденция к возрастанию мнимой части КПП во временной динамике.

Понижение температуры в КТР первой печи (во втором эксперименте по сравнению с первым), а также изменение массы и типа древесного образца приводят не только к заметному изменению формы  $s(r)$  дымовой смеси (ср. рис. 2 и 3), но и к другой последовательности вариаций значений компонент КПП как по шкале размеров дымовых частиц, так и по времени эксперимента (см. табл. 2).

При пиролизе осины (древесина с относительно низким содержанием смолистых соединений) в плотности распределения суммарного сечения по размерам  $s(r) = dS/dr$  не обнаруживается локальный максимум, который является характерной особенностью дисперсной смеси, сформировавшейся в первом эксперименте при пиролизе 500 г березовой древесины. Отсутствие локального максимума в распределениях  $s(r)$  во втором эксперименте предопределило более узкий спектр размеров частиц дымовой смеси, сформировавшихся при смешении продуктов термического разложения осиновых сортов древесины в режиме пиролиза с продуктами горения березовых

Таблица 2

$t, \text{ ч}$	Диапазон, нм						$N \cdot 10^{-4}, \text{ см}^{-3}$	$S \cdot 10^{-3}, \text{ мкм}^2 \cdot \text{ см}^{-3}$	$V \cdot 10^{-2}, \text{ мкм}^3 \cdot \text{ см}^{-3}$	$r_{\text{эф}}, \text{ нм}$
	I		II		III					
1,1	$r_n = 30$ $n = 1,968$	$r_k = 196$ $\chi = 0,216$	$r_n = 197$ $n = 1,554$	$r_k = 316$ $\chi = 0,071$	$r_n = 317$ $n = 1,62$	$r_k = 940$ $\chi = 0,031$	11,73	8,57	5,74	201
2,9	$r_n = 30$ $n = 1,924$	$r_k = 202$ $\chi = 0,25$	$r_n = 203$ $n = 1,573$	$r_k = 332$ $\chi = 0,073$	$r_n = 333$ $n = 1,622$	$r_k = 930$ $\chi = 0,044$	11,05	8,75	6,03	207
6,5	$r_n = 30$ $n = 1,92$	$r_k = 226$ $\chi = 0,259$	$r_n = 227$ $n = 1,620$	$r_k = 327$ $\chi = 0,084$	$r_n = 328$ $n = 1,621$	$r_k = 920$ $\chi = 0,054$	7,74	7,03	5,74	245
13,3	$r_n = 30$ $n = 2,29$	$r_k = 222$ $\chi = 0,252$	$r_n = 223$ $n = 1,743$	$r_k = 317$ $\chi = 0,083$	$r_n = 318$ $n = 1,562$	$r_k = 1040$ $\chi = 0,18$	4,27	4,48	4,00	268
26,0	$r_n = 30$ $n = 2,17$	$r_k = 242$ $\chi = 0,236$	$r_n = 243$ $n = 1,752$	$r_k = 329$ $\chi = 0,084$	$r_n = 330$ $n = 1,562$	$r_k = 1040$ $\chi = 0,020$	1,93	2,11	2,09	297

древесных образцов, что, по-видимому, обусловило и другие специфические особенности микроструктуры во втором эксперименте в БАК. Правая граница функции распределения  $s(r)$  в этом случае не превышает 1000 нм.

Как уже было отмечено, во втором эксперименте эффективность поглощения дымовых частиц второго и третьего интервалов размеров дымовых частиц заметно выше (см. табл. 2), чем в первом эксперименте, но при этом значения  $\chi$  различаются между собой уже не столь существенно, как в первом дымовом эксперименте, — всего лишь в 2 раза. Как и в первом дымовом эксперименте, сохраняются существенные отличия КПП для частиц из первого и двух последующих интервалов спектра размеров.

Отметим также, что во втором эксперименте временная динамика изменения  $\chi$  для частиц первого и второго интервалов характеризуется тенденцией возрастания и составляет 16–17%, в то время как для третьего интервала размеров с некоторого момента наблюдается тенденция уменьшения (см. 7-ю колонку табл. 2), причем спад составляет ~40–43%, что, возможно, связано с понижением эффективности взаимодействия крупных частиц (пиролиза осины) с «сажевой» компонентой, которая сосредоточена в составе тонкодисперсной фракции дымов горения березовых образцов.

С другой стороны, достаточно высокую оценку начального значения  $\chi \sim 0,031$  для дымовых частиц из третьего подынтервала размеров, например по сравнению с результатами, полученными в первом эксперименте  $\chi \sim 0,014$ , можно интерпретировать как следствие того, что при горении березовых образцов сажеобразующие соединения достаточно эффективно проникают в состав более крупных частиц еще в пределах КТР.

В третьем дымовом эксперименте была предпринята попытка повторить температурные условия пиролиза при той же массе  $M_1 \sim 400$  г, которая была выбрана для второго дымового эксперимента, но с использованием березовых образцов. При этом во второй печи для горения была использована аналогичная (первому эксперименту) масса  $M_2 \sim 300$  г осинового образцов древесины.

Замена в третьем эксперименте осинового образцов древесины на березовые при пиролизе привела к заметному расширению основной моды распределения (ср. рис. 3 и 4), ее правая граница сдвинулась в область крупных размеров до  $r \sim 600$  нм, в то время как во втором эксперименте она составляла 350 нм. Иными словами, при пиролизе березовых образцов, обладающих повышенным содержанием смол, более эффективно генерируются среднечисленные дымовые частицы.

В то же время динамика изменения значений  $\chi$  (по ходу третьего эксперимента) с 1-го по 3-й интервалы шкалы дисперсности составила соответственно 46, 67 и 42% (табл. 3).

В целом результаты анализа спектрофелометрических данных, измеренных в ходе трех дымовых экспериментов, в своем сочетании позволяют сделать

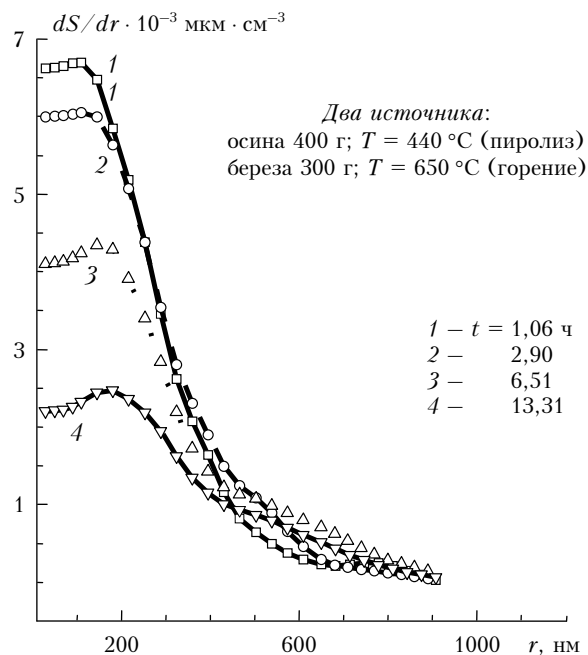


Рис. 3. Плотности распределения геометрического сечения частиц по размерам, восстановленные для дыма смешанного состава во втором эксперименте

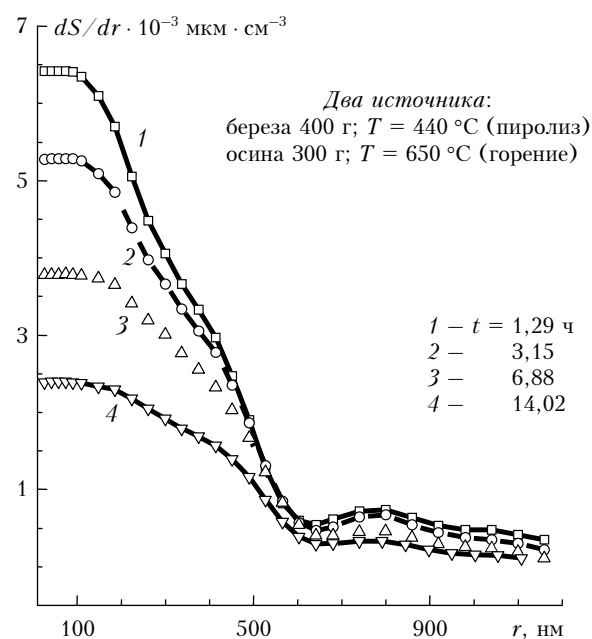


Рис. 4. Плотности распределения геометрического сечения частиц по размерам, восстановленные по данным нефелометрических измерений по ходу третьего дымового эксперимента

вывод о том, что крупные дымовые частицы, генерируемые из березовых образцов в режиме пиролиза, более эффективно усваивают «сажевую» составляющую дыма, чем дымы пиролиза осины.

Отметим также, что в результате понижения температуры пиролиза в третьем эксперименте ширина распределения частиц по размерам, восстановленного по спектральным и угловым зависимостям

Таблица 3

$t, \text{ч}$	Диапазон, нм						$N \cdot 10^{-4}, \text{см}^{-3}$	$S \cdot 10^{-3}, \text{мкм}^2 \cdot \text{см}^{-3}$	$V \cdot 10^{-2}, \text{мкм}^3 \cdot \text{см}^{-3}$	$r_{\text{эф}}, \text{нм}$
	I		II		III					
1,3	$r_{\text{н}} = 30$ $n = 1,87$	$r_{\text{к}} = 244$ $\chi = 0,156$	$r_{\text{н}} = 245$ $n = 1,60$	$r_{\text{к}} = 320$ $\chi = 0,026$	$r_{\text{н}} = 321$ $n = 1,58$	$r_{\text{к}} = 1220$ $\chi = 0,016$	13,92	11,27	10,60	282
3,2	$r_{\text{н}} = 30$ $n = 1,89$	$r_{\text{к}} = 246$ $\chi = 0,168$	$r_{\text{н}} = 247$ $n = 1,604$	$r_{\text{к}} = 326$ $\chi = 0,028$	$r_{\text{н}} = 327$ $n = 1,579$	$r_{\text{к}} = 1220$ $\chi = 0,018$	11,54	9,80	9,31	285
6,9	$r_{\text{н}} = 30$ $n = 1,93$	$r_{\text{к}} = 247$ $\chi = 0,205$	$r_{\text{н}} = 248$ $n = 1,626$	$r_{\text{к}} = 327$ $\chi = 0,046$	$r_{\text{н}} = 328$ $n = 1,58$	$r_{\text{к}} = 1220$ $\chi = 0,021$	8,36	7,59	7,30	289
14,0	$r_{\text{н}} = 30$ $n = 1,95$	$r_{\text{к}} = 242$ $\chi = 0,24$	$r_{\text{н}} = 243$ $n = 1,662$	$r_{\text{к}} = 317$ $\chi = 0,053$	$r_{\text{н}} = 318$ $n = 1,582$	$r_{\text{к}} = 1220$ $\chi = 0,025$	5,29	4,92	4,80	293

КНС, заметно увеличилась по сравнению с шириной распределения в первом и втором экспериментах и правая граница составила  $r_{\text{к}} \sim 1220$  нм. Заметно расширился и интервал размеров тонкодисперсной активно поглощающей фракции до  $r_{\text{к}} \sim 250$  нм.

Результаты анализа спектрофелометрических данных, измеренных в четвертом дымовом эксперименте, представлены на рис. 5 и в табл. 4.

В четвертом эксперименте одновременно с увеличением количества источников термического разложения существенно возросла и суммарная масса используемых образцов ЛГМ, что привело к заметному возрастанию величины регистрируемых оптических сигналов (см. рис. 1).

Вследствие этого результаты обращения спектрофелометрических данных показали на более чем двукратное увеличение относительного содержания тонкодисперсной фракции частиц (см. рис. 5). Основная мода распределения  $s(r)$  также заметно расширилась до  $r_{\text{к}} \sim 600 \div 650$  нм и практически охватила диапазон размеров не только обычной тонкодисперсной фракции ( $r < 250$  нм), но и среднелдисперсных частиц.

На начальном этапе ( $t < 2$  ч) четвертого дымового эксперимента оптический вклад крупных дымовых частиц  $r \sim 1440$  нм в формирование значений спектрофелометрических характеристик светорассеяния достаточно значим, что позволяет при имеющихся погрешностях оптических измерений оценить искомое распределение  $dS/dr$  на интервале дисперсности от 30 до 1500 нм.

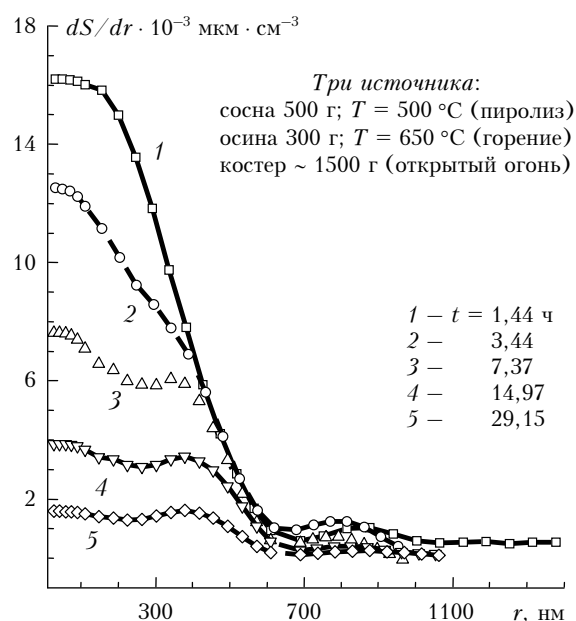


Рис. 5. Плотности распределения геометрического сечения частиц по размерам, восстановленные по данным нефелометрических измерений по ходу четвертого дымового эксперимента

На последующих этапах восстановленные распределения  $dS/dr$  дымовых частиц заметно сужаются до границ, характерных для дисперсных смесей, рассмотренных по результатам первого, второго и третьего дымовых экспериментов.

Таблица 4

$t, \text{ч}$	Диапазон, нм						$N \cdot 10^{-4}, \text{см}^{-3}$	$S \cdot 10^{-3}, \text{мкм}^2 \cdot \text{см}^{-3}$	$V \cdot 10^{-2}, \text{мкм}^3 \cdot \text{см}^{-3}$	$r_{\text{эф}}, \text{нм}$
	I		II		III					
1,4	$r_{\text{н}} = 30$ $n = 1,759$	$r_{\text{к}} = 211$ $\chi = 0,069$	$r_{\text{н}} = 212$ $n = 1,741$	$r_{\text{к}} = 227$ $\chi = 0,069$	$r_{\text{н}} = 228$ $n = 1,548$	$r_{\text{к}} = 1440$ $\chi = 0,021$	30,02	27,84	24,07	259
3,4	$r_{\text{н}} = 30$ $n = 1,950$	$r_{\text{к}} = 214$ $\chi = 0,145$	$r_{\text{н}} = 215$ $n = 1,698$	$r_{\text{к}} = 285$ $\chi = 0,067$	$r_{\text{н}} = 286$ $n = 1,548$	$r_{\text{к}} = 998$ $\chi = 0,025$	22,93	21,35	17,83	251
7,4	$r_{\text{н}} = 30$ $n = 1,950$	$r_{\text{к}} = 224$ $\chi = 0,159$	$r_{\text{н}} = 225$ $n = 1,662$	$r_{\text{к}} = 295$ $\chi = 0,065$	$r_{\text{н}} = 296$ $n = 1,570$	$r_{\text{к}} = 1020$ $\chi = 0,027$	16,48	14,10	12,29	262
15,0	$r_{\text{н}} = 30$ $n = 2,040$	$r_{\text{к}} = 246$ $\chi = 0,190$	$r_{\text{н}} = 247$ $n = 1,676$	$r_{\text{к}} = 310$ $\chi = 0,066$	$r_{\text{н}} = 311$ $n = 1,560$	$r_{\text{к}} = 1100$ $\chi = 0,026$	8,47	8,15	7,93	292
29,2	$r_{\text{н}} = 30$ $n = 2,111$	$r_{\text{к}} = 233$ $\chi = 0,222$	$r_{\text{н}} = 234$ $n = 1,628$	$r_{\text{к}} = 333$ $\chi = 0,057$	$r_{\text{н}} = 334$ $n = 1,569$	$r_{\text{к}} = 1120$ $\chi = 0,028$	3,49	3,59	3,74	312

Анализ специфики изменения компонент КПП по интервалам дисперсности в четвертом эксперименте (с источником открытого горения) показал, что на начальном этапе значения оптических «постоянных» частиц из «тонкодисперсного» подынтервала мало отличаются от аналогичных характеристик частиц из «промежуточного» подынтервала (см. табл. 4, первая строка).

Причем для так называемого «промежуточного» (между «сажевыми» и умеренно поглощающими частицами дымов) интервала характерны не только расширение его границ по ходу эксперимента, но и существенный (для оптических свойств дыма) сдвиг от первоначальных значений 211–227 до 227–333 нм.

Учитывая тот факт, что включение третьего источника (горения) привело к более чем двукратному увеличению относительного содержания в дисперсной смеси дымовых частиц тонкодисперсной фракции, есть достаточные основания полагать, что именно продукты открытого горения предопределили начальные значения для  $n = 1,759$  и  $\chi = 0,069$ .

Продукты горения от третьего источника, в отличие от продуктов горения древесных материалов во второй муфельной печи, попадают в БАК, минуя ограниченное пространство КТР (муфельной печи). Эффективно рассеиваясь внутри камеры под воздействием температурных неоднородностей, тонкодисперсная фракция в виде высокомолекулярных комплексов из углеводородных радикалов (типа  $C_nH_m$ ) резко теряет свою счетную концентрацию.

Очевидно, что это ведет к замедлению процесса взаимного коагуляционного укрупнения частиц нанометрового диапазона, в том числе и тех, которые вследствие малости их дифракционного размера для используемого набора длин волн практически не обнаружимы, так как по светорассеивающим свойствам воспринимаются как некоторая добавка к молекулярному рассеянию. Фактически оптический вклад аэрозольных частиц с  $r < 30$  нм, которые для видимого диапазона длин волн являются рэлеевскими, по величине сопоставим с молекулярной компонентой дисперсной смеси, т.е. на фоне других методических погрешностей эксперимента представляет собой лишь некоторую дополнительную погрешность регистрации оптических характеристик спектрофелометром.

Данная гипотеза согласуется и с тем обстоятельством (обнаруживаемым по результатам обращения), что по ходу эксперимента эффективность поглощения тонкодисперсной фракции все же возрастает и через 15 ÷ 30 ч уже достигает значений  $\chi \sim 0,22$ . Расширяется при этом и подынтервал размеров активно поглощающей фракции. Эффективность пополнения активно поглощающей тонкодисперсной фракции дымового аэрозоля из нанометрового диапазона размеров  $r < 30$  нм заметно уступает эффективности сухого осаждения дымовых частиц на стенки БАК. Суммарное сечение и объем дымовых частиц (см. табл. 4, две предпоследние колонки) устойчиво снижаются, однако признаки пополнения сажей тонкодисперсного интервала из нанометрового диапазона прослеживаются по изменению мнимой

части показателя преломления по всем трем диапазонам размеров.

## Основные результаты

Выполнена серия дымовых экспериментов, направленных на исследование специфики формирования дымов смешанного состава от нескольких разнесенных источников термического разложения разноразмерных древесных материалов.

Показано, что для адекватного прогноза оптических свойств дымовых аэрозолей необходимо учитывать не только сложную неоднородную структуру дисперсного состава (плотности распределения дымовых частиц по размеру  $s(r)$ ), но и вариации комплексного показателя преломления  $m = n - i\chi$  по спектру размеров дымовых частиц.

Данные дымовых экспериментов и результаты обращения спектрально угловых функций аэрозольного светорассеяния, измеренных нефелометром, показывают, что при смешивании продуктов термического разложения ЛГМ образуются дымы, состоящие в основном из двух разнесенных по шкале размеров аэрозольных компонентов, а именно: тонкодисперсного ( $r < 250$  нм) с мнимой частью КПП  $\chi \sim 0,1 \div 0,25$ , и крупнодисперсного частиц ( $r > 300$  нм) с  $\chi \sim 0,005 \div 0,08$ . Вторая компонента включает в себя два диапазона дисперсности частиц с достаточно близкими значениями  $n$  и  $\chi$ . Однако различия между ними являются значимыми для спектральных и угловых характеристик светорассеяния в дымах.

В проведенных экспериментах, во временной динамике трансформации дымового аэрозоля в БАК в основном наблюдается устойчивое увеличение  $\chi$  практически по всем диапазонам дисперсности частиц. Поскольку светорассеивающие свойства частиц каждого диапазона размеров заметно различаются между собой, устойчивое увеличение среднеэффективных по диапазону размеров значений компонент КПП говорит не о внешнем смещении дисперсных частиц, а о проникновении тонкодисперсной поглощающей компоненты в структуру частиц других диапазонов, в том числе и простым оседанием на поверхности последних.

Для видимого диапазона оптического спектра данное заключение по микроструктуре смешанных дымов можно рассматривать как универсальное следствие, особенно при повышенных температурах пиролиза  $T_{\text{п}} \sim 450\text{--}600$  °С, но не переходящих в стадию горения.

В эксперименте с источником открытого горения ЛГМ для частиц «тонкодисперсного» интервала размеров наблюдалась максимальная динамика  $\chi$  от 0,07 до 0,25. В процессе временной трансформации дыма в этом случае достаточно существенные изменения  $\chi$  происходят и во втором интервале размеров (среднедисперсных частиц), которые в максимуме могут достигать 70% от среднего значения по интервалу. Для третьего интервала (крупных дымовых частиц) вариации  $\chi$  также существенны и достигают 45%.



Вывод о двух разнесенных по шкале размеров аэрозольных компонентах как характерных составляющих микроструктуры смешанных дымов (пиролиз + горение) просматривается и по другим дымовым экспериментам, различающимся по условиям термического разложения ЛГМ, а именно: по температуре, исходной массе образцов, сорту древесины [1–4, 6].

Таким образом, продукты термического разложения древесных материалов представляют собой неравновесные дымовые смеси, как правило, одновременно содержащие и сажевую, и умеренно поглощающую компоненты [8]. Результаты обращения спектрофелометрических данных показывают, что на границе между микро- и среднедисперсной фракциями выявлен резкий скачок мнимой части показателя преломления. Выявленное разнообразие оптико-микрофизических свойств этих смесей возникает вследствие подвижной границы между сажевой и умеренно поглощающей компонентой, которая зависит не только от условий формирования дымовых смесей в КТР и БАК в том числе и на стадии смешивания от нескольких источников [7], но и от процесса дальнейшего саморазвития дымовых смесей, вследствие их неравновесного состояния.

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

1. 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 атмосфер. и океана. 2008. Т. 21. № 3. С. 218–222.

2. 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 атмосфер. и океана. 2008. Т. 21. № 4. С. 288–293.
3. 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 атмосфер. и океана. 2008. Т. 21. № 5. С. 386–392.
4. Рахимов Р.Ф., Макиенко Э.В. Некоторые методические дополнения к решению обратной задачи для восстановления параметров дисперсной структуры дымов смешанного состава // Оптика атмосфер. и океана. 2010. Т. 23. № 3. С. 183–189.
5. Рахимов Р.Ф., Макиенко Э.В., Панченко М.И., Козлов В.С., Шмаргунов В.П. Изменение микроструктуры древесных дымов в малогабаритной аэрозольной камере под воздействием различных факторов // Оптика атмосфер. и океана. 2003. Т. 16. № 4. С. 337–346.
6. Рахимов Р.Ф., Макиенко Э.В., Козлов В.С. Влияние коры древесных материалов на оптикомикрофизические свойства пиролизных дымов // Оптика атмосфер. и океана. 2010. Т. 23. № 5. С. 412–418.
7. Исаков А.А., Тихонов А.В. О сопоставлении усредненных направлений прихода в Подмоскowie воздушных масс со средними величинами параметра Хенела и показателя преломления вещества частиц // Оптика атмосфер. и океана. 2010. Т. 23. № 1. С. 9–13.
8. Самсонов Ю.Н., Попова С.А., Беленко О.А., Чанкина О.В. Химический состав и дисперсные характеристики дымовой аэрозольной эмиссии от пожаров в boreальных лесах Сибири // Оптика атмосфер. и океана. 2008. Т. 21. № 6. С. 523–531.

*R.F. Rakhimov, E.V. Makienko, M.V. Panchenko. Optical-microphysical properties of mixed smokes from several separated sources.*

A series of experiments were performed, aimed at investigation of the specific manner of formation of the mixed composition smokes from several separate sources of thermal decomposition of different wooden materials. It is shown that for adequate prediction of optical properties of the smoke aerosol it is necessary to take into account not only complex inhomogeneous structure of the disperse composition (the smoke particle size distribution density  $s(r)$ ), but variations of the complex refractive index  $m = n - i\chi$  in the size spectrum of smoke particle as well. When mixing the products of thermal decomposition of forest combustible materials, the smokes are generated which consist of mainly two separate aerosol components with different sizes: the finely dispersed one (with a size of  $< 250$  nm) with imaginary part of the complex refractive index  $\chi \sim 0.1 \div 0.25$ , and the moderately dispersed one ( $> 300$  nm) with imaginary part  $\chi \sim 0.005 \div 0.08$ . It is shown that the increase of the mean effective values of the components of CRI in the size ranges is the consequence not of external mixing of the disperse components, but the penetration of the finely dispersed absorbing component into the structure of particles of other sizes.