

УДК 536.46

ПЛАМЕНА ПОЖАРОТУШАЩИХ АЭРОЗОЛЕОБРАЗУЮЩИХ СОСТАВОВ

FLAMES OF FIRE EXTINGUISHING AEROSOL COMPOSITIONS

А. Н. Лепяев, С. И. Ксенофонов, К. Ю. Ташкова

A. N. Lepaev, S. I. Ksenofontov, K. Yu. Tashkova

ФГБОУ ВПО «Чувашский государственный педагогический университет им. И. Я. Яковлева», г. Чебоксары

Аннотация. В работе изучена структура пламени аэрозолеобразующего состава. Показаны зоны пламени с резкими градиентами температуры, где эффективность генерации аэрозоля высока. Определены параметры образующегося аэрозоля. Функция распределения частиц носит одно-модальный характер, и максимум ее находится на диаметре 3 мкм. На оси пламени обнаружено множество частиц окислителя, размеры которых уменьшаются с высотой. Некоторые частицы окислителя консолидированы в группы, размеры которых доходят до 2 мм. Устойчивость консолидации частиц обеспечивается противодействием фронта горения обращенного сферического пламени, существующего вокруг консолидированной группы.

Abstract. In the paper we study the structure of the flame of aerosol composition. The article shows the zones of the flame with sharp temperature gradients where the efficiency of aerosol generation is high. It also determines the parameters of the resulting aerosol. The distribution function of particles is of unimodal character, and its maximum diameter is 3 μm . On the axis of the flame there have been found many particles of oxidizer, the size of which decreases with respect to the height. Some particles of oxidizer are consolidated in the group, the size of which reaches up to 2 mm. Resistance to the consolidation of the particles is provided by the back pressure of the combustion front facing the spherical flame that exists around the consolidated group.

Ключевые слова: *пламя, температура, аэрозоль, концентрация, функция распределения частиц, нитрат калия.*

Keywords: *flame, temperature, aerosol, concentration, function of distribution of particles, potassium nitrate.*

Актуальность исследуемой проблемы. Пожаротушащие аэрозолеобразующие составы (АОС) представляют особый класс пиротехнических составов, структура пламени которых недостаточно исследована. До сих пор не изучен механизм тушения очага горения. Целью настоящей работы является выявление области локализации дисперсной фазы в пламени и определение параметров ансамбля дисперсных частиц. При горении данных составов в специальных генераторах в окружающую среду должны выбрасываться частицы как можно меньших размеров. Концентрация дисперсных частиц тушащего состава должна быть соизмеримой с концентрацией активных частиц в пламени горючего вещества, подвергаемого тушению [5], [1], [2]. Хотя режимы горения состава в генераторном режиме и при свободно конвективном режиме горения отличаются, исследования при последнем позволяют выявить как температуру пламени и область локализации максимальной температуры, так и дисперсный состав частиц в пламени.

Материал и методика исследований. Компонентный состав и параметры изготовленных образцов приведены в таблице 1. Образцы сжигались в камере при комнатных условиях. Идитол – фенолформальдегидная смола – выполняет роль горючего, ДЦДА – дициандиаמיד – является отвердителем смолы.

Таблица 1

Параметры состава

Название	Компонентный состав	Масса шашки, г	Высота шашки h, мм	Время горения t, с	Линейная скорость U, мм/с
АОС-1	KNO ₃ – 70%, идитол – 11%, ДЦДА – 19%	12	19,6	6,88	2,85

Процесс горения фиксировался на цифровой фотокамере со временем экспозиции $1/250 = 4$ мс со скважностью 140 мс и на видеокамере через плотный светофильтр со скоростью 25 кадр/с. Полученные фотоматериалы обрабатывались с помощью современных компьютерных технологий и программных средств [4], [6], [7].

Результаты исследований и их обсуждение. Пламя АОС-1 имеет желтый цвет. На высоте 60 мм начинается турбулизация потока и образование дыма с красноватым оттенком (рис. 1).

Свечение пламени наблюдается до высоты 250 мм. Далее простирается несветящаяся дымка. В область несветящейся дымки выбрасываются крупные дисперсные частицы красноватого цвета, свечение которых продолжается вплоть до высоты 800 мм. Размеры крупных частиц колеблются от 100 до 400 мкм. Расстояние между ними велико.

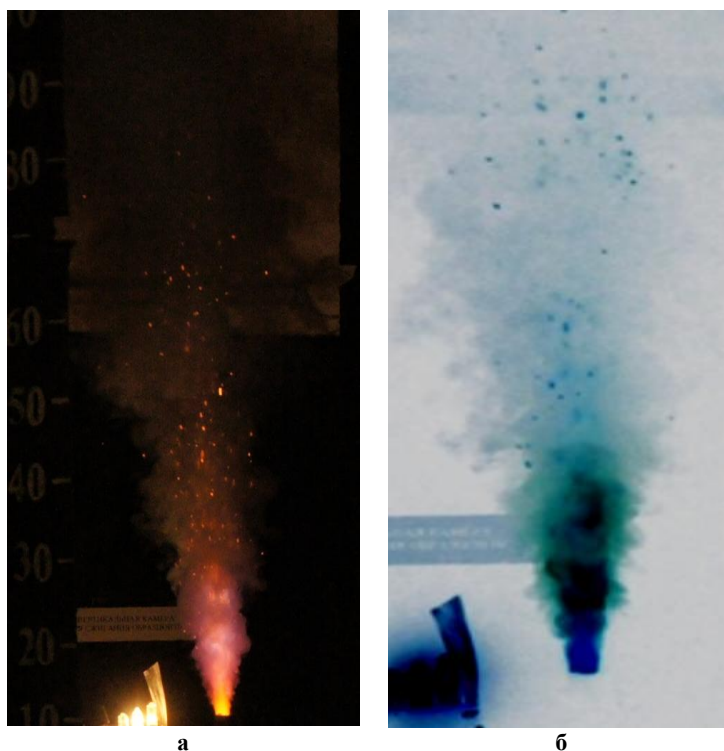


Рис. 1. Фотографии пламени: а) прямая съемка, б) инвертированная картина пламени

Инвертированный снимок показывает (рис. 1б), что интенсивное образование дымки происходит по боковой поверхности светящегося пламени.

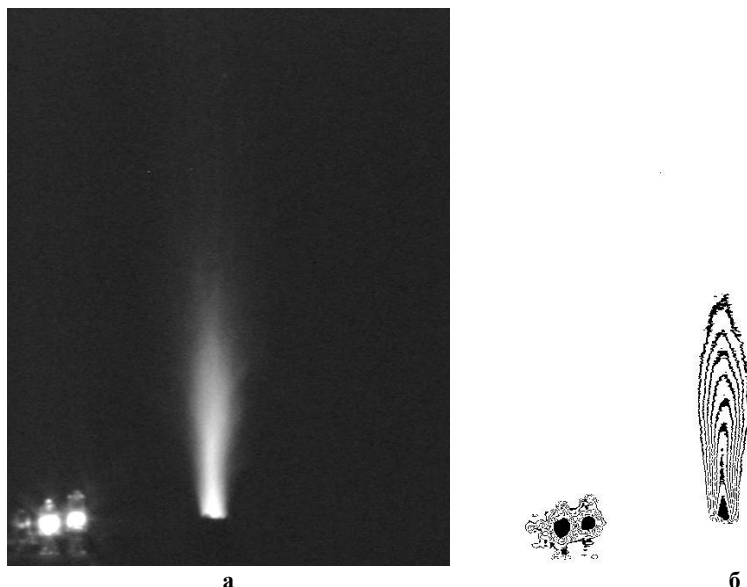


Рис. 2. Снимок пламени: а) фотография пламени, полученная через плотный светофильтр, б) изофоты пламени, полученные через каждые 10 отн. ед. яркости

В этой зоне пламени образовавшаяся дымка отличается от дыма в шлейфе горящего образца. Размеры данной зоны простираются по высоте от 3 см до 20 см над поверхностью шашки.

Фотография пламени, снятая через плотные светофильтры, приведена на рис 2а. Комбинированный светофильтр, состоящий из стандартных наборов светофильтров типа ИКС-1, ИКС-3 и НС-8, позволяет отсечь от излучения пламени менее яркие зоны. Приведенный снимок по сути является инфракрасным изображением пламени в ближнем диапазоне. Видно, что у самой поверхности шашки имеется яркая зона. С дальнейшим увеличением высоты яркость зон пламени уменьшается. Изофоты, выделенные через каждые 10 относительных единиц яркости, подчеркивают данную структуру светящейся части пламени (рис. 2б).

3D-термограмма пламени, приведенная на рис. 3а в условных цветах, также отображает яркостную картину пламени. На 3D-термограмме можно увидеть вылетающие из пламени дисперсные частицы, температура которых выше, чем уровень фона. Распределение температуры пламени по высоте приведено на рис 3б. Линия сканирования температуры соответствует координате 128 мм по оси ox (рис. 3а).

Непосредственно на срезе картонной оболочки температура пламени равна 1380 К. До высоты $h = 30$ мм температура убывает с градиентом $dT/dh = -4,23$ К/мм. В интервале высот 85–132 мм градиент температуры равен $-2,8$ К/мм. С дальнейшим повышением высоты величина градиента температуры увеличивается до $-4,33$ К/мм. Измерения проводились от условной температуры фона 815 К. Таким образом, высокотемпературная зона простирается до 220 мм.

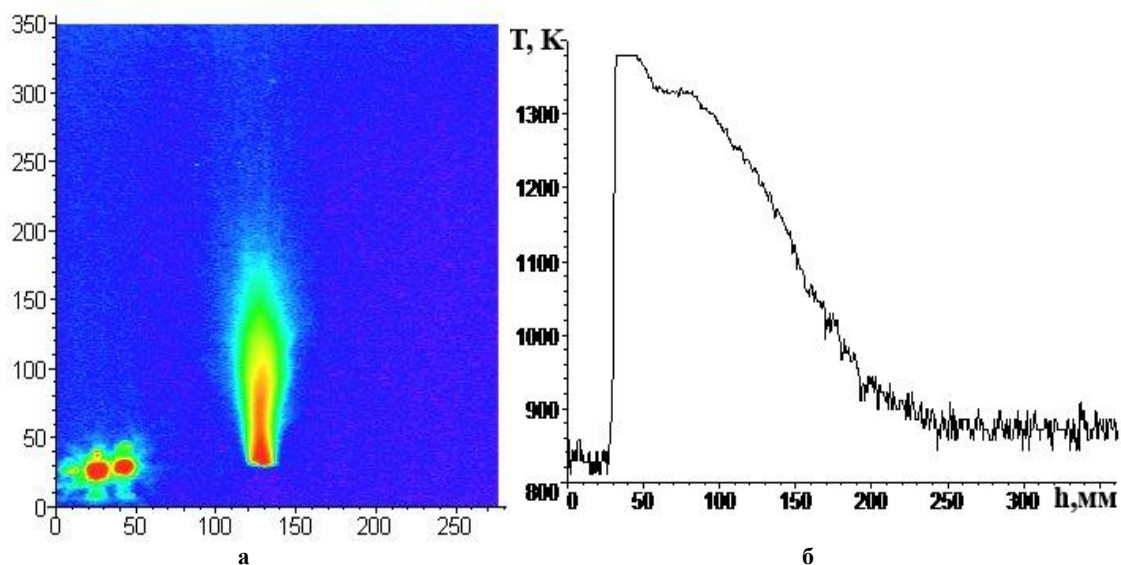


Рис. 3. Снимок пламени: а) 3D-термограмма пламени в условных цветах, б) распределение температуры по высоте пламени

Также изучены распределения температуры вдоль радиуса пламени. У основания пламени градиент температуры высок, а с увеличением высоты пламени его значение уменьшается. Изменения градиента температуры на разных высотах сведены в таблицу 2.

Табличные значения градиента температуры вдоль радиуса пламени намного выше по абсолютному значению градиента по высоте пламени.

Таблица 2

Градиент температуры вдоль радиуса пламени

Высота, мм	36	80	130	170
dT/dr , К/мм	102	32	16	8

Дисперсный анализ, проведенный методом проноса пластинок, показал, что пламя представляет собой плотный двухфазный поток. Дисперсная фаза продуктов сгорания разнообразна. На рис. 4 приведен участок пробоотборника, полученный на оптическом микроскопе. По цвету все частицы прозрачные, для улучшения восприятия рисункам придана окраска. На периферии пламени размеры частиц не превышают 10–15 мкм, крупных частиц не наблюдается. С увеличением высоты наблюдается тенденция роста количества малых частиц.

Снимок, соответствующий периферийной зоне пламени (рис. 4а), подвергался специальной обработке, и с помощью разработанных программ подсчитаны распределения частиц по размерам и форм-фактору [4], [7]. Тот же участок пробоотборника изучен в поляризованных лучах на просвет (рис. 4б). Сравнение фотографий говорит о разной природе изучаемых частиц. Результаты обработки представлены на рис. 4в и 4г.

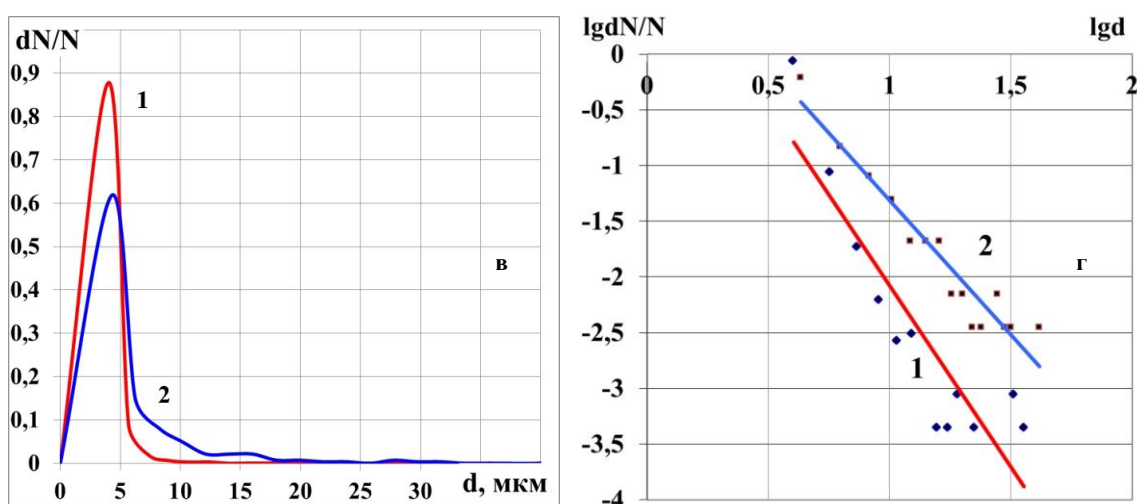
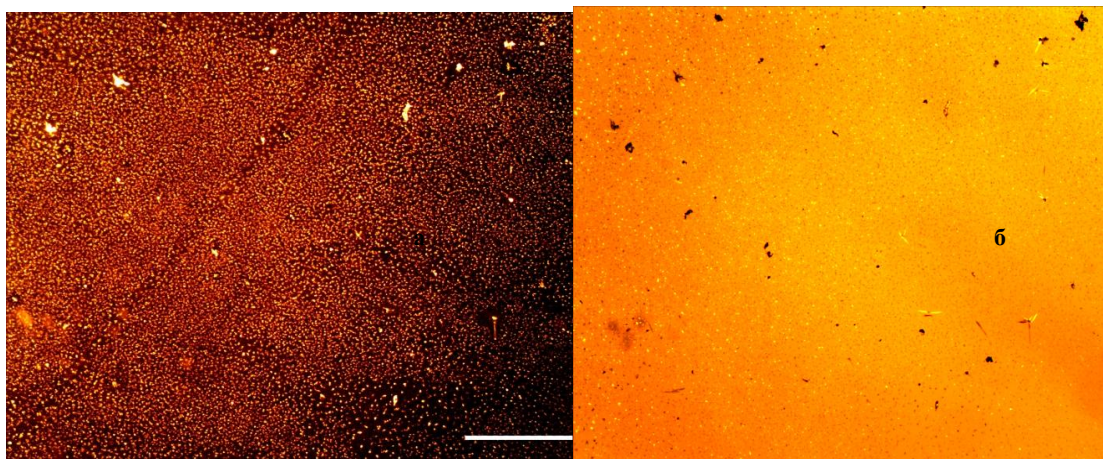


Рис. 4. Микрофотографии участка пробоотборника ($h = 8$ см, $b = 2,5$ см, b – расстояние от оси пламени):
 а) в отраженных, б) в проходящих поляризованных лучах, в), з) – функции распределения частиц

Расчеты показали, что счетное число частиц на всем снимке 4а равно 16000. Таким образом, распределение частиц по размерам можно считать представительным. Действительно, среди множества частиц большинство имеют размеры 4,5 мкм, однако есть и более мелкие частицы размерами ~ 3 мкм (рис. 4в). На площади 1 мм^2 расположено 1114 частиц, следовательно, среднее расстояние между центрами соседних частиц равно 33 мкм. Свободное пространство между частицами оценивается расстоянием 28 мкм. Таким образом, расстояние между частицами намного (в 7 раз) превышает средний диаметр частицы, и вероятность столкновения между ними не очень высока.

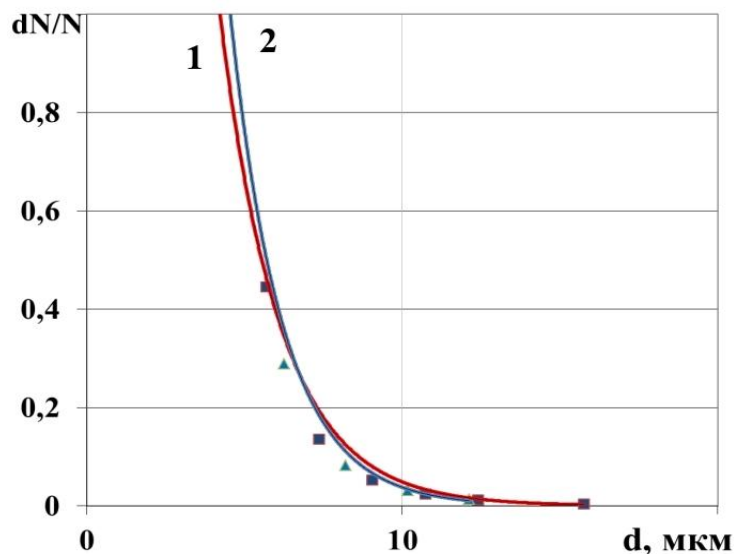


Рис. 5. Графическое представление и аналитические выражения функций распределения частиц по размерам: $f_1 = 15,536\exp(-0,602d)$, $f_2 = 9,1313\exp(-0,523d)$

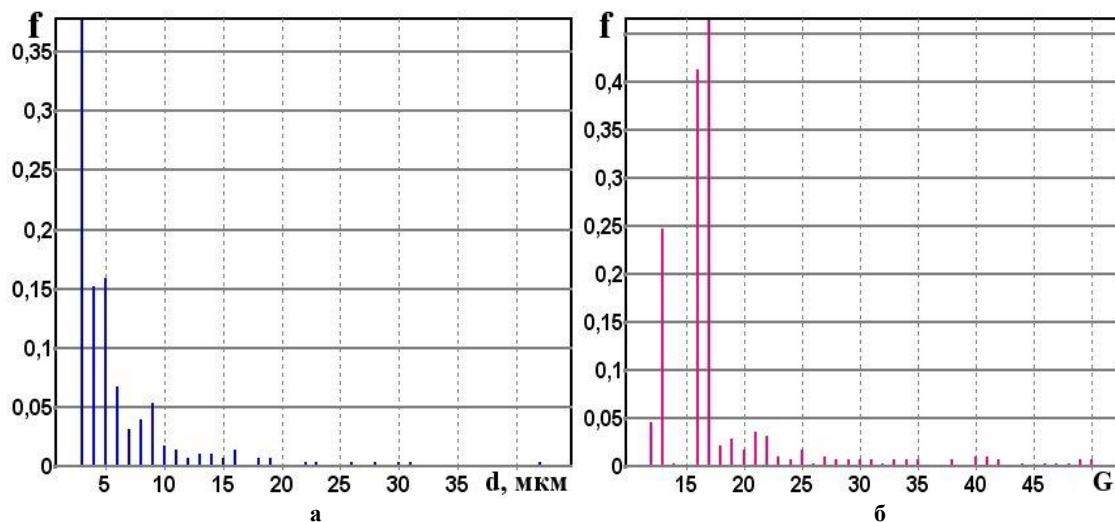


Рис. 6. Распределения частиц: а) по размеру, б) по форм-фактору

На этих графиках счетное число частиц разбивалось на 20 групп. Если считать распределение частиц по-другому, например, за размер группы взять 1 мкм, то вид гистограмм окажется иным. Такие расчеты приведены по эффективному диаметру и форм-фактору (рис. 6). В этом случае максимум распределения по размеру частиц приходится на 3 мкм. По форме данные частицы можно идентифицировать как частицы в виде квадрата и прямоугольника. Часть частиц имеет круглую форму.

Методами обработки экспериментальных данных (рис. 4г) получены аналитические выражения функций распределений частиц по размерам (рис. 5) [3]. Совпадение кривых 1 и 2 говорит о том, что данные кривой 2 входят в распределение 1.

Число расчетных частиц равно 16000, а количество частиц в поляризованных лучах малое – 283. Первая кривая, соответствующая рис. 4а, имеет одномодальное распределение. Для частиц, полученных в поляризованных лучах, в распределении можно выделить до 8 мод. Первая мода имеет максимум функции, равный 0,62 при диаметре частиц 4,5 мкм. Значения функции для последующих мод не превышают 0,07, и максимумы расположены при диаметрах 7, 10, 15, 20, 23, 28, 33 мкм (рис. 7). Если ввести в общий расчет частицы, выявленные только в поляризованных лучах, то, в силу малого их числа в общем распределении частиц по размеру, они не могут проявить себя.

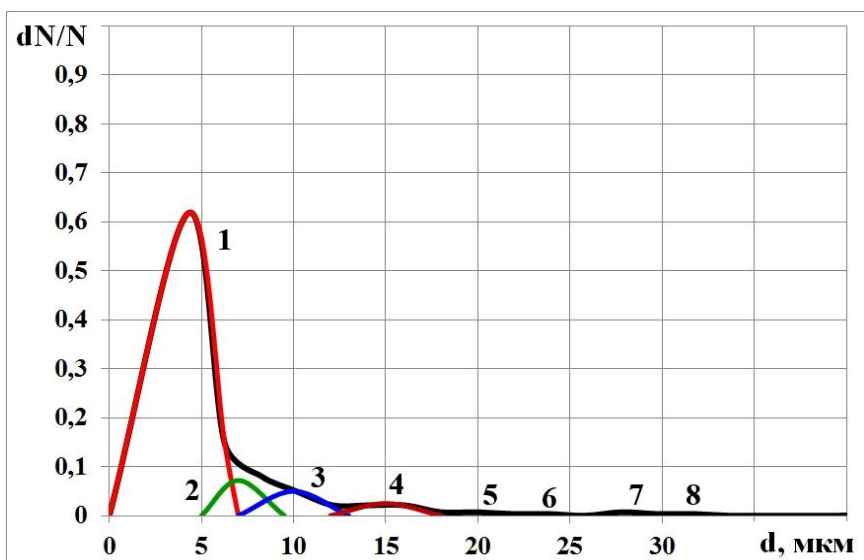
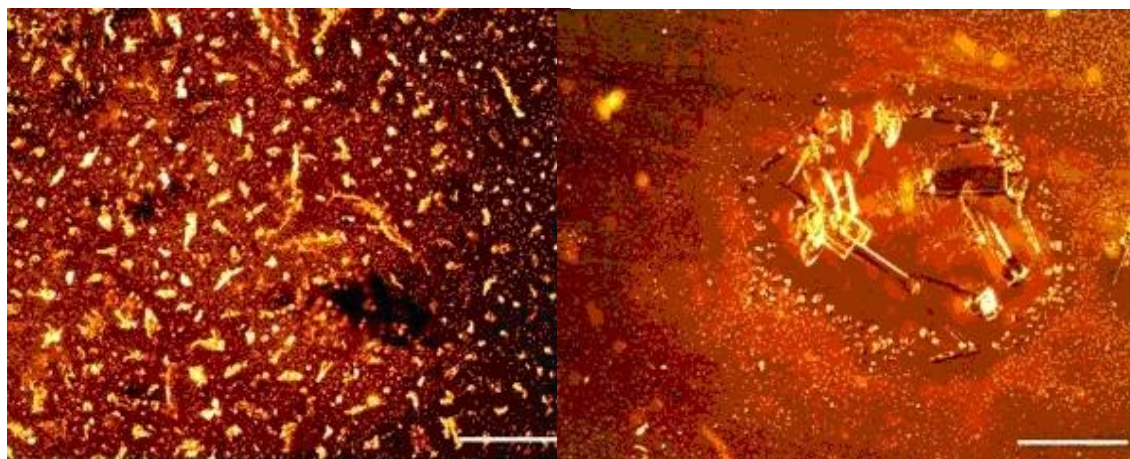


Рис. 7. Многомодальный характер распределения частиц по размерам



а) $h = 8$ см, $b = 1,5$ см

б) $h = 20$ см, $b = 2,2$ см

Рис. 8. Микрофотографии участков пробоотборника.
 Параметры пробоотбора приведены непосредственно под рисунками

В поле зрения микроскопа иногда можно наблюдать черные частицы сажи. Частица сажи имеет очень развитую поверхность. В центральной зоне пламени наблюдается множество частиц игольчатой формы. На снимке, полученном на высоте 8 см над поверхностью шашки, видны частицы игольчатой формы размерами 130×460 мкм². Между ними наблюдаются частицы размерами до $10 \div 15$ мкм (рис. 8а). Далее на высоте 20 см над шашкой наблюдаются кристаллы нитрата калия, которые сгруппированы в пределах круга размером 2,6 мм (рис. 8б). Размеры игольчатых частиц равны $0,2 \times 1,0$ мм². На внешней части круга расположены частицы круглой формы размерами $30 \div 35$ мкм. С дальнейшим увеличением радиуса от центра окружности размеры дисперсных частиц уменьшаются до $5 \div 10$ мкм. По всей вероятности, частицы нитрата калия вынесены потоком продуктов горения прямо с поверхности горящей шашки. Вероятность упаковки нескольких частиц окислителя рядом значительна [8], так как процентное содержание окислителя доходит до 70 % по массе. Однако эти частицы консолидированы и не распадаются в турбулентном потоке. Под действием теплового потока происходит возгонка кристаллического нитрата калия. Пары удерживаются в пространстве под действием противодавления обращенного пламени, существующего вокруг такого образования. Форма обращенного пламени, существующего на границе двух паров, должна быть сферической. Поток паров окислителя движется в радиальном направлении от центра сферы, а скорость паров горючего газа относительно частицы незначительна.

Резюме. Интенсивное образование высокодисперсного аэрозоля происходит в тех зонах пламени, где градиент температуры высокий. Полученный аэрозоль для состава АОС-1 имеет почти монодисперсное распределение с основным размером частиц 3 мкм.

Диспергированные крупные частицы состоят из консолидированных частиц нитрата калия, составляющего в исходном составе до 70 %. Диспергированный окислитель образует в среде парообразного горючего обращенное пламя почти сферической формы. Достижимая в пламени температура недостаточна для полной газификации исходного окислителя в пределах пламени.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алтухов, О. И. Горение пиротехнических газогенерирующих составов и разработка устройств для средств пожаротушения : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 01.04.17 / О. И. Алтухов. – Самара, 2012. – 23 с.
2. Кузнец, Е. А. Горение аэрозолеобразующих огнетушащих составов, генерирующих хлориды щелочных металлов : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 01.04.17 / Е. А. Кузнец. – Самара, 2005. – 24 с.
3. Лепаяев, А. Н. Методы анализа ансамбля микроскопических частиц в продуктах горения конденсированных систем / А. Н. Лепаяев, С. И. Ксенофонтов // Вестник Чувашского государственного педагогического университета. – 2013. – № 4 (80). Ч. 2. – С. 103–110.
4. Лепаяев, А. Н. Анализ частиц [Электронный ресурс] / А. Н. Лепаяев, С. И. Ксенофонтов, А. М. Порфирьев // Хроники объединенного фонда электронных ресурсов «Наука и образование». – 2013. – № 11. – Режим доступа : <http://ofernio.ru/portal/newspaper/ofernio/2013/11.doc>
5. Пороха, топлива, заряды. Т. 2. Заряды народнохозяйственного назначения / В. Н. Аликин и др. – М. : Химия, 2004. – 204 с.
6. Порфирьев, А. М. Программа для определения поля температур пламен «Flame-temperature» / А. М. Порфирьев, С. И. Ксенофонтов // Хроники объединенного фонда электронных ресурсов «Наука и образование». – 2010. – № 7. – Режим доступа : <http://ofernio.ru/portal/newspaper/ofernio/2010/7.doc>
7. Порфирьев, А. М. Частица / А. М. Порфирьев, С. И. Ксенофонтов, А. Н. Лепаяев // Хроники объединенного фонда электронных ресурсов «Наука и образование». – 2010. – № 6. – Режим доступа : <http://ofernio.ru/portal/newspaper/ofernio/2010/6.doc>
8. Рашковский, С. А. Статистическое моделирование процессов горения гетерогенных конденсированных систем : автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук : 01.04.17 / С. А. Рашковский. – М., 2004. – 44 с.