

УДК 662.175

А. В. Стрелкова, А. М. Пыжов, В. А. Рекшинский,
Л. М. Юсупова

ОЦЕНКА МАССОВОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ АЭРОЗОЛЯ СЕРЫ С ПОМОЩЬЮ ФОТОЭКСПОНОМЕТРА

Ключевые слова: сера, пиротехнический генератор, аэрозоль, фотоэкспониметр, показатель ослабления света, массовая концентрация, корреляционная взаимосвязь.

Исследована корреляционная связь между массовой концентрацией и показателем ослабления света аэрозоля серы в интервале концентраций 0,2 – 1,8 г/м³. Показано, что существует возможность оперативной оценки массовой концентрации аэрозоля серы по величине показателя ослабления света, определяемого с помощью фотоэкспониметра «Ленинград-6». Подобная методика оценки массовой концентрации аэрозоля значительно уменьшит время и стоимость эксперимента.

Keywords: sulfur, pyrotechnic generator, aerosol, meter light attenuation, mass concentration, correlation relationship.

Investigated a positive correlation between the mass concentration and extinction coefficient of aerosol sulfur in the concentration range of 0.2 – 1.8 g/m³. It is shown that there is a possibility of rapid assessment of the mass concentration of aerosol sulfur in magnitude of light attenuation, determined by meter "Leningrad-6". Such method of estimating the mass concentration of the aerosol will greatly reduce the time and cost of the experiment.

Введение

Известно, что аэрозоль представляет собой дисперсную систему, состоящую из газообразной дисперсионной среды и твердой или жидкой дисперсной фазы; другими словами, это взвесь твердых или жидких частичек в газе [1]. Так, например, дым представляет собой аэродисперсную систему (аэрозоль), в которой в воздухе взвешены твердые частицы размером 0,1-5 мкм. Если дисперсная фаза представляет собой капельки жидкости размером до 10 мкм, то такой аэрозоль называется туманом. Благодаря высокой дисперсности и мобильности аэрозолей в последнее время наблюдается расширение области их применения при решении различных технически сложных задач. К таким задачам относятся: санитарно-гигиеническая обработка объектов, создание лечебных аэрозолей, пожаротушение, создание искусственных светящихся объектов в атмосфере Земли для метеоисследований, маскировка военных объектов путем создания дымовых завес и многое другое.

Одним из наиболее эффективных способов получения аэрозолей с заданными характеристиками считается использование горения пиротехнических аэрозолеобразующих составов в специальных генераторах. При разработке рецептур эффективных пиротехнических составов для получения различных аэрозолей большое значение имеет оценка качества получаемых аэрозолей: определение концентрации взвешенных частиц, оценка оптической плотности, динамики изменения этих параметров и т.д. Возможности традиционных методов исследования не всегда позволяют обеспечивать решение поставленных задач при разработке аэрозолей нового поколения. Кроме того, высокая стоимость и дефицитность специального современного оборудования затрудняют его использование при проведении учебного процесса и научно-исследовательских работ в бюджетных вузах. Цены на современные отечественные лабораторные измерители дым-

ности, запыленности (например, АИД-210 ЭНЕРГИЯ) находятся в рамках 50-200 тыс. руб.

Настоящее исследование направлено на разработку простой, доступной, и достаточно эффективной методики определения массовой концентрации и живучести аэрозолей в учебных и научно-исследовательских целях. Для этого была изучена возможность использования бытовых и профессиональных фотоэкспониметров, а именно фотоэлектрического экспониметра «Ленинград - 6» для исследования аэрозолей. Подобные устройства имеют не только меньшую стоимость по сравнению со специальным оборудованием, но и могут значительно повысить оперативность методов оценки качества аэрозолей, что повышает эффективность экспериментальных исследований аэрозолей.

Экспериментальная часть

В экспериментальных исследованиях оценивалась динамика изменения массовой концентрации твердых частиц (серы) в аэрозоле и степень ослабления светового потока, входящего в аэрозоль. В качестве объекта исследований использовали аэрозоль серы, получаемый с помощью лабораторного варианта пиротехнического генератора аэрозоля серы [2], снаряженного серным аэрозолеобразующим составом на основе аммиачной селитры и активного угля [3], которые были разработаны на кафедре ХТОСА СамГТУ.

Эксперименты проводили в дымовой камере объемом 4,5 м³, схема устройства которой приведена на рис. 1.

Масса используемого аэрозолеобразующего состава составляла 25 г, а масса серы в составе – 6 г. Точность взвешивания компонентов и навесок состава составляло ±10 мг. Для воспламенения состава использовался отрезок пиротехнического шнура [4], специально разработанного для воспламенения таких трудно воспламеняемых составов и изготовленного по водной технологии на лабораторном оплётном станке. Масса используемого для воспламе-

нения отрезка шнура составляла 07-1,0 г. Для оценки массовой концентрации твердых частиц (серы) в аэрозоле использовали фильтрационный метод основанный на захвате аэрозольных частиц пористым волокнистым материалом фильтра в процессе фильтрации. [5, С. 51], [6, С.263-264]. В качестве корпуса фильтра (после некоторой модернизации) использовали бытовой полипропиленовый сифон бутылочно-го типа для раковины (производитель Германия, стоимость 190 руб.), с отводом и надвижной розеткой. В качестве фильтрующего материала был использован материал трехслойных медицинских масок фирмы «Albens», страна-производитель Китай. Стоимость одной маски 3 руб. Маска изготовлена из нетканого материала, так называемой, ткани Петрянова («Медицинский форум», <http://medcanal.ru>) и имеет один основной фильтрующий слой и два вспомогательных слоя (защитных). Фильтр фильтрующего устройства состоял из трех слоев фильтрующего материала, заключенных в два вспомогательных слоя, которые использовались в качестве защитных покрытий. Стоит отметить, что повторное использование фильтрующего материала повышало точность оценки массовой концентрации. Максимальное количество использования фильтрующего материала составило четыре раза, после чего отмечалось разрушение ткани Петрянова по местам сгиба. Для забора из дымовой камеры аэрозоля и его пропускания через фильтрующий материал фильтрующего устройства был использован традиционный водный аспиратор. Объем забираемого аэрозоля составлял 4,8 л ($\pm 0,005$ л). Длительность пропускания аэрозоля через фильтр составляла 150 ± 10 с. Параллельно с определением массовой концентрации аэрозоля производилась оценка степени ослабления светового потока (K_λ) [5, с 59-60], входящего в аэрозоль.

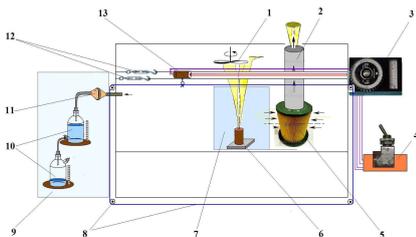


Рис. 1 - Схема дымовой камеры: 1 - мешалка; 2 - сброс аэрозоля в вытяжную вентиляцию; 3 - фотоэкспонетр «Ленинград 6»; 4 - пульт управления с блоком питания; 5 - фильтрующий картридж вытяжной вентиляции; 6 - генератор аэрозоля; 7 - люк камеры; 8 - система блоков и тяг для перемещения источника света по камере; 9 - водный аспиратор; 10 - бутылки с водой; 11 - фильтрующее устройство для оценки массовой концентрации твердых частиц в аэрозоле; 12 - талреп для натягивания стальной проволоки; 13 - источник света

В данной работе оценивалось ослабление света в видимой области спектра. Подвижный источник света внутри дымовой камеры устанавливался на

расстоянии 59 см (расстояние оценивалось предварительно). Источник света – светодиодный фонарик использовался в экономичном режиме работы. В качестве приемника света использовали профессиональный фотоэкспонетр «Ленинград-6» (ГОСТ 9851-79), представляющий собой высокочувствительный прибор с большим диапазоном измерений, предназначенный для измерения малых яркостей и освещенностей (в настоящее время стоимость подобных фотоэкспонетров составляет от 300 до 4000 руб.). Светоприемник - сернистокадмиевый фоторезистор. Ослабление света при прохождении слоя аэрозоля оценивалось в сравнении с источником света, который в экономичном режиме при входе в аэрозоль создавал освещенность 40 лк. После этого проводился расчет показателя ослабления. Показатель степени ослабления светового потока рассчитывался по формуле:

$$K_L = \frac{1}{l} \cdot \ln \frac{J_\lambda}{J_\lambda^1}; \quad (1)$$

где K_λ – показатель ослабления излучения, m^{-1} ; l – база измерений, м; J_λ – интенсивность излучения входящего в исследуемый аэрозоль, лк; J_λ^1 – интенсивность излучения после прохождения слоя исследуемого аэрозоля, лк.

Удаление аэрозоля из дымовой камеры по окончании эксперимента происходило с помощью вытяжной вентиляции, оборудованной фильтрующим картриджом, в качестве которого использовался воздушный фильтр автомобиля КАМАЗ (средняя стоимость картриджа 400 руб.).

Перед проведением экспериментов источник света в дымовой камере устанавливали на нужном расстоянии от фотоэкспонетра и оценивали интенсивность светового потока без присутствия аэрозоля. Проведение экспериментов проходило следующим образом. После сжигания пиротехнического состава в дымовой камере и получения аэрозоля, его перемешивали в течение 10-14 с, а затем включали источник света, и наблюдатель, по отклонившейся стрелке фотоэкспонетра определял интенсивность светового потока на выходе из аэрозоля. Оценка интенсивности светового потока занимала не более 10 с. Результат фиксировался, после чего по формуле (1) оценивали показатель степени ослабления светового потока. После оценки интенсивности светового потока сразу же проводили определение массовой концентрации аэрозоля. С этой целью с помощью $200^\circ C$ водного аспиратора аэрозоль пропускали через фильтр фильтрующего устройства. Фильтр после эксперимента взвешивали на аналитических весах с точностью до 0,0002 г.

Через 5-10 мин оценку интенсивности светового потока и массовой концентрации повторяли.

Результаты экспериментов и их обсуждение

Основной целью данной работы была оценка возможности оперативного определения массовой концентрации аэрозоля с помощью показателя степени ослабления света, пропущенного через него. Это вызвано тем, что традиционный фильтрационный способ определения массовой концентрации

аэрозоля обладает некоторыми недостатками, снижающими его точность и оперативность, а также практически не применим для натуральных испытаний. Это, в свою очередь, связано с тем, что вследствие небольшой концентрации твердой фазы для достаточного привеса фильтра необходимо пропускать через него большие количества аэрозоля. Однако последнее не всегда осуществимо, так как влечет за собой изменение условий существования аэрозоля [5, с. 54]. Были проведены четыре параллельных эксперимента с оценкой массовой концентрации и степени ослабления светового потока пропущенного через аэрозоль. Полученные результаты графически представлены на рисунке 1 и 2.

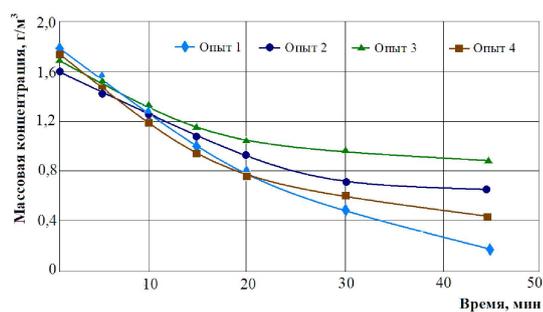


Рис. 1 - Изменение массовой концентрации аэрозоля серы со временем

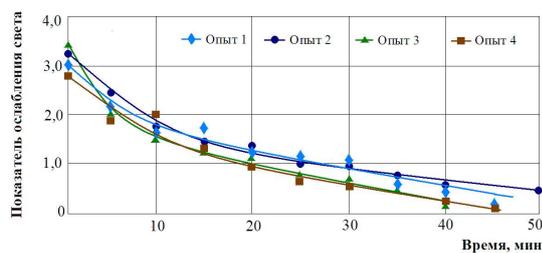


Рис. 2 – Изменение показателя ослабления света в аэрозоле со временем

Для оценки действительной точности измерения массовой концентрации и показателя степени ослабления светового потока были определены относительные погрешности средних значений этих величин в различные моменты времени, которые приведены в таблице 1.

Как видно из таблицы 1, до 10-й минуты существования аэрозоля включительно относительные погрешности измеряемых величин не превышали 6,8%, что вполне приемлемо. Начиная с 20-й минуты относительная погрешность показателя ослабления светового потока уже составляла 21 %, а к 40-й минуте увеличилась до 68,9 %.

Подобным образом изменялась и величина относительной погрешности массовой концентрации аэрозоля, которая к 40-й минуте достигала 37,9 %. Такое значительное расхождение результатов оценки массовой концентрации в параллельных экспериментах можно объяснить нарушением равновесия между дисперсной средой и дисперсной фазой в области забора аэрозоля [5, С 53].

Таблица 1- Относительные погрешности характеристик аэрозоля

Время, мин	Относительная погрешность среднего значения массовой концентрации, %	Относительная погрешность среднего значения показателя степени ослабления светового потока, %
0	3,9	5,9
5	3,4	3,9
10	6,4	6,8
15	5,5	25,0
20	7,3	21,0
30	24,2	15,0
40	37,9	68,9

Далее нами была проведена корреляционная оценка взаимосвязи изменения показателя ослабления света, прошедшего через аэрозоль и его массовой концентрации в течение первых десяти минут. Корреляционное уравнение имеет вид:

$$y=2,5x-1,208,$$

y - изменение показателя ослабления света, x - массовая концентрация, г/м³.

Коэффициент корреляции составил $R=0,993$, что указывает на взаимосвязь между массовой концентрацией аэрозоля и изменением показателя ослабления света, прошедшего через него.

С целью проверки найденной взаимосвязи были определены массовые концентрации и показатели ослабления света аэрозолей, образованных при горении вышеупомянутых аэрозолеобразующих составов массой 15 и 20 г. Средние значения показателей ослабления света аэрозолей для составов массой 15 г. в трех экспериментах составили 1,2 ед., для составов массой 20 г. – 1,7 ед., а массовая концентрация – 0,9 и 1,2 г/м³ соответственно. Расчетные значения средних значений массовых концентраций составили 0,96 и 1,16 г/м³ соответственно. Расхождения расчетных и экспериментальных значений величин составили не более 10 %, что вполне приемлемо для оценочных испытаний.

Таким образом, проведенные нами исследования подтвердили возможность оценки массовой концентрации аэрозоля серы в течение первых 10-ти минут его существования с помощью показателя степени ослабления светового потока, пропущенного через него. Подобная взаимосвязь должна существовать и для аэрозолей других веществ, что может быть использовано для оперативной оценки массовой концентрации аэрозолей при разработке аэрозолеобразующих пиротехнических составов.

Средняя стоимость расходных материалов и оборудования, размещенного в двух секциях стандартных вытяжных шкафов, в проведенных исследованиях составила около 5000 руб., что вполне приемлемо для выполнения лабораторного практикума в условиях вуза.

Выводы

1. Исследована аэрозоль серы, получаемый из аэрозолеобразующего состава на основе аммиачной селитры, активного угля и серы.
2. Выявлена положительная корреляционная связь между массовой концентрацией и показателем ослабления света аэрозоля серы, определяемым фотоэкспонометром «Ленинград- б» в интервале концентраций 0,2 – 1,8 г/м³.
3. Показано, что в первые десять минут существования аэрозоля имеется возможность оперативной оценки массовой концентрации аэрозоля серы по величине показателя ослабления света, что значительно уменьшает длительность и стоимость эксперимента.

4. Разработана простая, доступная и достаточно эффективная методика оценки массовой концентрации серы в аэрозоле.

Литература

1. И.В. Петрянов-Соколов, А.Г. Суругин. Аэрозоли. Наука, Москва, 1989. 144 с.
2. Заявка РФ 2015122457 (2015). Решение о выдаче патента от 19.04.2016.
3. Пат. РФ 2425019 (2011)
4. Пат. РФ 38339 (2004)
5. Ю.И. Вейцер, Г.П. Лучинский Маскирующие дымы. Гос. научно-техническое изд-во хим. лит-ры, Москва, Ленинград. 1947 г. 202.
6. Х. Грин, В. Лейн Аэрозоли - пыли, дымы и туманы. Химия, Ленинград, 1972.

© **А. В. Стрелкова**, к.т.н., доцент каф. ХТОСА СамГТУ, **А. М. Пыжов**, доцент каф.ХТОСА СамГТУ, **В. А. Рекшинский**, доцент каф.ХТОСА СамГТУ, **Л. М. Юсупова**, профессор каф. ХТОСА КНИТУ e-mail Luizamagdanurovna@yandex.ru

© **A. V. Strelkova**, k.t.n., dotsent kaf.CHTOSA SamGTU, **A. M. Pigov**, k.t.n., dotsent kaf.CHTOSA SamGTU, **V. A. Rekshinskiy**, k.t.n., dotsent kaf.CHTOSA SamGTU, **L. M. Yusupova**, professor kaf.CHTOSA KNRTU, e-mail Luizamagdanurovna@yandex.ru