

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОЛИСТАТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ВИЗИРОВАНИЯ ПРИ МОНИТОРИНГЕ АЭРОЗОЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ

А.В. Петров

*В статье анализируются основные методы мониторинга аэрозольных шлейфов от промышленных предприятий. Рассматриваются преимущества и недостатки пассивных методов зондирования. Описывается полистатическая схема визирования применительно к определению мощности выбросов от источника. Приводится описание и основные принципы работы экспериментального аппаратно-программного комплекса для определения поведения аэрозольных шлейфов в пограничном слое атмосферы.*

## ВВЕДЕНИЕ

Взаимодействие атмосферы с поверхностью Земли, в процессах естественного и антропогенного характера приводит к образованию в атмосфере различных по своему составу и физико-химическим свойствам аэрозолей [1]. Наиболее опасны мелкодисперсные аэрозоли так называемой «респираторной» фракции, которые при вдыхании осаждаются в легких, вызывая различные осложнения в организме человека. Наибольшую опасность представляют антропогенные аэрозоли, выбрасываемые в воздух от автотранспорта и промышленных предприятий в городах, так как большое количество вещества поступает в сравнительно небольшой объем, что приводит к превышению предельно допустимых концентраций.

## ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ РЕГИСТРАЦИИ АЭРОЗОЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ

Для реальной оценки ситуации с загрязнением воздуха в городах необходимо знать производительность источников [2]. Производительность определяется двумя основными способами: контактным и дистанционным. При контактном способе в трубу промышленного предприятия вводится зонд, который определяет количество вещества, проходящего через трубу за единицу времени. Основным недостатком данного метода является сложность установки зондов. Второй метод – дистанционный, подразделяется на активный и пассивный. Активные методы, используют искусственную подсветку, а пассивные регистрируют рассеяние солнечного или теплового излучения на исследуемом объекте. В настоящее время в качестве излучателей в активных системах наблюдения широко распространены лидарные системы.

Общим для пассивных методов является то, что в них тем или иным способом измеряется яркостный контраст объекта, оценивается яркость аэрозольного шлейфа на контрастном фоне. Теоретический анализ показывает, что метод измерения яркостного контраста позволяет определить оптическую плотность аэрозольного шлейфа [3].

Основными являются два пассивных метода регистрации: телефотометрический и метод Рингельмана. В методе Рингельмана с помощью шаблонов проводится оценка яркости аэрозольного шлейфа на контрастном фоне. Телефотометрический метод путем измерения яркости аэрозольного шлейфа определяет оптическую плотность аэрозольного шлейфа.

Следует отметить сложность проведения измерения по методу Рингельмана, связанную с ограниченностью диапазона значений шаблонов, необходимость накопления выборки шаблонов и калибровки каждого нового шаблона. Телефотометрический метод более гибкий. Основными средствами этого метода является фото- и видеосъемка, анализ при помощи фотометров.

Использование фотометров позволяет получать данные о содержании водяного пара, измерять среднюю оптическую толщину, из которой можно вычленять аэрозольную оптическую толщину рассеяния. Современные фотометры работают в автоматическом режиме и запоминают массивы данных. Недостатками этих приборов являются их высокая цена и низкая мобильность.

Основным мобильным доступным средством быстрого анализа аэрозольных шлейфов является фото- и видеосъемка.

Отметим, что анализ фотоизображений дымовых шлейфов и в нашей стране, и за рубежом начал проводиться с середины 50-х годов прошлого столетия. К настоящему времени накоплен большой опыт в анализе

фотоизображений. Для повышения точности определения границ струи разными исследователями использовались стереофотограмметрическая съемка и добавление в изучаемую дымовую струю тетранов. Основным достоинством обычного фотоизображения является возможность увеличения снятых объектов в 8-10 раз без потери качества [4]. Но главным недостатком является низкая скорость съемки, небольшой объем выборки и достаточно высокая цена печати изображений. Цифровые фотоаппараты позволяют получать большой объем выборки, но недостатками являются низкая скорость съемки и невозможность увеличить изображение более чем в 3-4 раза.

Видеозапись позволяет получать непрерывную выборку с заданным интервалом дискретизации, изменений границ струи, позволяет учитывать изменение направления ветра. Анализ изображений автоматизирован. Кроме этого к плюсам анализа видеоизображений следует отнести возможность фиксации изменения положения шлейфа несколькими камерами с нескольких точек, использование для анализа протяженного во времени и пространстве объекта, простота и мобильность.

**ОСНОВЫ ТЕОРИИ ДИФFUЗИИ ПРИМЕСЕЙ**

Рассмотрим дымовой факел от трубы промышленного предприятия (в случае отсутствия теплового подъема) так, как мы его наблюдаем (рис. 1) [5].

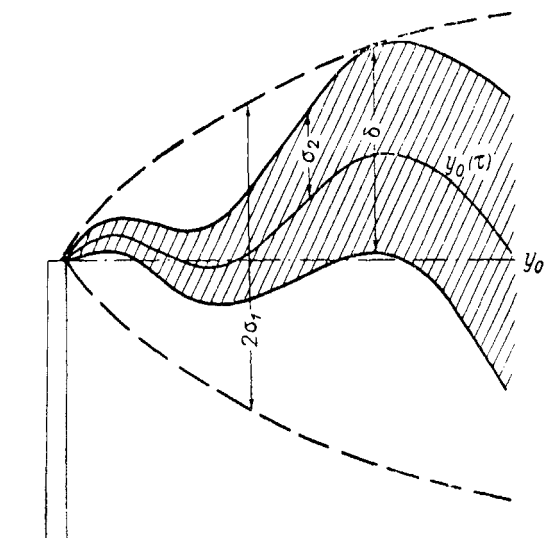


Рис.1. Схема образования дымового факела от постоянно действующего источника

Как правило, факел расширяется с удалением от трубы вследствие турбулентного обмена примеси со средой распространения, причем ось его непрерывно меняет свое положение в пространстве.

Мгновенный факел может рассматриваться как совокупность бесконечного числа единичных клубов, выделяемых стационарным источником последовательно и переносимых средним ветром, а статическая модель стационарного факела получается в результате наложения бесконечного числа таких мгновенных факелов (рассматривается клубовая модель Гиффорда [6]). Движение единичных клубов состоит из рассеяния клуба относительно его мгновенного центра ( $\sigma_1$ ) и случайного блуждания центров ( $\sigma_2$ ), что создает извилистость факела. Эта картина наблюдается как по вертикали, так и в горизонтальном и поперечном ветру направлениях.

Пусть размеры мгновенного факела составляют  $\delta$ , размер стационарного факела  $2\sigma_1$ . Координаты центров тяжести частиц обозначим  $y_i(\tau)$ ,  $\tau$  – время,  $i$  – номер частицы,  $y_0(\tau)$  – координаты центров клуба в момент времени  $\tau$ ,  $y_0(0) = y_0$  – координата начального центра тяжести. Тогда дисперсия координат частиц относительно начального центра тяжести  $\sigma_1^2$  представляет квадрат полуширины стационарного факела:

$$\sigma_1^2(\tau) = \langle |y_i(\tau) - y_0|^2 \rangle \quad (1)$$

Относительная дисперсия двух частиц  $\delta$  – квадрат ширины мгновенного факела:

$$\delta^2(\tau) = \langle |y_i(\tau) - y_j(\tau)|^2 \rangle \quad (2)$$

Введем ещё дисперсию координат частиц, относительно их мгновенного центра тяжести  $\sigma_2$  и дисперсию координат центров тяжести  $\sigma_0$ :

$$\sigma_2^2(\tau) = \langle |y_i(\tau) - y_0(\tau)|^2 \rangle \quad (3)$$

$$\sigma_0^2(\tau) = \langle |y_0(0) - y_0(\tau)|^2 \rangle \quad (4)$$

Угловые скобки означают осреднение по статистическому ансамблю реализаций факела. Тогда имеет место соотношение (5), которое показывает, что рассеяние клуба относительно его мгновенного центра тяжести и блуждание центров независимы, а в сумме их дисперсии составляют квадрат полуширины стационарного факела.

$$\sigma_1^2 - \sigma_0^2 = \sigma_2^2 - \frac{\delta^2}{2} \quad (5)$$

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОЛИСТАТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ВИЗИРОВАНИЯ ПРИ МОНИТОРИНГЕ АЭРОЗОЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ

Входящие в соотношение (5) величины выражаются через лагранжевы корреляционные функции скоростей одной частицы и пары частиц (6-7):

$$R_i(\tau', \tau'') = \langle v_i(\tau') v_i(\tau'') \rangle,$$

$$\sigma_1^2 = \int_0^\tau \int_0^\tau R_i(\tau', \tau'') d\tau' d\tau'' \quad (6)$$

$$R_{ij}(\tau', \tau'', \vec{r}_0) = \langle v_i(\tau') v_j(\tau'') \rangle,$$

$$\delta(\tau) = 2 \int_0^\tau \int_0^\tau R_i(\tau', \tau'') d\tau' d\tau'' + 2 \int_0^\tau \int_0^\tau R_{ij}(\tau', \tau'', \vec{r}_0) d\tau' d\tau'' \quad (7)$$

В полуэмпирической теории атмосферной диффузии для приземного слоя воздуха уравнение диффузии в общем случае имеет вид:

$$\frac{\partial s}{\partial t} + u \frac{\partial s}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} K_x \frac{\partial s}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} K_y \frac{\partial s}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} K_z \frac{\partial s}{\partial z} \quad (8)$$

В работе А.С. Моница [7] показано, что уравнение (8) может быть выведено из предположения, что каждая индивидуально диффундирующая частица движется случайно, причем её координаты меняются со временем по закону Марковского случайного процесса. В этом случае уравнение (8) переходит в уравнение А.Н. Колмогорова для этого случайного процесса. Тогда коэффициент турбулентной диффузии получает следующую статистическую интерпретацию:

$$K_x = \frac{1}{2} \frac{d\sigma_x^2(t)}{dt}, \quad \sigma_x(t) = \sqrt{x(t) - x(0)} \quad (9)$$

где  $x(t)$  – абсцисса диффундирующей частицы в момент времени  $t$  (аналогичные формулы справедливы для  $K_y$  и  $K_z$ )

Отсюда видно, что первичным понятием является не коэффициент турбулентной диффузии, а дисперсия координаты диффундирующей частицы (зависящая от времени диффузии).

Анализируя соотношения (1-3) и (9) можно заметить, что оценка значений коэффициентов турбулентного обмена по данным телефотометрических наблюдений аэрозольных шлейфов в атмосфере возможна с помощью методов фотограмметрического анализа изображений.

### ПОЛИСТАТИЧЕСКАЯ СХЕМА РЕГИСТРАЦИИ

Для фиксации координат «видимого следа» шлейфа аэрозольного выброса в атмосфере от локального источника загрязне-

ний в четырехмерном пространственно-временном континууме, а также в дальнейшем, для реализации геометрической коррекции координат относительно плоскости изображения, предлагается использовать полистатическую схему регистрации [8]. Ниже представлен один из возможных вариантов, использованный для телефотометрических наблюдений выбросов от котельной КЖБИ-2 г. Барнаула (рис. 2).

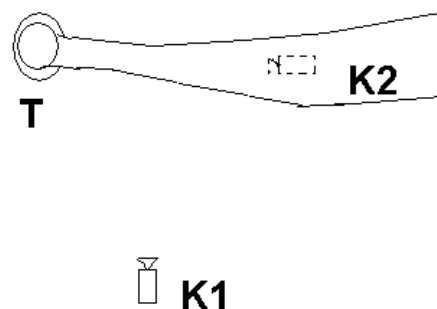


Рис. 2. Схема регистрации аэрозольного шлейфа от источника

На рисунке 2 Т – источник, K1 и K2 – видеокамеры (вид сверху).

Шлейф от источника Т распространяется в направлении среднего вектора переноса примеси и регистрируется двумя видеокамерами K1 и K2. Камера K1 располагается как и в моностатической схеме визирования сбоку относительно шлейфа и фиксирует вертикальные и продольные координаты границ «видимого следа» и оси шлейфа. Видеокамера K2 располагается под шлейфом так, чтобы угол между направлением среднего ветра и воображаемой прямой, проходящей через точки K1 и K2 был равен  $90^\circ$ , и с её помощью фиксируются поперечные и продольные координаты.

Основным достоинством полистатической схемы регистрации является возможность фиксировать и учитывать изменение направления распространения шлейфа с течением времени.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

В лаборатории экологии атмосферы ИВЭП СО РАН был разработан метод определения дисперсии примесей и мощности выбросов от труб промышленных предприятий с использованием видеосъемки аэрозольных шлейфов. В рассматриваемом ме-

тоде телевизионная регистрация процесса распространения аэрозольного шлейфа сочетается с последующей цифровой обработкой и анализом видеоинформации. Статистический анализ получаемых изображений, прошедших предварительную обработку, проводится с целью определения величин яркостного контраста аэрозольных шлейфов. Статистический подход используется при рассмотрении динамики распространения аэрозольного шлейфа и последующей цифровой обработке видеоизображений с целью уменьшения влияния случайной погрешности косвенных измерений.

Экспериментальная установка для оцифровки видеосигнала была создана на базе персонального компьютера. В состав установки входит видеокамера стандарта VHS и цифровой фотоаппарат OLYMPUS, видеокарта с TV-тюнером, устройства ввода-вывода. Аналоговый видеосигнал с видеокамеры, поступает на АЦП видеокарты, и далее происходит запись цифровой последовательности в AVI-формате на винчестер. Для ввода видеоинформации в компьютер используется стандартный пакет программ, предоставляемый фирмой-изготовителем видеокарты. После записи видеосигнала на персональный компьютер исходный AVI-файл, содержащий видеопоследовательность, разбивается на отдельные графические файлы - кадры исходной видеопоследовательности. Такое представление видеоинформации позволило использовать широко распространенные программы обработки графических файлов.

Результаты обработки видеозаписи аэрозольного шлейфа по определению зависимости яркостного контраста видеоизображения от дисперсии примеси и мощности аэрозольного источника позволяют говорить о том, что применение статистической обработки с покадровым накоплением изображе-

ний и вариацией объема выборки кадров повышает точность определения абсолютной величины производительности аэрозольного источника на 10 % по сравнению с ранее использовавшимися методами.

Результаты проведенных исследований свидетельствуют о правомерности оценки коэффициентов турбулентной диффузии и мощности аэрозольных выбросов стационарных источников с известными параметрами с помощью статистической обработки и анализа цифровых изображений аэрозольных шлейфов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хааген-Смит А. Дж. Загрязнение воздуха в городах // Атмосферная диффузия и загрязнение воздуха. – М.: ИЛ, 1962. – С. 143-163.
2. Берлянд М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. – Л.: Гидрометеоздат, 1975. – 448 с.
3. Уваров Д.Б., Жуков Г.П. О связи оптических характеристик дымовых струй с весовой концентрацией // Труды ИЭМ. – 1976. – вып. 15(60). – С. 100-117.
4. Канкин В.Б., Сухинин А.И. Дистанционное зондирование земли из космоса. Цифровая обработка изображений. – М.: Логос, 2001. – 264 с.
5. Бызова Н.Л., Гаргер Е.К., Иванов В.Н. Экспериментальные исследования атмосферной диффузии и расчеты рассеяния примеси. – Л.: Гидрометеоздат, 1991. – 279 с.
6. Гиффорд Ф. Статистическая модель дымовой струи // Атмосферная диффузия и загрязнение воздуха. – М.: ИЛ, 1962. – С. 143-163.
7. Монин А.С. Распространение дыма в приземном слое атмосферы // Атмосферная диффузия и загрязнение воздуха. – М.: ИЛ, 1962. – С. 366-381.
8. Петров А.В., Суторихин И.А. Определение характеристик аэрозольных шлейфов в приземном слое атмосфере по видеоизображениям // Аэрозоли Сибири. X рабочая группа: Тез. докл. – Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2003. – С. 61.