

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ АЭРОЗОЛЬНОГО ОБЛАКА В УСЛОВИЯХ ДИНАМИЧЕСКОЙ И ТЕРМИЧЕСКОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ

К.П. КУЦЕНОГИЙ, В.И. МАКАРОВ, Ю.Н. САМСОНОВ, Е.И. КИРОВ

Институт химической кинетики и горения СО РАН, Новосибирск, Россия

А.П. ГУК, Л.К. ТРУБИНА, А.В. ЧЕРЕМУШКИН

Сибирская государственная геодезическая академия, Новосибирск, Россия

e-mail koutsen@ns.kinetics.nsc.ru, makarov@ns.kinetics.nsc.ru,
samsonov@ns.kinetics.nsc.ru, kirov@ns.kinetics.nsc.ru

This report describes experiments performed in autumn of 2000. The size of an aerosol cloud was determined with the help of traditional camera "Zenit" and the digital one "Casio QVX-3000". Experiment was performed on the bank of the Novosibirsk artificial lake on a ground covered with grass and trees. The behavior of an aerosol cloud has been studied at a distance of about 100 m from the generator working continuously in two regimes. It was started every evening and every morning. The data are given on a change in the form of an aerosol cloud for different stratifications of the atmosphere depending on the regime of its formation. The data on the geometrical dimensions of smoke tail are used to find out the new potentialities of the technique proposed for studying aerosol cloud dispersion in conditions of thermic and dynamic inhomogeneities of underlying surface.

Искусственные аэрозольные облака уже давно и широко используются для изучения атмосферной диффузии в приземном и пограничном слое атмосферы. Достаточно подробное изложение теоретических основ этого метода и практического использования полученных данных для обоснования различных моделей расчета загрязнения атмосферы газообразными и аэрозольными примесями можно найти в [3, 22]. Для корректного сопоставления экспериментальных данных и теоретического описания поведения невесомой (газообразной) примеси в турбулентной атмосфере часто используется методика дымовых струй. В ней модельное облако дыма создается либо аэрозольным генератором термоконденсационного типа, либо пиротехническими дымовыми шашками. Эти технические средства обычно используются для создания маскирующих дымов [6]. Такие дымы образуют аэрозольные частицы субмикронного размера с малой скоростью седиментации, хорошо увлекаемые турбулентными пульсациями атмосферы. В большинстве опубликованных работ экспериментальная методика дымовых струй использовалась либо для проверки теоретических моделей, описывающих поведение эмиссии невесомой примеси из дымовых труб [1, 2, 14-16], либо для получения эмпирических констант, входящих в статистические модели турбулентной диффузии в приземном и пограничном слоях атмосферы [5, 7-11, 17, 18, 23-25]. Одним из методов обработки экспериментальных данных временного измерения геометрических размеров дымовой струи является фотограмметрия.

Использование метода стереофотограмметрии, наряду с определением диффузионных характеристик, позволяет также описать сложную траекторию поведения дымовой струи, связанную с более медленными изменениями скорости и направления ветра в приземном и пограничном слоях атмосферы [1, 12, 26].

Процесс атмосферной турбулентной диффузии - крайне сложный физический процесс, который не имеет строгого теоретического описания, охватывающего все многообразие этого явления в разнообразных природных условиях. В настоящее время создано несколько теоретических моделей, хорошо описывающих экспериментальные данные рассеяния невесомой примеси в условиях горизонтально однородной подстилающей поверхности в квазистационарной стратифицированной атмосфере и однородных граничных условиях, учитывающих взаимодействие диффундирующей примеси с подстилающей поверхностью. Поэтому большинство экспериментов с дымовыми струями, которые выполнены к настоящему времени, для определения констант, входящих в полуэмпирические уравнения атмосферной турбулентной диффузии старались проводить в условиях максимально приближенным к горизонтально-однородным и стационарно стратифицированным.

В реальных природных условиях эти условия никогда не выполняются, поэтому при количественной интерпретации экспериментальных данных с помощью того или иного теоретического описания, всегда оговаривается область применимости используемого приближения.

Из-за сложности, трудоемкости и дороговизны экспериментов в природных условиях многие из важных с научной и с практической точек зрения вопросов о закономерностях турбулентной атмосферной диффузии

примеси еще не решены. Отметим наиболее важные из этих проблем, которые интенсивно дискутируются специалистами на протяжении последних десятилетий. Прежде всего это - диффузия тяжелой примеси, рассеяние примеси в нестационарно стратифицированной атмосфере, включая температурную и динамическую неоднородность, учет взаимодействия примеси с подстилающей поверхностью. Каждый из перечисленных факторов имеет свои специфические особенности и требует специальных методик исследования. Подробно эти аспекты анализируются в [3, 5]. К сожалению, пока реализовать комплексные исследования проблемы о рассеянии примеси в реальной атмосфере в едином эксперименте не удалось.

В настоящем сообщении описывается методика экспериментальных исследований, которая позволяет преодолеть ряд принципиальных ограничений, описанных ранее полевыми опытами. Она является обобщением и развитием методик исследования поведения аэрозольного облака в приземном и пограничном слоях атмосферы с учетом взаимодействия частиц с растительностью и подстилающей поверхностью [19, 20, 26]. Не вдаваясь в детали предлагаемого подхода, укажем два наиболее существенных момента, которые оказывают огромное влияние на возможность корректного сопоставления теоретических и экспериментальных результатов.

Первый - это возможность моделирования в природных условиях различных свойств примеси одним и тем же источником в конкретных сценариях.

В рамках существующих теоретических моделей можно показать, что коэффициент турбулентной диффузии газовой среды в условиях приземного и пограничного слоя атмосферы близок к значению этого же параметра для частиц диаметром менее 200 мкм [19].

С другой стороны, теоретический анализ показывает, что при удалении от источника концентрации оседающей и неоседающей примеси существенно различаются как в ближней (до точки максимума концентрации), так и в дальней зоне, в зависимости от характера взаимодействия с подстилающей поверхностью [4].

Мерой взаимодействия может служить отношение скорости сухого выпадения к скорости турбулентного трения. Последние в значительной степени зависят от характеристик растительного покрова подстилающей поверхности [3, 19, 20]. Поэтому для проведения экспериментов в полевых условиях желательно иметь мобильный источник дымовой струи с изменяемым размером частиц и возможностью изменения геометрии струи в горизонтальном и вертикальном направлениях. В данной работе дымовое облако создавалось генератором аэрозолей регулируемой дисперсности (ГРД), который во многом удовлетворяет сформулированным выше требованиям [27]. На рисунке 1 приведена фотография ГРД. В таблице 1 приведены данные о его технических возможностях.



Рис.1. Аэрозольный генератор.

Таблица 1.

1. Генератор смонтирован на автомобиле ЗИЛ-131 высокой проходимости.

-
2. Имеет два режима образования аэрозолей:
А) термоконденсационный, создающий частицы субмикронного размера ($d < 1 \mu\text{м}$);
Б) пневмомеханический, позволяющий получать частицы различного размера ($5 < d_m < 30 \mu\text{м}$).
Возможно одновременное использование обеих режимов.

 3. Создание источников различной геометрии: точечный, линейный, различной пространственной ориентации, импульсный, непрерывный, неподвижный мобильный.

 4. Изменение начальной температуры аэрозольного облака.

 5. Изменение химического состава аэрозольных частиц, включая получение флуоресцирующих частиц различного размера, что позволяет использовать высокочувствительные методы их регистрации.
-

Использование ГРД позволяет реализовать в реальных полевых условиях весь комплекс экспериментальных методов исследования дымовых струй, разработанных к настоящему времени.

Второе существенное развитие методики полевых исследований состоит в использовании цифровых фотограмметрических технологий. При отработке технологии использовалась цифровая фотограмметрическая станция Siberian Digital Stereoplotter (SDS), разработанная на кафедре фотограмметрии и дистанционного зондирования СГГА [13]. Цифровой фотограмметрический комплекс SDS включает несколько программных пакетов и, соответственно, технологий обработки снимков. Основным модуль SDS позволяет выполнять обработку стереопары с совместным стереоскопическим рассмотрением исходных изображений и результатов сбора графической информации, итогом которой является модель местности и отображающая ее цифровая карта. Кроме того, имеются дополнительные модули для построения цифровых моделей рельефа и ортофототрансформирования снимков при отработке снимков всхолмленной и горной местности, а также объектов различного масштаба, находящихся в анализируемом пространстве.

В процессе цифровой фотограмметрической обработки определяются пространственные координаты изобразившихся объектов с заданной дискретностью и точностью, выполняется сбор графической информации (границы контуров, цифровая модель рельефа, профили горизонталей). На следующем этапе сформированные новые изображения, файлы цифровых и графических данных, полученные на цифровой фотограмметрической станции, передаются в ГИС, где хранятся как отдельные информационные слои.

Совместный анализ различных слоев в ГИС и их комплексная интерпретация позволяют получать дополнительную информацию в виде произвольных слоев, с их картографическим отображением (в виде изолинейных карт, трехмерных моделей, совмещенных карт различных показателей и т.д.).

Для оценки реальных возможностей предложенной методики в августе 2000 года были проведены полевые эксперименты, основные результаты которых излагаются ниже.

Цель проведенных экспериментов состояла в следующем:

Оценить диапазон метеорологических условий, в которых на поведение дымовых струй наиболее существенным образом влияют условия термической и динамической неоднородности подстилающей поверхности.

- Для этого в окрестностях Новосибирской области была выбрана площадка, покрытая невысокой травой, в пределах которой были вкраплены небольшие колки древесных растений высотой около 10 - 15 метров. Такой размер достаточно хорошо представлял динамическую неоднородность подстилающей поверхности. Выбранная площадка находится на берегу Новосибирского водохранилища, что создавало термическую неоднородность. Кроме того, берег водохранилища - обрывистый, высотой около 2-х метров. Это служило дополнительным фактором динамической неоднородности в пределах полигона, где проводились эксперименты.

- Время проведения экспериментов было выбрано в переходный период (вечер и раннее утро). Можно было ожидать, что в это время происходит перестройка структуры приземного и пограничного слоев атмосферы с условий конвективной стратификации к устойчивой и наоборот. В эти периоды структура течений и особенности атмосферной диффузии наиболее чувствительны к внешним условиям.

Оценить влияние дисперсного состава аэрозольного облака и условий освещенности на возможность измерения распределения массовой концентрации внутри аэрозольного облака. При определении массовой концентрации внутри аэрозольного облака используется методика спектрофотометрии. Известно, что яркостный контраст зависит как от оптических характеристик аэрозольного облака (спектр размеров аэрозольных частиц и комплексный коэффициент преломления), так и от условий освещенности. Последняя также зависит от яркости засветки объектов, на фоне которых наблюдается аэрозольное облако. В период проведения экспериментов яркость подсветки сильно изменялась как за счет суточного хода, так и за счет различного облачного состояния (в ночное и раннее утреннее время шел дождь). Для оценки влияния дисперсного состава опыты проведены на двух режимах ГРД: термоконденсационном, когда создавались капли субмикронных размеров, и механическом со средним размером капель около 20 мкм.

Оценить влияние начального перегрева аэрозольного облака и его начальных размеров на характер изменения его размера при движении в условиях динамической и термической неоднородности приземного и пограничного слоев атмосферы.

Сравнить различные способы фотосъемки: фотоаппаратом типа "Зенит" с цветной фотопленкой типа "Kodak" и цифровой фотоаппаратом типа "Casio QVX-3000". Использование спектральной фотометрии позволяет определить дисперсный состав аэрозольного облака. При большом изменении яркости исследуемого объекта существенным оказываются спектральные характеристики используемого фотоматериала, а также спектральные характеристики фотоматрицы цифрового фотоаппарата.

Для реализации поставленных задач были проведены две серии экспериментов:

1. Вечером 10 августа 2000 года и утром 11 августа 2000 года. В каждой из серий было проведено по два пуска аэрозольного облака, создаваемого ГРД, длительностью 5-7 минут. Первый - на термоконденсационном режиме ($d < 1 \mu\text{км}$), второй - на механическом режиме ($d \approx 20 \mu\text{км}$).

Массовый расход генератора (мощность источника) около 10 л/мин был постоянным во всех четырех пусках. Высота генерации облака - около 2 м. ГРД находился на одном и том же месте. При генерации субмикронных аэрозолей температура парогазовой струи на несколько сот градусов превышала температуру окружающего воздуха. Скорость истечения парогазовой струи и аэрозольного облака при пневматическом распылении - около 150 м/с.

Фотографирование проводилось с двух точек последовательно фотоаппаратом "Зенит" и "Casio QVX-3000" с интервалом 20 с с расстояния примерно 70 м. Среднее направление ветра было примерно перпендикулярно плоскости съемки. Вечерняя серия началась в 21¹⁵ и закончилась в 21³⁰ местного времени. Утром эксперимент начался в 6⁵⁰ и закончился в 7⁰⁵.

Характер поведения аэрозольного облака субмикронных аэрозолей в утреннее и вечернее время показан на рисунке 2 (верхний и средний ряды).

Левый и правый кадры сделаны с интервалом в 20 сек. Сравнение фотографий верхнего и среднего рядов показывает, что поведение аэрозольного облака, создаваемого ГРД на термоконденсационном режиме, различно в утреннее и в вечернее время. Утром нижняя граница дыма плотно прижимается к подстилающей поверхности, а верхняя кромка дымового шлейфа монотонно увеличивается с удалением от источника. Совершенно иная форма дымовой струи в вечернее время (средний ряд). Видно, что с расстояния примерно 20 - 30 метров от генератора струя аэрозольного шлейфа резко поднимается вверх. Угол подъема струи - около 40 - 50°. Высота подъема на удалении ≈ 50 метров от генератора достигает нескольких десятков метров.

Расстояние, до которого было прослежено распространение облака, - 100 - 150 метров. Далее начиналось водохранилище, и направление движения струи дыма существенно изменялось. Ось струи повернуло почти на 90°, и направление движения центра струи стало почти параллельно береговой линии водохранилища. В данном эксперименте направление фотографирования совпадало со средним направлением береговой линии. Поэтому определить видимую длину дымовой струи с помощью фотографии не удалось. Визуальные наблюдения в вечернее время по уменьшению яркости огней в ближайшем поселке, расположенном на берегу водохранилища, дают оценку длины дымовой струи около километра. Примерно такую же оценку в утреннее время можно получить из закономерности роста верхней границы аэрозольного облака до расстояния 100 - 150 метров.

Так как форма аэрозольного облака на режиме пневматического распыления в вечернее и утреннее время практически одинакова, приводится фотография формы струи только в утреннем эксперименте (см. нижний ряд рисунка 2). Сравнение формы струй, представленных на снимках верхнего и нижнего рядов, показывает, что верхняя граница обеих дымовых струй примерно одна и та же.

Так как максимальное удаление от ГРД, на котором сфотографированы дымовые струи, не превышает 100 - 150 метров, влияние гравитационного оседания 20 мкм частиц ($V_{\text{сед}} \approx 1,2 \text{ см/с}$) не может объяснить столь разительного отличия поведения дымовых струй, состоящих из частиц разного размера, в вечернее время. Основной причиной, с которой связано вертикальное всплывание струи, безусловно, является перегрев и еще не закончившееся в это время формирование инверсионного слоя у поверхности земли. В результате теплый (по сравнению с окружающим) объем аэрозольного облака всплывает за счет Архимедовых сил. Влияние размера частиц более отчетливо проявляется в изменении оптических свойств аэрозольного облака.

Яркость аэрозольного облака грубодисперсных аэрозолей становится соизмеримой с яркостью фона на удалении около 100 метров. Это можно видеть из сравнения левого и правого снимков нижнего ряда (точки А и А'). Сравнение снимков, сделанных с помощью фотоаппаратов "Зенит" и "Casio QVX-3000", показало, что в условиях данного эксперимента при визуальном сравнении заметных различий в качестве полученного изображения дымовой струи нет.

Выводы

Проведенные эксперименты и их анализ показывают, что:

1. предложенная методика изучения поведения дымовых струй в условиях термической и динамической неоднородности с использованием ГРД и цифровой стереофотограмметрии позволяет существенно расширить круг решаемых задач методом дымовых струй.
2. она позволяет исследовать процессы локального масштаба (линейных размеров от единиц метров до нескольких километров и временных интервалов от нескольких секунд до нескольких часов).
3. при изучении пространственно-временных изменений массовой концентрации внутри аэрозольного облака необходимо учитывать спектр размеров аэрозольных частиц.

Литература

- [1] Бем Б. Результаты экспериментального исследования дымовых струй от тепловых электростанций. В кн.: Метеорологические аспекты загрязнения атмосферы. 1971, Л., ГИМИЗ, с. 44-48.
- [2] Буров М.И., Елисеев В.С., Новаковский Б.А. Стереофотограмметрический метод исследования атмосферной диффузии. Тр. ГГО, 1969, вып. 238, с. 77-85.
- [3] Бызова Н.Л., Гаргер Е.К., Иванов В.Н. Экспериментальные исследования атмосферной диффузии и расчеты рассеяния примеси. 1991, Л., ГИМИЗ, 278 с.
- [4] Бызова Н.Л., Куценогий К.П. Влияние структуры приземного слоя атмосферы и граничного условия на величину дозы и плотность отложений аэрозольной примеси. Тр. ИЭМ, 1977, вып. 15(60), с. 5-15.
- [5] Бызова Н.Л., Иванов В.Н., Гаргер Е.К. Турбулентность в пограничном слое атмосферы. 1989, Л., ГИМИЗ, 263 с.
- [6] Вейцер Ю.В., Лучинский Г.П. Маскирующие дымы. М.-Л., Госхимиздат, 1947, 202 с.
- [7] Гаргер Е.К. О рассеянии дыма от высотного точечного источника. В кн.: Метеорологические аспекты загрязнения атмосферы. 1971, Л., ГИМИЗ, с. 194-206.
- [8] Гаргер Е.К., Найденов А.В., Уваров Д.Б. Исследование относительной поперечной диффузии по дымовым струям в приземном слое атмосферы. Тр. ИЭМ, 1978, вып. 21(80), с. 16-24.
- [9] Гаргер Е.К., Конарев В.Ф., Найденов А.В., Уваров Д.Б. Оценка возможности использования трассеров для проверки гипотезы подобия лагранжевой турбулентности в приземном слое атмосферы. Тр. ИЭМ. 1977, 15(60), с. 78-99.
- [10] Гаргер Е.К., Найденов А.В., Уваров Д.Б. О поперечной диффузии в приземном слое атмосферы. Изв. АН СССР, ФАО, 1980, т. 16, N4, с. 368-375.
- [11] Гаргер Е.К. Экспериментальная оценка некоторых констант гипотезы подобия лагранжевых характеристик турбулентности в приземном слое атмосферы. Изв. АН СССР, ФАО, 1982, т.18,N8, с. 787-796.
- [12] Гаргер Е.К., Леманн А. О сравнении ветровых и турбулентных профилей по измерениям с помощью вертикальных дымовых полос и высотной метеомачты. Тр. ИЭМ, 1977, вып. 15 (60), с. 59-77.
- [13] Гук А.П., Самушкин В.А. и др. Цифровой фотограмметрический комплекс для создания и обновления карт. Геодезия и картография. 1996, N12, с. 39-48.
- [14] Елисеев В.С. Траектории дымовых струй от промышленного источника. Тр. ГГО, 1976, вып. 373, с. 78-85.
- [15] Елисеев В.С. К вопросу о фотографировании дымовых струй от промышленных источников. Тр. ГГО, 1969. Вып. 238, с. 85-95.
- [16] Елисеев В.С. Стереофотограмметрическое исследование воздушного потока в пограничном слое над холмом. Тр. ГГО, 1971, вып. 254, с. 87-99.
- [17] Жуков Г.П. Об измерении концентрации аэрозоля с помощью макета малогазового фотометра. Тр. ИЭМ, 1977, вып. 15(60), с. 119-132.
- [18] Казанский А.Б., Монин А.С. О форме дымовых струй. Изв. АН ССР, сер.геофиз. 1957, N8, с. 1020-1033.
- [19] Куценогий К.П. Экспериментальные и теоретические исследования распространения и осаждения аэрозолей в турбулентном потоке. Докторская диссертация, 1983 г. Новосибирск. 480 с.
- [20] Куценогий К.П. Экспериментальное и теоретическое исследование распространения и осаждения аэрозолей на растительность и почву. В кн.: Поведение пестицидов и химикатов в окружающей среде. Труды Советско-американского симпозиума. Айова-Сити, США, октябрь 1987 г. 1991, Л., ГИМИЗ, с.53-71.
- [21] Леманн А. К определению параметров диффузии для различных пунктов. В кн.: Метеорологические аспекты загрязнения атмосферы. 1971, Л., ГИМИЗ, с. 98.
- [22] Метеорология и атомная энергия. 1971, ГИМИЗ, 648 с.
- [23] Монин А.С. Распространение дыма в приземном слое атмосферы. Кн.: Атмосферная диффузия и загрязнение воздуха, 1962, М., ИЛ, с. 366-381.

- [24] Найденов А.В. О флуктуациях интегральной концентрации в дымовых струях в приземном слое атмосферы. Тр. ИЭМ, 1978, вып. 21(80), с. 25-31.
- [25] Найденов А.В. Флуктуации интегральной концентрации в струе примеси от точечного наземного источника. Тр. ИЭМ, 1984, вып. 29(103), с. 88-96.
- [26] Сахаров В.М., Куценогий К.П., Загуляев Г.Н., Павлов И.П., Гончаров А.П. Возможности мощного аэрозольного генератора при исследовании распространения примеси. Тр. ИЭМ, 1972, вып.27, с. 104-110.
- [27] Сахаров В.М. Конструктивные и режимные характеристики аэрозольного генератора с регулируемой дисперсностью. В кн.: Оптимизация технологии применения инсектицидных аэрозолей. 1983, Новосибирск, СО ВАСХНИЛ, с. 3-13.

Субмикронные частицы ($d \sim 0,5$ мкм)



Утро



Вечер

Грубодисперсные аэрозоли ($d \sim 20$ мкм)



Утро

Рис. 2. Изменение формы дымовой струи в зависимости от метеоусловий и размера аэрозольных частиц.