

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ, ГИДРОСФЕРЫ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 551.501.:551.510

В.П. Кабашников, А.П. Чайковский

Влияние атмосферной турбулентности на точность измерения интегральных параметров концентрации аэрозоля в факелах с помощью лидара

Институт физики НАНБ, г. Минск, Беларусь

Поступила в редакцию 7.06.2006 г.

Рассмотрена методика лидарного зондирования факелов аэрозольной примеси с целью оценки мощности точечного стационарного источника примеси. Исследовано влияние атмосферной турбулентности на точность измерения интегральных параметров концентрации аэрозоля в факелах с помощью лидара. Показано, что ошибка определяется статистическими моментами первого и второго порядков интеграла концентрации примеси по трассе зондирования. Она зависит от характеристик турбулентности, расстояния между зондируемым участком струи и источником примеси, а также от моментов времени посылки импульсов и координат зондирующих лучей.

Введение

Развитие методов лазерного зондирования и постоянное совершенствование лидарной аппаратуры расширяют сферу применения лидаров в системах мониторинга воздуха в промышленных регионах. Использование лидаров становится обязательным, когда возникает потребность в дистанционном оперативном получении данных о трехмерном распределении загрязняющих примесей. Одними из задач, при решении которых лидары находят практическое применение, являются лидарный контроль распределений концентраций аэрозольных примесей в факелах промышленных предприятий и оценка мощностей выбросов [1–6].

Идея измерения мощности стационарного источника примеси состоит в измерении интеграла от концентрации по произвольному сечению факела и последующем его умножении на скорость ветра [1–3, 7]. Результирующая величина есть поток примеси, который в стационарном случае равен мощности источника выбросов.

Несмотря на простоту этой идеи, для ее практической реализации и достоверности получаемой оценки требуется проработка ряда методических вопросов. Одна часть вопросов относится к проблеме определения концентрации примеси по измеренному лидарному сигналу. Для определения концентрации сначала находится распределение показателя ослабления или обратного рассеяния вдоль трассы зондирования по измеренному лидарному сигналу.

Возникающие здесь сложности связаны с возможными значительными оптическими плотностями аэрозольных струй и неопределенностью некоторых оптических характеристик аэрозольных частиц, прежде всего лидарного отношения (отношения

показателя ослабления к показателю обратного рассеяния). Концентрация примеси рассчитывается на основании соотношений между оптическими и микрофизическими параметрами аэрозольных частиц.

Основным фактором неопределенности на данном этапе является изменчивость состава и микроструктуры примеси. В целом успешность применения лидарного метода существенно зависит от проведения дополнительных оптических и других измерений характеристик примесей и атмосферы, которые позволяют дать обоснованную оценку параметрам, используемым в алгоритмах обработки лидарных данных.

Перечисленные выше вопросы имеют принципиальное значение для многих приложений метода лидарного зондирования и явились предметом детальных методических разработок [1–6]. Другая часть проблемы, которая до настоящего времени не изучалась в достаточной степени, связана с турбулентным характером поля скорости ветра и флуктуациями концентрации примеси в факеле. В конечном итоге турбулентные флуктуации концентраций примесей в факеле вносят дополнительную неопределенность при нахождении мощности источников выбросов. В работе [8] получено выражение для одноточечной временной корреляционной функции флуктуаций отраженного оптического излучения, вызванных атмосферной турбулентностью. Однако специфика лидарных измерений мощности выбросов аэрозольных примесей требует знания пространственно-временных корреляционных функций. В настоящей статье дана оценка значимости фактора атмосферной турбулентности при лидарных измерениях мощности выбросов на произвольных расстояниях от источника на основе модели факела, учитывающей внутрифакельные флуктуации концентрации.

Методика лидарного зондирования потоков примеси

Введем декартову систему координат с осью x , направленной вдоль среднего направления ветра, и осью z , направленной вертикально вверх. Будем считать, что зондирование аэрозольной струи ведется сбоку в вертикальной плоскости перпендикулярно среднему направлению ветра (рис. 1).

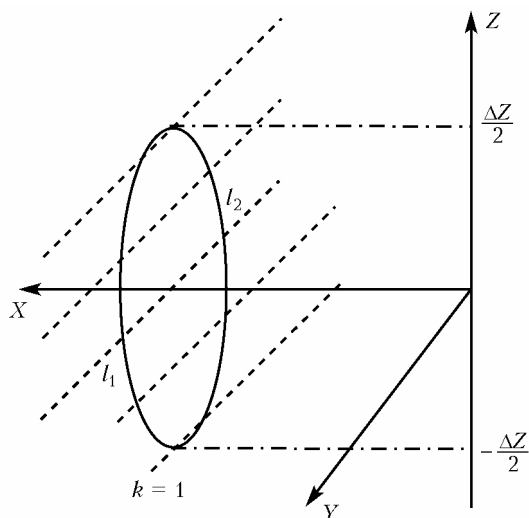


Рис. 1. Геометрия эксперимента

Интервал углов зондирования выбирается большим углового размера зоны вероятного нахождения факела. Предполагается, что лидар находится на расстоянии, которое много больше поперечного размера факела, так что непараллельностью «секущих» участков трасс зондирования в зоне факела можно пренебречь. Относительная ошибка в определении интеграла от концентрации по сечению, связанная с непараллельностью, равна угловому размеру факела.

На некотором расстоянии от устья дымовой трубы скорость течения в факеле становится практически равной скорости ветра. Это расстояние зависит от отношения начальной скорости истечения к скорости ветра, от степени перегрева и стратификации атмосферы. Его можно оценить, используя результаты расчетов структуры нагретых струй в сносящем потоке [9]. Если отношение начальной скорости истечения к скорости ветра равно 5 или 2,5, то указанное расстояние находится в пределах 20–40 радиусов устья трубы при нейтральной и устойчивой стратификациях атмосферы, 60–80 при нейтральной и превышает 100 радиусов устья трубы при неустойчивой стратификации атмосферы [9]. Пренебрегая диффузией вдоль оси факела по сравнению с ветровым переносом и считая, что влияние атмосферного аэрозоля на концентрацию частиц в факеле пренебрежимо мало, мощность M стационарного источника можно представить приближенно как интеграл от усредненной по турбулентности концентрации по произвольному

сечению факела, умноженный на среднюю скорость ветра U :

$$M = U \int \bar{\eta}(x, z) dz, \quad (1)$$

где η — линейный интеграл от концентрации примеси вдоль участка трассы зондирования, проходящего через факел. Черта — знак усреднения по турбулентности. Среднюю скорость ветра можно определять по данным наземных метеостанций с помощью известных модельных связей между приземной скоростью и скоростью ветра на высоте [10]. Можно использовать данные непосредственных измерений скорости на высоте с помощью доплеровского лидара или содара.

Интеграл η определяется по оптической толщине факела или по интегральному значению показателя обратного рассеяния, восстановленным по лидарным данным. Оптические параметры примеси находятся из решения лидарного уравнения

$$S(l) = A(\beta_a(l) + \beta_m(l)) \exp[-2(\tau_a(l) + \tau_m(l))], \quad (2)$$

где A — аппаратный параметр, который можно считать постоянным за пределами ближней зоны; $S(l) = P(l)l^2/W_0$ — откорректированный лидарный сигнал; $P(l)$ — лидарный сигнал; l — расстояние вдоль трассы зондирования; W_0 — энергия зондирующего импульса; $\tau_a = \int_0^l \sigma_a dl$ и $\tau_m = \int_0^l \sigma_m dl$ —

аэрозольная и молекулярная оптические толщи; σ_a и σ_m — аэрозольный и молекулярный показатели ослабления; β_a и β_m — показатели обратного аэрозольного и молекулярного рассеяния.

При решении лидарного уравнения (2) вводят дополнительные параметры γ_a и γ_m — аэрозольное и молекулярное лидарные отношения: $\gamma_a(l) = \sigma_a/\beta_a$ (зависит от микроструктуры аэрозольных частиц) и $\gamma_m = \sigma_m/\beta_m = \text{const}$.

Для оценки мощности источника примеси нет необходимости восстанавливать распределение оптических параметров примеси вдоль трассы зондирования. Достаточно определить оптическую толщину на участке (l_1, l_2) трассы зондирования, проходящем через факел. Требуемое решение может быть получено приведением уравнения (2) к виду

$$q(l) = A\tau'_{eff} \exp[-2\tau_{eff}], \quad (3)$$

где

$$q(l) = S(l)\gamma_a \exp\left[-2 \int (\gamma_a/\gamma_m - 1)\sigma_m dl\right]; \quad (4)$$

$$\tau_{eff} = \int_0^l (\sigma_a + \sigma_m \gamma_a/\gamma_m) dl, \quad (5)$$

$\tau'_{eff} = \sigma_a + \sigma_m \gamma_a/\gamma_m$ — производная от τ_{eff} по координате вдоль трассы зондирования.

Интегрируя обе части уравнения (4) на участке (l_1, l_2) , получаем

$$Q(l_2, l_1) = \int_{l_1}^{l_2} q(l) dl = -0,5A \left[\exp(-2\tau_{eff}(l_2)) - \exp(-2\tau_{eff}(l_1)) \right]. \quad (6)$$

Из (6) следует, что

$$\tau_a(l_2, l_1) = -0,5 \ln \left(1 - 2Q(l_2, l_1) / AT^2(l_1) \right) - \int_{l_1}^{l_2} \sigma_m \gamma_a / \gamma_m dl. \quad (7)$$

Здесь $T(l) = \exp(-(\tau_a(l) + \tau_m(l)))$ — оптическая толщина участка трассы зондирования до струи;

$$Q(l_2, l_1) = \int_{l_1}^{l_2} S(l) \gamma_a \exp \left[-2 \int_{l_1}^l (\gamma_a / \gamma_m - 1) \sigma_m d\zeta \right] dl. \quad (8)$$

Величина $Q(l_2, l_1)$ является накоплением лидарного сигнала $S(l)$ с весовой функцией

$$\gamma_a \exp \left(-2 \int (\gamma_a / \gamma_m - 1) \sigma_m dl \right)$$

на участке (l_1, l_2) . Выражение (7) является вариантом решения лидарного уравнения методом «интегрального накопления» [1]. Дифференцирование выражения (7) позволяет получить известные решения Fernald—Klett для параметров σ_a и β_a . При обработке данных реальных экспериментов параметр γ_a обычно считается постоянным, поскольку информация о его пространственной изменчивости отсутствует.

Для рассматриваемой задачи существенной проблемой является калибровка лидара, т.е. определение параметра A . Выбор методики калибровки лидара обычно определяется наличием аппаратуры для независимого измерения оптических характеристик атмосферы. При зондировании аэрозоля по вертикальным трассам для калибровки лидара используют результаты измерений в высоких слоях атмосферы, где рассеяние определяется в основном молекулярной компонентой. Зондирование выростов в промышленных регионах осуществляется по трассам, близким к горизонтальным. В этом случае для калибровки лидаров могут использоваться результаты трассовых измерений оптической толщи аэрозольного шлейфа или локальные нефелометрические измерения в ближней зоне лидара.

В настоящее время все большее число лидарных станций комплектуются солнечными радиометрами и превращаются в комплексные станции лидарного и радиометрического мониторинга аэрозоля. Данные радиометрических измерений также могут быть весьма эффективно использованы для калибровки лидарных систем [6]. В этом случае необходимо провести дополнительные лидарные измерения по вертикальной трассе. Значение параметра A определится из соотношения $A = S(l_\infty) / \beta_\infty T_\infty^2$, где « ∞ » обозначает величину соответствующего параметра в реперной точке на высоте порядка 10 км; β_∞ — показатель обратного рассеяния, который бли-

зок к молекулярному; T_∞ — аэрозольное ослабление атмосферы, которое может быть измерено солнечным фотометром.

Недостатком подобного метода локальной калибровки является большая величина относительной погрешности измерения $S(l_\infty)$. Другим способом калибровки является расчет интеграла (8) по слою атмосферы и использование соотношения

$$A = 2Q(\infty, 0) \left[1 - T_\infty^2 \exp \left(-2 \int_0^\infty \sigma_m \gamma_a / \gamma_m dl \right) \right]^{-1}. \quad (9)$$

Параметры T_∞ и γ_a могут быть определены по результатам измерений сканирующим солнечным фотометром.

Интегралы от концентрации примеси по участку трассы зондирования η находят по измеренным значениям оптической толщи $\tau_a(l_2, l_1)$ с помощью эмпирических соотношений [1].

Возможные схемы эксперимента

Рассмотрим две схемы эксперимента для оценки интеграла от концентрации по сечению факела. В первой схеме вдоль каждой трассы зондирования посылаются N импульсов. Затем, спустя время T_1 , необходимое для смены угла места трассы зондирования, проводятся измерения по другой трассе и так далее, пока не будет просмотрено все поперечное сечение факела. Во второй схеме лазер во время работы непрерывно и равномерно меняет угол места трассы зондирования, проходя интервал углов, где находится факел, поочередно в двух направлениях.

В первой схеме моменты посылки импульсов могут быть представлены как

$$t_{k,n} = (n-1)v^{-1} + (k-1)[(N-1)v^{-1} + T_1], \quad (10)$$

где n — номер импульса, посылаемого вдоль трассы k ; v — частота посылки лазерных импульсов, Гц. Вертикальные координаты зондирующих лучей в картинной плоскости определяются выражением

$$z_k = -0,5\Delta Z + \Delta Z(k-1)/(K-1), \quad (11)$$

где z_k — вертикальная координата луча; K — общее число трасс; ΔZ — интервал значений вертикальных координат зондирования в районе факела (см. рис. 1).

Во второй схеме эксперимента моменты посылки импульсов могут быть представлены формулой

$$t_{k,m} = (k-1)v^{-1} + (m-1)[(K-1)v^{-1} + T_2], \quad (12)$$

а вертикальные координаты зондирующих лучей в картинной плоскости определяются следующим образом:

$$z_k = (-0,5\Delta Z + \Delta Z(k-1)/(K-1))(-1)^{m-1}. \quad (13)$$

В формулах (12), (13) m означает номер сканирования зондирующим лучом поперечного сече-

ния струи; T_2 — время, необходимое для смены направления сканирования по углу места.

Пусть $\eta_{k,n}$ и $\eta_{k,m}$ — интегральные концентрации, определенные по результатам лидарного зондирования по трассе k n -м зондирующим импульсом по первой схеме или в процессе m -го зондирования факела по второй схеме. Интеграл от концентрации по сечению (площадная интегральная концентрация) аппроксимируется величинами

$$I = \Delta Z \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \eta_{k,n} / N, \quad (14)$$

$$I = \Delta Z \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \eta_{k,m} / M \quad (15)$$

соответственно для первой и для второй схем зондирования; M — полное число проходов сечения струи зондирующим лучом.

Погрешность оценки интеграла от концентрации примеси по сечению турбулентной струи

Отличие I от интеграла по сечению от средней концентрации обусловлено пульсациями концентрации и конечностью числа зондирующих лучей. Погрешность, обусловленную конечным числом зондирующих трасс K , можно оценить, предполагая, что число усредняющих импульсов N и число проходов M достаточно велико, так что измеренные

$\sum_{n=1}^N \eta_{k,n} / N$ и $\sum_{m=1}^M \eta_{k,m} / M$ близки к усредненной по

турбулентности интегральной концентрации вдоль k -й трассы. Как показывает эксперимент [11] и следует из модели факела [12], зависимость усредненной интегральной концентрации от поперечной координаты в факелах близка к гауссовой функции. При гауссовом профиле интегральной концентрации конечные суммы (14), (15) по k аппроксимируют интеграл по z с погрешностью, как показали расчеты, порядка нескольких процентов даже при 5–7 трассах зондирования. Поэтому для нахождения интеграла по сечению область возможного нахождения факела достаточно зондировать небольшим количеством трасс.

Ошибка

$$\varepsilon = \sqrt{(\overline{I^2} / \bar{I}^2) - 1} \cdot 100\%, \quad (16)$$

возникающая при измерении величины I вследствие атмосферной турбулентности, определяется, как видно из (14)–(16), статистическими моментами первого и второго порядков интегральной концентрации примеси вдоль факельного участка трассы зондирования, а также моментами времени посылки импульсов и координатами зондирующих лучей.

Для расчета ошибки использовались полученные в [12] выражения для средней интегральной

концентрации и ее ковариации с учетом и (для сравнения) без учета внутрифакельных флуктуаций концентрации, т.е. фактически по модели Гиффорда [13]. Все расчеты были сделаны при следующих исходных данных: средняя скорость ветра 4 м/с, среднеквадратическая продольная пульсационная компонента скорости ветра 0,4 м/с, вертикальная — 0,3 м/с; лагранжево время корреляции горизонтальной скорости — 240 с, вертикальной — 90 с; эйлерово время корреляции горизонтальной скорости — 40 с, вертикальной — 20 с; вертикальный размер начального сечения — 1 м; $K = 9$, а интервал изменения вертикальных координат лучей ΔZ приблизительно в два раза превышал поперечный размер факела.

На рис. 2 приведены результаты расчета ошибки ε для лидача с малой рабочей частотой 0,1 Гц. Хотя лазеры с такой частотой импульсов сейчас практически не используются, эта частота взята как предельный случай малых частот.

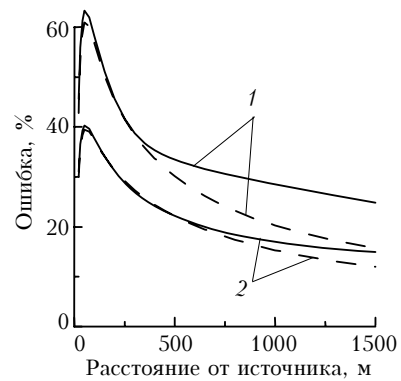


Рис. 2. Погрешность, обусловленная атмосферной турбулентностью, суммы интегральных концентраций (14) как функция расстояния от источника примеси. Частота лазерных импульсов 0,1 Гц. Схема эксперимента — 1. Время смены трассы зондирования — 10 с. Число посылаемых импульсов по трассе зондирования равно 1 (1), 4 (2). Расчет с учетом (сплошные линии) и без учета (штриховые) внутрифакельных флуктуаций концентрации

Рассматривается первая схема проведения эксперимента. Время смены трассы зондирования — $T_1 = 10$ с. Время измерения при $N = 1$ и 4 составляет соответственно 80 и 350 с. Максимум величины ε приблизительно находится в сечении, где максимальны флуктуации концентраций. При увеличении числа усредняющих импульсов в 4 раза ошибка снизилась менее чем в 2 раза, поскольку время корреляции интегральной концентрации (рис. 3) сопоставимо или больше интервала между импульсами.

При $N = 4$ максимальная ошибка составляет около 40%, а на расстояниях от источника, превышающих 500 м, ошибка менее 20%. Результаты расчета для второй схемы проведения эксперимента оказались близкими к данным, приведенным на рис. 2, т.е. для низкочастотных лазеров обе схемы зондирования оказались одинаково чувствительными к фактору турбулентности.

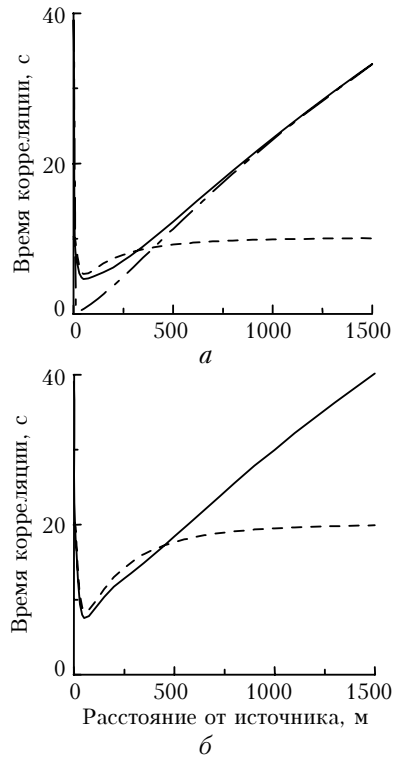


Рис. 3. Времена корреляций пульсаций интегральной концентрации, определенные по спаду в e раз, в зависимости от расстояния от начального сечения на оси усредненного факела при $z = 0$ (а) и на расстоянии $z = \sqrt{L(x/U)}$ от оси (б). Расчет с учетом (сплошные линии) и без учета (штриховые) внутрифакельных флуктуаций концентрации. Штрихпунктирная линия — время корреляции пульсаций площадной интегральной концентрации, рассчитанное с учетом внутрифакельных флуктуаций концентрации

На рис. 4 приведены результаты расчета ошибки ϵ для лидара с рабочей частотой 10 Гц.

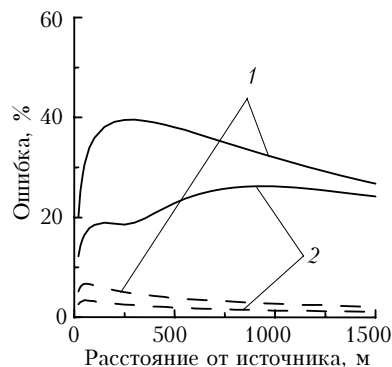


Рис. 4. Погрешность, обусловленная атмосферной турбулентностью, суммы интегральных концентраций (15) как функция расстояния от источника примеси. Частота лазерных импульсов 10 Гц. Схема эксперимента — 2. Время смены направления сканирования — 10 с. Число проходов при сканировании аэрозольной струи равно 1 (1), 4 (2). Расчет с учетом (сплошные линии) и без учета (штриховые) внутрифакельных флуктуаций концентрации

Рассматривается вторая схема эксперимента. Время смены направления сканирования по углу —

$T_2 = 10$ с. Время измерения при $M = 1$ и 4 составляет соответственно 0,8 и 33 с.

В случае учета внутрифакельных флуктуаций для $M = 4$ максимальная ошибка составляет около 25%, а на расстояниях от источника, меньше 300 м, ошибка менее 20%. Для лидара с рабочей частотой 10 Гц, осуществляющего зондирование по первой экспериментальной схеме, результаты расчета при $N = 1$ и 4 практически совпали между собой и с данными, приведенными на рис. 4 для $M = 1$. Отсутствие эффекта усреднения в данном случае объясняется слишком высокой частотой импульсов и соответственно малой длительностью усреднения по сравнению со временем корреляции линейной интегральной концентрации.

Преимуществом второй схемы измерений относительно первой при использовании высокочастотного лазера является меньшее время усреднения, необходимое для достижения сопоставимых уровней точности. Минимальная длительность эксперимента, необходимая для снижения ошибки в R раз по сравнению со случаем $M = 1$, приблизительно равна времени корреляции площадной интегральной концентрации (интеграла по сечению), умноженной на R^2 . Поскольку время корреляции интеграла по сечению приблизительно равно времени корреляции интеграла от концентрации по лучу зрения, то в первой схеме за то же время такое же снижение ошибки будет иметь место только для одной пространственной точки. Учитывая, что начальные погрешности измерений без усреднений (при $N = M = 1$) по обеим схемам сопоставимы, можно заключить, что время измерения по первой схеме будет в K раз больше времени измерения по второй схеме.

Кроме того, схема с высокочастотным лазером, способным просканировать поперечное сечение факела за время, много меньшее времени корреляции интегральной концентрации, приближается к схеме целевого раструба, который полностью охватывает в вертикальной плоскости лазерным пучком сечение шлейфа по однойсылке излучения, не осуществляя сканирования. В этом случае флуктуации величины I определяются только внутрифакельными флуктуациями концентрации, поскольку подавляются флуктуации величины I , обусловленные смещениями факела как целого. Вот почему приведенные на рис. 4 результаты расчетов с учетом и без учета внутрифакельных флуктуаций концентрации различаются значительно.

Для уменьшения ошибки, вызванной нестационарностью факела, нужно увеличивать число зондирующих импульсов и время измерения. Однако следует учитывать, что в атмосфере имеют место мезомасштабные флуктуации скорости ветра, которые характеризуются временами от нескольких минут до нескольких часов и приводят к вариациям средней скорости ветра U . Изменчивость скорости ветра будет ограничиваться предельная точность измерения мощностью источника примеси. По данным [14] типичная относительная изменчивость скорости ветра на высоте 121 м за 5, 10, 30 и 60 мин составляет соответственно 17, 19, 24 и 29%.

Таким образом, с увеличением времени усреднения ошибка определения интеграла от концентрации по сечению факела уменьшается, но растет неопределенность средней скорости ветра. Поэтому оптимальной будет такая длительность измерений, при которой ошибка определения интеграла от концентрации будет приблизительно равна неопределенности средней скорости ветра. Из приведенных выше данных следует, что в этих условиях большей точности определения мощности источника примеси можно добиться, используя высокочастотный лазер и вторую схему проведения эксперимента.

Заключение

Итак, при использовании низкочастотного лазера, частота которого сравнима или меньше обратного времени корреляции линейной интегральной концентрации, обе схемы измерений оказались эквивалентны. Для высокочастотного лазера, способного просканировать поперечное сечение факела за время, много меньшее времени корреляции линейной интегральной концентрации, во второй схеме ошибка измерений снижается по сравнению с первой схемой за счет подавления флуктуаций, обусловленных смещениями факела как целого. Преимуществом второй схемы измерений перед первой при использовании высокочастотного лазера является также меньшее время усреднения, необходимое для достижения сопоставимых уровней точности, что существенно в условиях нестабильной атмосферы.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований, проект Ф05БР-008.

1. Зуев В.Е., Кауль Б.В., Самохвалов И.В., Кирков К.И., Цанев В.И. Лазерное зондирование промышленных аэрозолей. Новосибирск: Наука, 1986. 188 с.
2. Балин Ю.С., Разенков И.А. Лазерный контроль аэрозольных загрязнений воздушного бассейна промышленных центров // Оптика атмосфер. и океана. 1993. Т. 6. № 2. С. 169–188.
3. Иванов А.П., Чайковский А.П., Осипенко Ф.П., Хутко И.С., Король М.М., Шербаков В.Н., Ка-

- башиков В.П., Бриль А.И., Попов В.М., Ковалев А.А., Самусенко А.М., Другаченко М.А. Исследование аэрозольного загрязнения атмосферы в промышленном регионе с применением лидаров // Оптика атмосфер. и океана. 1998. Т. 11. № 4. С. 371–380.
4. Beniston M., Wolf J.P., Beniston-Rebetez M., Kolsch H.J., Rairoux P., Woste L. Use of Lidar Measurements and Numerical Models in Air Pollution Research // J. Geophys. Res. D. 1990. V. 95. N 7. P. 9879–9894.
 5. Choulepnikoff L., Van den Bergh H., Calpini B., Mitev V. Atmospheric air pollution monitoring, Lidar // Encyclopedia of environmental analysis and remediation / Ed. by Robert A. Meyers. John Wiley & Sons, Inc., 1998. P. 4873–4909.
 6. Chaikovsky A., Ivanov A., Korol M., Slesar A., Denisov S., Osipenko F., Hutko I., Dubovik O., Holben B., Goloub Ph. Atmospheric particulate matter variability in an industrial center from multi-wavelength lidar and Sun-sky radiometer measurements // Twelfth Int. Sympos. on Atmospheric and Ocean Optics / Atmospheric Physics / G.A. Zherebtsov, G.G. Matvienko, eds // Proc. SPIE. 2005. V. 6160. P. 117–125.
 7. Банах В.А., Смалыхо И.Н. Об определении параметров дымовых шлейфов по обратному рассеянию оптического излучения // Оптика атмосфер. и океана. 1991. Т. 4. № 10. С. 1048–1053.
 8. Банах В.А., Миронов В.Л., Морский И.Н., Смалыхо И.Н., Суторихин И.А. Статистические характеристики интенсивности рассеянного на аэрозольном шлейфе оптического излучения // Оптика атмосфер. и океана. 1993. Т. 6. № 10. С. 1289–1296.
 9. Бруцкий Е.В. Турбулентные стратифицированные струйные течения. Киев: Наук. думка, 1986. 295 с.
 10. Атмосферная турбулентность и моделирование распространения примесей / Под ред. Ф.Т. Ныстадта и Х. Ван Допа. Л.: Гидрометеониздат, 1985. 351 с.
 11. Бызова Н.Л., Гаргер Е.К., Иванов В.Н. Экспериментальные исследования атмосферной диффузии и расчеты рассеяния примесей. Л.: Гидрометеониздат, 1991. 297 с.
 12. Кабашиков В.П., Чайковский А.П. Модель факела пасивной примеси с учетом его внутренней структуры // Оптика атмосфер. и океана. 2007. Т. 20. № 1. С. 73–79.
 13. Гиффорд Ф.А. Статистическая модель дымовой струи // Атмосферная диффузия и загрязнение воздуха. М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1962. С. 143–186.
 14. Атмосфера: Справочник. Л.: Гидрометеониздат, 1991. 509 с.

V.P. Kabashnikov, A.P. Chaikovsky. Influence of atmospheric turbulence on the lidar measurement accuracy of the aerosol concentration integral parameters in plumes.

A lidar technique to sound an aerosol plume with the purpose of source power estimation is considered. Influence of atmospheric turbulence on the lidar measurement accuracy of the aerosol concentration integral parameters is studied. It is shown, that the measurement error is determined by the first and second order statistical moments of the integral impurity concentrations along the plume area sounding line. The error depends on turbulence parameters, distance between measurement plume cross section and the impurity source, and also on instants of pulse shots and coordinates of sounding beams.