

Оценка погрешности лидарных измерений концентрации сероводорода в атмосфере

В. Е. ПРИВАЛОВ¹, В. Г. ШЕМАНИН²

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: vaevpriv@yandex.ru

²Новороссийский политехнический институт (филиал) Кубанского государственного технологического университета, Новороссийск, Россия

Оценены погрешности измерений концентраций молекул сероводорода в диапазоне 10^{10} – 10^{14} см⁻³ в атмосфере. Измерения выполнены лидарами комбинационного рассеяния света и дифференциального поглощения и рассеяния при зондировании на расстояниях до 2 км. Показано, что относительная погрешность измерений концентраций в данном диапазоне лидаром комбинационного рассеяния света за время измерения 100 с составляет не более 20 % для всего интервала расстояний зондирования. Получена относительная погрешность измерений лидаром дифференциального поглощения и рассеяния на длине волны 3,83 мкм, равная 20–26 %.

Ключевые слова: лидар комбинационного рассеяния света, лидар дифференциального поглощения и рассеяния, молекула сероводорода, концентрация.

The measurement error estimation of the hydrogen sulfide molecules concentration in the range of 10^{10} – 10^{14} cm⁻³ in the atmosphere by Raman lidar and the differential absorption and scattering lidar at the range distances up to 2 km has been fulfilled. It was shown that the Raman lidar can during measurement time of 100 s record such a concentration of the studied molecules in the atmosphere with the relative error no more than 20 % for all range of distances and the differential absorption and scattering lidar at the 3,83 μm wavelength measurement relative error lies in the range of 20–26 %.

Key words: Raman lidar, differential absorption and scattering lidar, hydrogen sulfide molecule, concentration.

Результаты лазерного зондирования молекул сероводорода проанализированы в работе [1]. Установлено, что лидар комбинационного рассеяния света можно использовать для дистанционного измерения концентрации молекул на уровне десятков и сотен единиц предельно допустимых концентраций (ПДК) в атмосфере. Оценка потенциальных возможностей такого лидара для зондирования молекул сероводорода позволила найти оптимальное решение задачи регистрации на заданном расстоянии заданной концентрации исследуемых молекул в атмосфере. В [1] также рассмотрены варианты мониторинга молекул сероводорода в атмосфере лидаром комбинационного рассеяния света и лидаром дифференциального поглощения и рассеяния в направлении назад.

Целью настоящей работы является оценка погрешности измерения концентрации молекул сероводорода в атмосфере лидарами комбинационного рассеяния света и лидарами дифференциального поглощения и рассеяния при исследовании загрязнения атмосферы сероводородом. Для этого выполнено численное решение лидарных уравнений двух типов для различных длин волн лазерного излучения и параметров лидара с целью минимизации погрешности лидарных измерений концентрации исследуемых молекул в атмосфере.

Моностатический лидар комбинационного рассеяния света. Рассмотрим оптическую схему лидара, в которой оптическая ось приёмного телескопа направлена вдоль лазерного луча [1], а также использование гармоник Nd-YAG-лазера с длинами волн 532, 355, 266 нм, длительностью импульсов 10 нс и энергией импульса до 10 мДж. Излучение обратно-

го комбинационного рассеяния молекулами сероводорода собиралось приёмным телескопом типа Ньютона (площадь приёмной апертуры телескопа S_0) со сферическим зеркалом диаметром 0,4 м, затем фокусировалось линзовым объективом в световод и через интерференционный светофильтр на фотоприёмник, напряжение которого записывалось на плату сбора данных персонального компьютера.

Как и ранее в [1], лидар характеризуется числом n_0 фотонов в импульсе длительностью τ_0 лазерного излучения в атмосферу. Оптические характеристики атмосферы на трассе зондирования z задаются коэффициентом ослабления $\alpha(\lambda, z)$, а молекул сероводорода – дифференциальным сечением комбинационного рассеяния света молекулой ($d\sigma/d\Omega$) и их концентрацией $N(z)$. Исследуется однократное комбинационное рассеяние в однородной атмосфере [2].

Лидарное уравнение для комбинационного рассеяния света исследуемыми молекулами в направлении назад запишем для регистрируемых чисел фотонов в виде [1]:

$$n(z) = \frac{c\tau_0}{2} \frac{n_0 S_0}{z^2} G(z) f t_d N(z) \xi(\lambda) \times \exp \left\{ - \int_0^z [\alpha(\lambda_0, r) + \alpha(\lambda_R, r)] dr \right\} \frac{d\sigma}{d\Omega}, \quad (1)$$

где $n(z)$ – число фотонов, зарегистрированное фотодетектором лидара на длине волны комбинационного рассеяния света λ_R на расстоянии z ; c – скорость света; $G(z)$ – геоме-

трическая функция лидара; f – частота следования лазерных импульсов; t_d – время измерения; $\xi(\lambda)$ – относительная спектральная чувствительность фотоприёмника; $\alpha(\lambda_0, z)$, $\alpha(\lambda_R, z)$ – коэффициенты ослабления на длинах волн соответственно лазерного излучения и комбинационного рассеяния света исследуемыми молекулами.

Из уравнения (1) получим выражение для концентрации молекул сероводорода:

$$N(z) = 2n(z)z^2 / \left(c \tau_0 n_0 S_0 G(z) f t_d \xi(\lambda) \times \exp \left\{ - \int_0^z [\alpha(\lambda_0, r) + \alpha(\lambda_R, r)] dr \right\} \frac{d\sigma}{d\Omega} \right). \quad (2)$$

Для вычисления погрешности найдём дифференциал (2) в виде функции $N(z) = f(n, t_d)$. Сделаем замену дифференциалов на конечные приращения и найдём абсолютную погрешность измерения концентрации:

$$\Delta N(z) = \frac{2z^2 [\Delta n(z) + n(z) \Delta t_d / t_d]}{c \tau_0 n_0 S_0 G(z) f t_d \exp \left\{ - \int_0^z [\alpha(\lambda_0, r) + \alpha(\lambda_R, r)] dr \right\} \frac{d\sigma}{d\Omega}}, \quad (3)$$

где ν_0 , ν_R – частоты колебаний молекул сероводорода, соответствующие длинам волн λ_0 , λ_R .

Разделим выражение (3) на уравнение (2) и получим относительную погрешность измерения концентрации молекул сероводорода в атмосфере:

$$\varepsilon = \Delta N(z) / N(z) = \sqrt{(\Delta n / n)^2 + (\Delta t_d / t_d)^2}. \quad (4)$$

Рассмотрим численное решение уравнения (3), предположив $G(z) = 1$. Минимальный уровень концентрации молекул сероводорода $N(z) = 10^{11} \text{ см}^{-3}$, так как ПДК этих молекул в атмосферном воздухе составляет $0,08 \text{ мг/м}^3$ ($1,4 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$) [1]. Частота следования импульсов современных лазеров может быть более 10 кГц , поэтому для обнаружения низких уровней концентрации исследуемых молекул сигнал регистрируется в режиме синхронного счёта фотонов [1]. Частоты собственных валентных SH-колебаний исследуемых молекул H_2S ($\nu = 2611 \text{ см}^{-1}$) взяты из [1]. По этим значениям были рассчитаны длины волн λ_R полос комбинационного рассеяния исследуемых молекул для выбранных длин волн лазеров λ_0 . Дифференциальные сечения колебательного комбинационного рассеяния молекулы сероводорода $d\sigma/d\Omega$ для длин волн выбранных лазеров были рассчитаны по экспериментально измеренным значениям сечений для длины волны излучения азотного лазера $\lambda_0 = 337,1 \text{ нм}$ из [1, 2].

Выполним численное решение уравнения (3) для трёх значений длин волн лазерного излучения и расстояний зондирования от 50 м до 2 км . При этом предположим, что минимальное число детектируемых фотонов на длине волны комбинационного рассеяния света молекулами сероводорода равно 10 , а диапазон концентраций исследуемых молекул $N(z) = 10^{10} - 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Время измерения примем $t_d = 100 \text{ с}$. Ре-

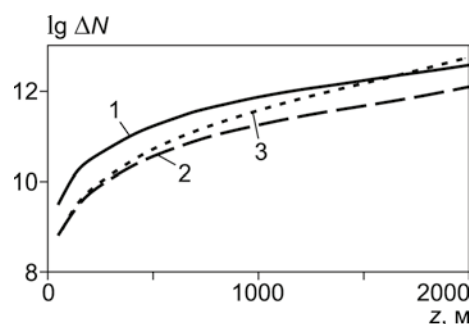


Рис. 1. Логарифмическая зависимость абсолютной погрешности концентрации ΔN от расстояния зондирования z при времени измерения 100 с и длине волны лазерного излучения 532 (1), 355 (2) и 266 (3) нм

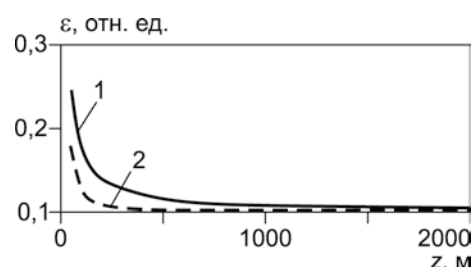


Рис. 2. Зависимости относительной погрешности ε концентрации исследуемых молекул от расстояния зондирования z , рассчитанные по уравнению (4), при длинах волн лазерного излучения 532 (1) и 355 (2) нм

шение уравнения (3) представлено на рис. 1. Абсолютная погрешность увеличивается вместе с расстоянием зондирования на всех длинах волн зондирующего излучения. Сложная спектральная зависимость сомножителей из (3) приводит к неодинаковому увеличению абсолютной погрешности измерения концентрации $\Delta N(z)$ молекул сероводорода на разных длинах волн зондирующего излучения: с увеличением расстояния зондирования погрешность на короткой длине волны (266 нм) растёт стремительнее, чем на более длинных волнах.

На рис. 2 приведены зависимости относительной погрешности измерений концентрации для тех же параметров задачи, вычисленные по уравнениям (2)–(4). Увеличение расстояния зондирования плавно сводит обе кривые к теоретическому значению $\varepsilon = 0,1$, но для расстояний $z < 500 \text{ м}$ расчётное значение ε заметно превышает теоретическое из (4), поскольку в (4) с увеличением расстояния зондирования при $z > 500 \text{ м}$ время измерения резко увеличивается.

Таким образом, относительная погрешность измерения концентрации молекул сероводорода будет зависеть от расстояния зондирования и определяться относительной погрешностью времени измерения, причём для $z = 500 \text{ м}$ расчётное значение составит 12% , а для $z = 100 \text{ м}$ – 18% . Следовательно, лидаром комбинационного рассеяния света можно в течение 100 с измерить концентрацию исследуемых молекул в атмосфере с относительной погрешностью не более 20% для всего диапазона расстояний зондирования.

Лидар дифференциального поглощения и рассеяния. В этом лидаре используется двухволновый излучатель: первый зондирующий луч с одной длиной волны попадает в центр инфракрасной полосы поглощения молекул сероводорода, второй луч с другой длиной волны – вне этой полосы, причём оба лазерных луча распространяются вдоль оси приёмного телескопа [1–3]. Максимум полосы валентных SH-колебаний молекул H_2S из [1, 2] равен 2611 см^{-1} или $3,83\text{ мкм}$. В качестве опорного канала служит лазерное излучение второго лазера с длиной волны $3,9\text{ мкм}$.

Рассмотрим применение двух лазеров на длинах волн $3,83$ и $3,9\text{ мкм}$, длительность импульсов 10 нс , энергии в импульсе до 1 мДж при частоте следования лазерных импульсов $f < 10\text{ кГц}$ [1]. Прошедшее через атмосферу зондирующее излучение на длине волны $3,83\text{ мкм}$ ослабляется за счёт поглощения молекулами сероводорода. Излучение, обратно рассеянное аэрозолем и газовыми молекулами атмосферы на указанных длинах волн, собирается телескопом типа Ньютона со сферическим зеркалом диаметром $0,4\text{ м}$ и фокусируется линзовым объективом на светоделитель. Из светоделителя выходят два луча, каждый направляется через интерференционный фильтр на свой фотоприёмник. Напряжения двух фотоприёмников записываются на плату сбора данных персонального компьютера. Часть лазерного излучения каждого лазера направляется стеклянными пластинами через интерференционные фильтры на два других фотоприёмника для контроля энергии лазерных импульсов и формирования начала отсчёта времени измерения.

Рассматриваемый диапазон концентрации молекул сероводорода такой же, как при измерениях лидаром комбинационного рассеяния света. Коэффициенты ослабления на длинах волн $3,83$ и $3,9\text{ мкм}$ составляют соответственно $\alpha(\lambda_0, z) = 0,05\text{ км}^{-1}$, $\alpha(\lambda_1, z) = 0,04\text{ км}^{-1}$, сечение резонансного поглощения молекулами сероводорода на длине волны $3,83\text{ мкм}$ $\sigma_0 = 4 \cdot 10^{-18}\text{ см}^2$ [1, 2]. Поперечное сечение зеркала приёмного телескопа лидара равно $0,126\text{ м}^2$. Шаг расстояний зондирования выбирался равным от 100 м до 1 км в зависимости от уровня концентрации исследуемых молекул.

Выполним численное решение лидарного уравнения для дифференциального поглощения и рассеяния [3]:

$$\int_0^z N(z) dz = \frac{1}{2\sigma_0} \times \left\{ \ln \left[\frac{n(\lambda_1, z) n_0 K_{10} \rho_0}{n(\lambda_0, z) n_1 K_{11} \rho_1} \right] - \frac{1}{\sigma_0} \int_0^z [\alpha(\lambda_0, z) - \alpha(\lambda_1, z)] dz \right\}, \quad (5)$$

где $n(\lambda, z)$ – регистрируемое лидаром число фотонов на длинах волн λ_0, λ_1 (λ_1 находится вне полосы поглощения исследуемых молекул сероводорода) на расстоянии z ; n_0, n_1 – число

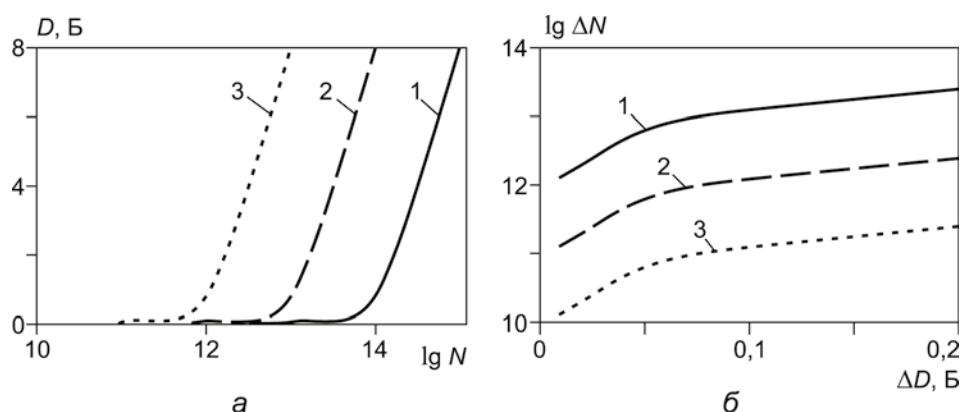


Рис. 3. Зависимости оптической плотности D от логарифма концентрации N (а) и логарифма абсолютной погрешности концентрации ΔN от абсолютной погрешности оптической плотности ΔD (б) для трасс зондирования 10 (1), 100 (2) и 1000 (3) м

фотонов импульса лазерного излучения; K_{10}, K_{11} – лидарные константы; ρ_0, ρ_1 – суммарные коэффициенты аэрозольного и молекулярного обратных рассеяний в атмосфере; все величины определены для λ_0, λ_1 .

В общем случае оптическая плотность D при дифференциальном поглощении определяется сечением резонансного поглощения σ_0 исследуемых молекул, их концентрацией N и толщиной Δz поглощающего слоя атмосферы [1] и одновременно – логарифмом отношения лидарных сигналов на двух выбранных длинах волн. Предположим, что это отношение равно единице, тогда лидарное уравнение (5) примет вид

$$\int_0^z N(z) dz = \frac{D}{2\sigma_0} - \frac{1}{\sigma_0} \int_0^z [\alpha(\lambda_0, z) - \alpha(\lambda_1, z)] dz. \quad (6)$$

Выполним численный расчёт по (6) оптической плотности дифференциального поглощения для выбранных значений концентраций исследуемых молекул в диапазоне $\Delta z = 10\text{--}1000\text{ м}$. Результаты приведены на рис. 3, а. Для концентрации молекул 10^{11} см^{-3} должно быть $\Delta z \geq 1\text{ км}$ (вплоть до 5 км).

Для исследования зависимости абсолютных погрешностей измерений концентрации молекул сероводорода ΔN и оптической плотности ΔD найдём дифференциал выражения (6) как функции $\Delta N = f(\Delta D, \Delta z)$, заменим дифференциалы на конечные приращения и получим абсолютную погрешность измерения концентрации для различных Δz :

$$\Delta N = \Delta D / (2\sigma_0 \Delta z). \quad (7)$$

Разделим ΔN из (7) на N из (6) и запишем выражение для относительной погрешности ε измерения концентрации молекул сероводорода в атмосфере как функции длины трассы зондирования Δz :

$$\varepsilon = \frac{\Delta N(z)}{N(z)} = \frac{\Delta D}{D - 2(\alpha_0 - \alpha_1) \Delta z}. \quad (8)$$

Затем по уравнению (7) рассчитаем значения абсолютной погрешности оптической плотности ΔD в диапазоне 0,01–0,20 Б при длине трассы зондирования $\Delta z = 10 \dots 1000$ м. Результаты расчёта приведены на рис. 3, б. Откуда следует, что можно измерять концентрацию молекул сероводорода в атмосфере 10^{11} см^{-3} на трассах зондирования 1 км с абсолютной погрешностью $\Delta N = 1,25 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ для выбранных ранее параметров лидара. Если длину трассы увеличить до 10 км, то для тех же параметров лидара можно зарегистрировать уровни концентрации молекул сероводорода до $2,5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$.

Вычисленные значения относительной погрешности измерений концентрации молекул сероводорода в атмосфере для трасс зондирования 10, 100 и 1000 м равны соответственно 19,5; 19,6; 25,9 % и почти в два раза превышают теоретическое значение (8). Таким образом, относительная погрешность измерения концентрации исследуемых молекул сероводорода в диапазоне $10^{11} \dots 10^{14} \text{ см}^{-3}$ на длине волны лазерного излучения 3,83 мкм и расстояниях зондирования 10–1000 м лежит в диапазоне 20–26 % для

рассмотренного лидара дифференциального поглощения и рассеяния. Поэтому с помощью данного лидара можно регистрировать исследуемые молекулы сероводорода концентрацией до 10^{11} см^{-3} .

Работа выполнена в рамках основной части Государственного задания Министерства образования и науки РФ № 5.7721.2017/БЧ.

Л и т е р а т у р а

1. Привалов В. Е., Шеманин В. Г. Лидарное зондирование молекул сероводорода в атмосфере // Оптический журнал. 2017. Т. 84. Вып. 6. С. 71–74.
2. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование. М.: Мир, 1987.
3. Зуев В. В., Катаев М. Ю., Макогон М. М., Мицель А. А. Лидарный метод дифференциального поглощения. Современное состояние исследований // Оптика атмосферы и океана. 1995. Т. 8. Вып. 8. С. 1136–1164.

Дата принятия: 18.10.2017.

535.417

Метод определения дефектов на внутренних стенках трубопровода по распределению скорости текущей жидкости

В. В. ДАВЫДОВ^{1,3}, С. В. КРУЖАЛОВ¹, Н. М. ГРЕБЕНИКОВА¹, К. Я. СМЕРНОВ²

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, Россия

³Всероссийский научно-исследовательский институт фитопатологии, районный центр Большие Вязёмы, Московская обл., Россия, e-mail: davydov_vadim66@mail.ru

Исследована структура потока жидкой среды в трубопроводе круглого сечения. Разработан метод определения дефектов внутренних стенок трубопровода с использованием рассеянного на частицах текущей жидкости лазерного излучения. Представлены результаты экспериментального определения профиля скоростей течения жидкости в сечении трубопровода по длине этого трубопровода. Предложена новая методика измерения координат точек, в которых располагается дефект, по длине и внутреннему диаметру трубопровода.

Ключевые слова: лазерное излучение, скорость течения жидкости, поток жидкой среды, фотоприёмник, доплеровский сдвиг частоты, спектр, дефект.

The article of structure investigation features for liquid medium stream in round section pipeline are considered. The new method for defects determination on the internal pipeline walls with the use of scattered laser radiation at flowing liquid particles was developed with considering of established features by us. The experimental investigation results of velocity profile changing of flowing liquid in pipeline cross-section along its length are presented. The article also presents the new method of coordinates points measuring at along the length and internal diameter of the pipeline, in which the defect is located.

Key words: laser light, the velocity of fluid flow, stream of fluid flow, photodetector, the Doppler shift frequency, spectrum, defect.

Исследования движения потоков жидкостей и суспензий – актуальные задачи прикладной физики [1–3]. Полученные результаты необходимы для разработки новых методов измерений физических величин потока жидкости, а также для ка-

либровки и совершенствования конструкций измерительных приборов [4–6]. В последнее время постоянно увеличивается номенклатура используемых жидких сред, расширяется диапазон расходов, в которых применяются данные среды для