

УДК 621.373.8:681.785

## БОРТОВОЙ ЛАЗЕРНЫЙ ГАЗОАНАЛИЗАТОР ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ УТЕЧЕК МЕТАНА ИЗ ГАЗОПРОВОДОВ

**В.П. Титарь, О.В. Шпаченко**

*Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, факультет РБЭКС.*

*пл. Свободы 4, Харьков, 61077, Украина*

*E-mail: [inhol@ukr.net](mailto:inhol@ukr.net)*

Поступила в редакцию 5 июня 2018 г.

Проведен анализ использования метода дифференциального поглощения для обнаружения фоновых концентраций метана. Предложен оптимальный способ реализации этого метода с использованием перестраиваемого He-Ne-лазера, излучающего на двух длинах волн (3,3922 и 3,3903 мкм). Разработана оптическая схема и конструкторская реализация бортового лазерного газоанализатора дифференциального поглощения. Создан действующий макет данного устройства и проведены его предварительные испытания, которые показали эффективность определения с его помощью концентраций метана в приземном слое атмосферы на уровне единиц ppm, что является необходимым и достаточным условием для обнаружения утечек газа из магистральных трубопроводов и газопроводов жилищно-коммунального хозяйства.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** дистанционный лазерный газоанализ, дифференциальное поглощение, He-Ne-лазер, метан

Проведено аналіз використання методу диференціального поглинання для виявлення фонових концентрацій метану. Запропоновано оптимальний спосіб реалізації цього методу з використанням перестроювального He-Ne-лазера, який випромінює на двох довжинах хвиль (3,3922 та 3,3903 мкм). Розроблено оптичну схему та конструкторську реалізацію бортового лазерного газоанализатора диференційного поглинання. Створено діючий макет цього пристрою та проведено його попередні випробування, які показали ефективність визначення за допомогою цього пристрою концентрацій метану в приземному шарі атмосфери на рівні одиниць ppm, що є необхідною та достатньою умовою для детектування витоків газу із магистральних трубопроводів та газопроводів житлово-комунального господарства.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** дистанційний лазерний газоанализ, диференційне поглинання, He-Ne-лазер, метан

An analysis of a differential absorption method for detecting background methane concentrations was carried out. An optimal method for implementing this approach based on a tunable He-Ne laser radiating at two wavelengths (3.3922 and 3.903  $\mu\text{m}$ ) is proposed. An optical scheme and design of the on-board laser gas analyzer has been developed. The test results have confirmed the high efficiency of determining methane concentrations in the atmospheric surface layer at the level of several ppm, which sufficient for detecting gas leaks from main pipelines and pipelines of the housing and utilities sector.

**KEY WORDS:** remote laser gas analyser, differential absorption, He-Ne laser, methane

### ВВЕДЕНИЕ

Дистанционные лазерные методы исследования атмосферы давно вышли за пределы исследовательских лабораторий и находят всё более широкое применение в народном хозяйстве. Стоящие на практике задачи диктуют выбор физических принципов и методов их конструкторской реализации в устройствах дистанционного лазерного зондирования. Ранее нами уже были разработаны несколько модификаций лидаров для экологического мониторинга приземного слоя атмосферы в условиях техногенных загрязнений окружающей среды [1-4]. Данная статья посвящена созданию мобильного лазерного газоанализатора для дистанционного определения малых концентраций метана с целью обнаружения утечек газа из газотранспортных систем.

Длительная эксплуатация газопроводных систем предъявляет повышенные требования безопасности к их техническому состоянию. Для безопасной эксплуатации газотранспортных систем необходимо регулярное патрулирование газопроводов с целью своевременного обнаружения утечек газа. Кроме того, периодический контроль и освидетельствование состояния газопроводов дают возможность продлевать ресурс их эксплуатации. На сегодняшний день диагностика является одним из основных инструментов обеспечения длительной и безаварийной эксплуатации газопроводов. При этом важной задачей при проведении обследования газопроводов является выбор методов исследования, позволяющих комплексно решать поставленные задачи.

Используемые в настоящее время методы контроля и поиска утечек транспортируемого газа, как визуальные, так и инструментальные, оказываются в большинстве случаев малоэффективными [5]. В этом случае представляется перспективным дистанционный метод обнаружения утечек природного газа посредством прибора, установленного на борту летательного аппарата. При этом к бортовому

газоанализатору предъявляется ряд требований: отсутствие помех в режиме транспортировки, экспрессность и производительность применяемой газоаналитической аппаратуры для возможности контроля магистралей большой протяженности. Чувствительность по газу должна быть на уровне долей естественного фона метана ( $\sim 10^{-5}$  % об. = 0.1 ppm). Кроме того, необходима высокая селективность анализа, так как состав почвенных газов, являющихся буферной средой при обследовании магистральных газопроводов, сильно варьируется по кислороду (от 1 до 20% об.) и углекислому газу (от 0.03 до 30% об.), что искажает показания таких детекторов, как плазменно-ионизационные или полупроводниковые.

Наиболее полно предъявляемым требованиям могут отвечать методы лазерного (лидарного) зондирования атмосферы, основанные на взаимодействии лазерного излучения с молекулами исследуемых газов. Преимуществами лидарного газоанализа являются: высокая селективность, минимальное время отклика, возможность дистанционных измерений, низкая стоимость эксплуатации и обслуживания. Тем не менее, задача детектирования фоновых концентраций метана до настоящего времени не нашла достаточно простого решения, позволяющего сделать такие измерения массовыми. Известные лазерные газоанализаторы [6-8] сложны и в техническом, и в эксплуатационном отношении.

Целью данной работы являлось создание действующего макета компактного, с высокими техническими показателями лазерного бортового газоанализатора, пригодного для непрерывного обнаружения утечек метана из магистральных газопроводов и выявления дефектов их линейной части.

В ходе проделанной работы был разработан и создан действующий макет бортового лазерного газоанализатора (лидара).

Бортовой лазерный газоанализатор предназначен для оперативного дистанционного обнаружения в реальном масштабе времени утечек газа из линейной части магистральных газопроводов и газопроводов жилищно-коммунального хозяйства при воздушном патрулировании. Созданный лидар может входить в штатный состав оборудования вертолетов различных типов и, помимо контроля за состоянием газотранспортных систем, может также найти широкое применение в геологоразведке для поиска залежей углеводородов по наличию фоновой составляющей метана.

Принцип действия разработанного лидара основан на измерении интенсивности рассеянного в обратном направлении лазерного излучения, отраженного от поверхности контролируемого участка магистральных газопроводов. В качестве физического принципа работы лидара был выбран метод дифференциального поглощения инфракрасного излучения в газовой среде.

### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ

Метод дифференциального поглощения основан на явлении резонансного поглощения лазерного излучения в пределах контура линии поглощения атмосферного газа. В основу метода заложено использование по крайней мере двух лазерных пучков на различных длинах волн, которые последовательно или одновременно посылаются вдоль одной и той же трассы в атмосфере. Первая длина волны расположена в центре линии поглощения, а вторая – на её крыле. При этом разница в используемых длинах волн должна быть небольшой (единицы нм), чтобы сечение аэрозольного рассеяния можно было считать одинаковым для обоих случаев. Тогда различие в интенсивности отражённых сигналов будет обусловлено в основном разницей в поглощении указанных длин волн зондирующего излучения молекулами исследуемого газа на атмосферной трассе.

Основная идея трассовых измерений методом дифференциального поглощения состоит в том, чтобы исключить из анализа долю сигнала, обусловленную рассеянием зондирующего излучения на неоднородностях среды и нерезонансным поглощением излучения [9,10]. Практически эта идея реализуется зондированием атмосферы излучением лазера, работающего в режиме последовательного переключения между двумя линиями излучения, на которых эффект резонансного поглощения загрязняющей примеси существенно различается. Тогда усредненная по трассе концентрация примеси  $C(L)$  вычисляется по следующей формуле [10]:

$$C(L) = \frac{1}{2L\Delta\sigma(\Delta\nu, L)} \ln \left[ \frac{P(\nu_1, L)P_0(\nu_0)}{P_0(\nu_1)P(\nu_0, L)} \right]. \quad (1)$$

Здесь

$$\overline{\Delta\sigma(\Delta\nu, L)} = \overline{\sigma(\nu_0, L)} - \overline{\sigma(\nu_1, L)}.$$

где  $\overline{\sigma(\nu_0, L)}, \overline{\sigma(\nu_1, L)}$  – сечение резонансного поглощения на частотах  $\nu_0$  и  $\nu_1$  соответственно (черта означает усреднение вдоль трассы),  $L$  – длина трассы,  $P_0(\nu_0), P_0(\nu_1)$  – излучаемая мощность лазера на частотах  $\nu_0$  и  $\nu_1$  соответственно,  $P(\nu_0, L), P(\nu_1, L)$  – регистрируемая мощность лазерного излучения, прошедшего трассу, на частотах  $\nu_0$  и  $\nu_1$  соответственно.

Множитель 2 в знаменателе правой части (1) говорит о том, что эта формула написана для двухпроходной схемы зондирования, а множитель  $\overline{\Delta\sigma(\Delta\nu, L)}$  описывает влияние всех примесей с учетом их неоднородного распределения вдоль трассы.

В методе дифференциального поглощения излучения предполагается, что для каждой примеси можно подобрать такую пару частот зондирующего излучения, на которых поглощение излучения существенно различается, а влияние других примесей незначительно (в принципе отсутствует). Для такой пары частот зондирующего излучения неизвестна нам величина  $\overline{\Delta\sigma(\Delta\nu, L)} \approx \Delta\sigma$ , где  $\Delta\sigma$  – дифференциальное сечение поглощения примеси на этих частотах, может быть измерено в лабораторных условиях.

Несмотря на кажущееся усложнение расчета результатов измерений, это дает возможность (из-за довольно простого математического аппарата обработки результатов измерений) получить более полную информацию о состоянии атмосферы. В принципе, идеальным результатом является зондирование атмосферы на всех возможных линиях генерации лазера.

В случае зондирования атмосферы излучением лазера на различных линиях будем иметь:

$$U_{\text{det}1} = AP_1 \exp[-2L(\alpha_0 + \alpha_i)] , \quad (2)$$

$$U_{\text{opor}1} = BP_1 \quad (3)$$

и соответственно

$$U_{\text{det}2} = AP_2 \exp[-2L\alpha_0] , \quad (4)$$

$$U_{\text{opor}2} = BP_2 , \quad (5)$$

где  $U_{\text{det}1,2}$  – сигнал, регистрируемый после прохождения трассы измерения, с соответственной длиной волны  $U_{\text{opor}1,2}$  – сигнал в опорном канале с соответственной длиной волны,  $\alpha_i$  – усредненный вдоль трассы коэффициент резонансного поглощения излучения конкретной примесью на частоте генерации ( $\alpha_i = n_i \cdot \sigma_i$ , где  $\sigma_i$  – сечение поглощения лазерного излучения данной молекулой примеси),  $\alpha_0$  – усредненный вдоль трассы коэффициент нерезонансного поглощения,  $A$  и  $B$  – коэффициенты, учитывающие аппаратные потери в измерительных трактах.

Имеется в виду, что:

$$\alpha_0(P_1) \cong \alpha_0(P_2) . \quad (6)$$

Введем безразмерные величины  $X$  и  $Y$

$$X = \frac{U_{\text{det}1}}{U_{\text{opor}1}} = \frac{A}{B} \exp[-2L(\alpha_0 + \alpha_i)] , \quad (7)$$

$$Y = \frac{U_{\text{det}2}}{U_{\text{opor}2}} = \frac{A}{B} \exp[-2L\alpha_0] . \quad (8)$$

Их соотношение равно

$$Z = \frac{X}{Y} = \exp[-2L\alpha_i] . \quad (9)$$

Коэффициент поглощения данной примеси на трассе

$$\alpha_i = -\frac{1}{2L} \ln Z , \quad (10)$$

а усредненное по трассе количество молекул примеси в единице объема равно

$$n_i = -\frac{1}{2L\sigma_i} \ln Z . \quad (11)$$

Таким образом, определение средних значений концентраций загрязняющих веществ в период, когда проводится запись на линиях зондирующего лазера, сводится к простому расчету с использованием полученных из записей отношений амплитуд сигнала лазера с учетом его мощности излучения на этих линиях. При этом необходимо знать величину сечения поглощения  $\sigma_i$  на частотах излучения используемого He-Ne-лазера.

### ОПТИМАЛЬНЫЙ ВЫБОР РАБОЧИХ ДЛИН ВОЛН ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО ЛАЗЕРНОГО ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ФОНОВЫХ КОНЦЕНТРАЦИЙ МЕТАНА МЕТОДОМ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ

С целью оптимального выбора пиков спектра поглощения метана нами был создан микрополигон для измерения спектров поглощения метана ( $\text{CH}_4$ ) и метана в смеси с атмосферными газами. Основными элементами полигона является газовая камера (рис. 1) и спектроанализатор МДФ-4 (рис. 2).

Исследования проводились следующим образом. В газовой камере (рис. 1) откачивался воздух. Затем она наполнялась под давлением вначале чистым метаном, после чего добавлялся ряд газов, который присутствует в атмосфере городской среды –  $\text{CO}$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_3$  и др.

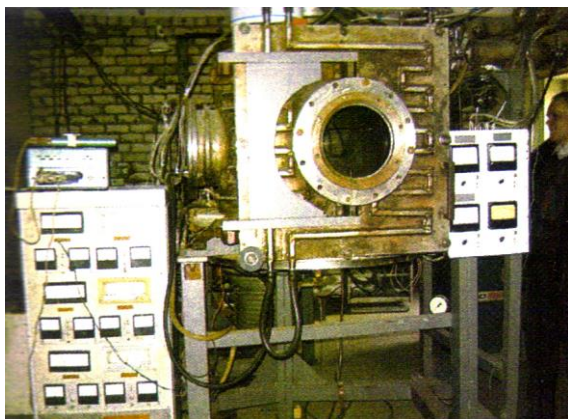


Рис. 1. Газовая камера для измерения спектров поглощения метана



Рис. 2. Спектроанализатор МДФ-4

На рис. 3 представлены спектры поглощения основных атмосферных газов в диапазоне 1 – 15 мкм. Метан имеет два хорошо выраженных пика поглощения в области 3,3 и 7,4 мкм. Наиболее интенсивным является пик на 3,3 мкм. Из сравнения со спектрами поглощения других атмосферных газов видно, что пик поглощения метана на 3,3 мкм не накладывается на спектры поглощения других газов. На рис. 4 представлен спектр поглощения метана с высоким разрешением. Из этого спектра видно, что линия поглощения расположена на 3,39 мкм.

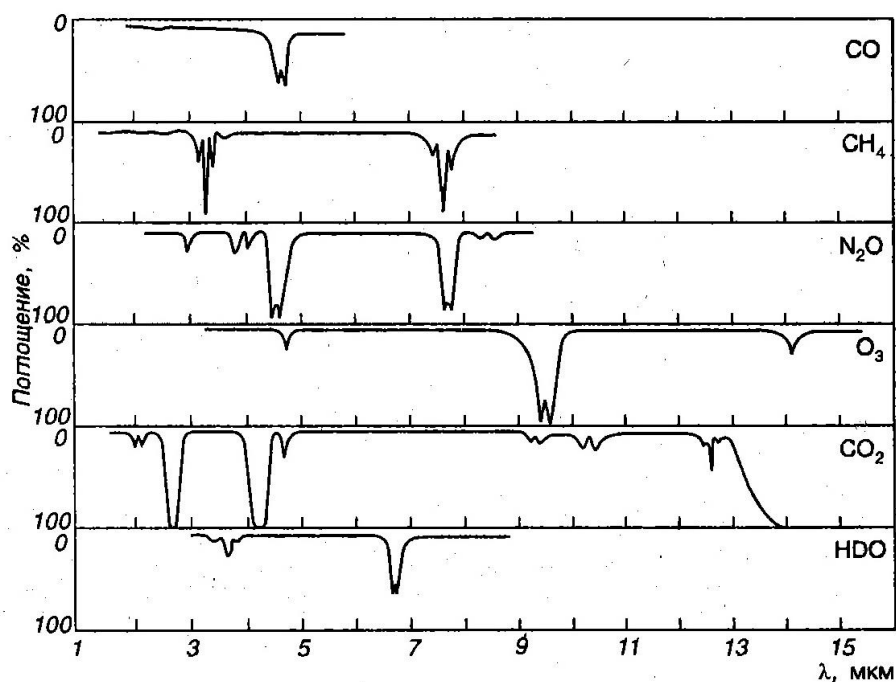


Рис. 3. Спектры поглощения основных атмосферных газов в диапазоне 1 – 15 мкм

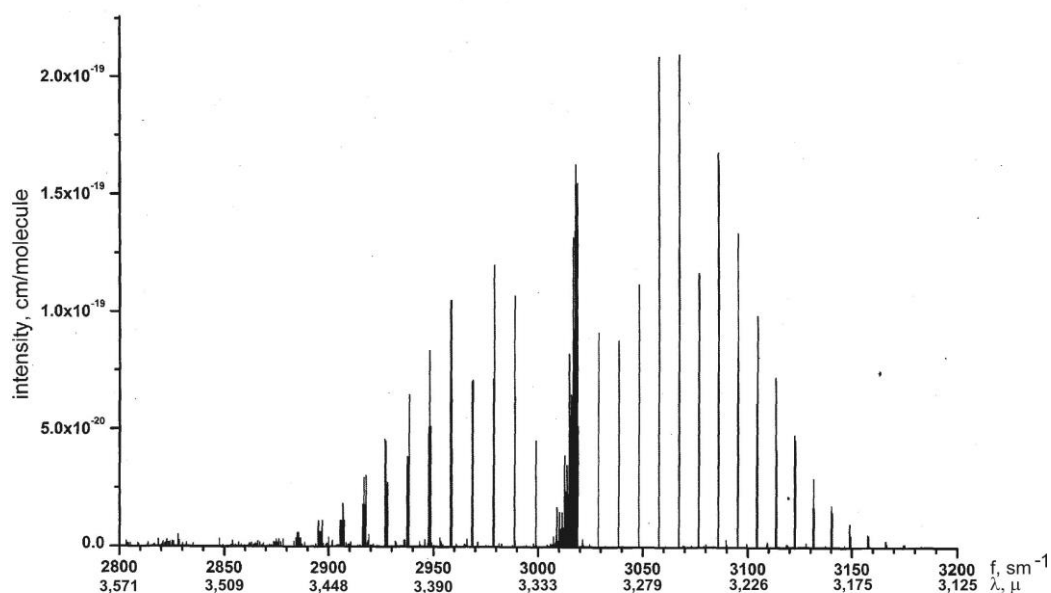


Рис. 4. Спектр поглощения метана с высоким разрешением

Для оптимального выбора рабочей длины волны необходимо также учитывать пропускание атмосферы и интенсивность солнечного излучения. Из представленного на рис. 5 спектра пропускания атмосферы видно, что длина волны 3,39 мкм, которая соответствует линии поглощения метана, попадает в окно прозрачности. В международной фотометрической системе положение окон прозрачности имеет стандартизацию, соответствующую длине волны ( $\lambda \pm \Delta\lambda$ ). В соответствии с этой стандартизацией длина волны 3,39 мкм попадает в L-диапазон окна прозрачности с длинами волн ( $3,6 \pm 0,45$ ) мкм [11].

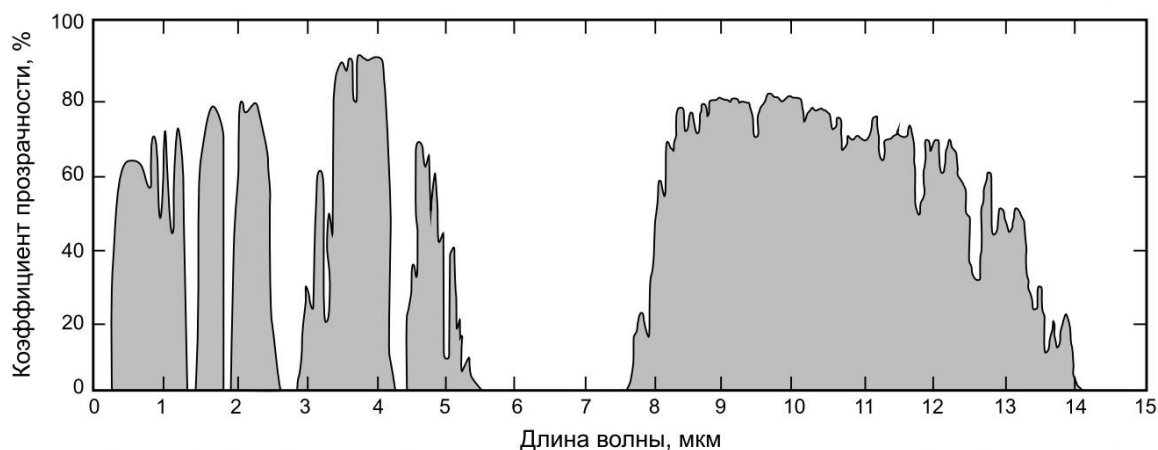


Рис. 5. Спектры пропускания атмосферы Земли [11]

На рис. 6 представлен спектр солнечного излучения, из которого видно, что интенсивность солнечного излучения в инфракрасном диапазоне на длинах волн 3,2 мкм  $<\lambda < 4,5$  мкм практически равна нулю, и, следовательно, измерение спектров поглощения метана на этой длине волны можно проводить в дневное время.

Проведенные исследования показали, что спектр поглощения метана при наличии сопутствующих атмосферных газов практически не меняется, уменьшаются только интенсивности пиков поглощения, примерно на 10 - 20% в зависимости от концентрации примесных газов.

С учетом этих данных был разработан и создан макет бортового лазерного газоанализатора, работающего на перестраиваемом He-Ne-лазере, излучающем на длинах волн  $\lambda=3.3922$  и  $3.3903$  мкм. Как видно из рис. 7, длина волны  $\lambda=3,392$  мкм попадает в полосу поглощения метана, а  $\lambda=3,3903$  находится за её пределами, что необходимо для использования метода дифференциального поглощения.

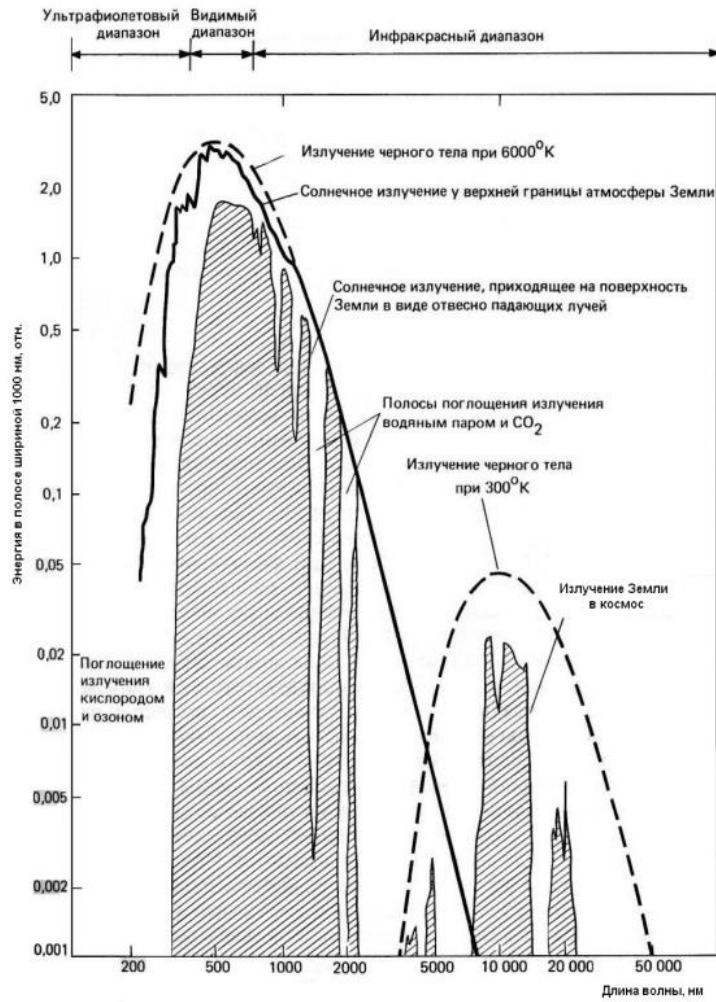


Рис. 6. Спектральное распределение энергии излучения Солнца на границе земной атмосферы, поверхности Земли и теплового излучения Земли [12]

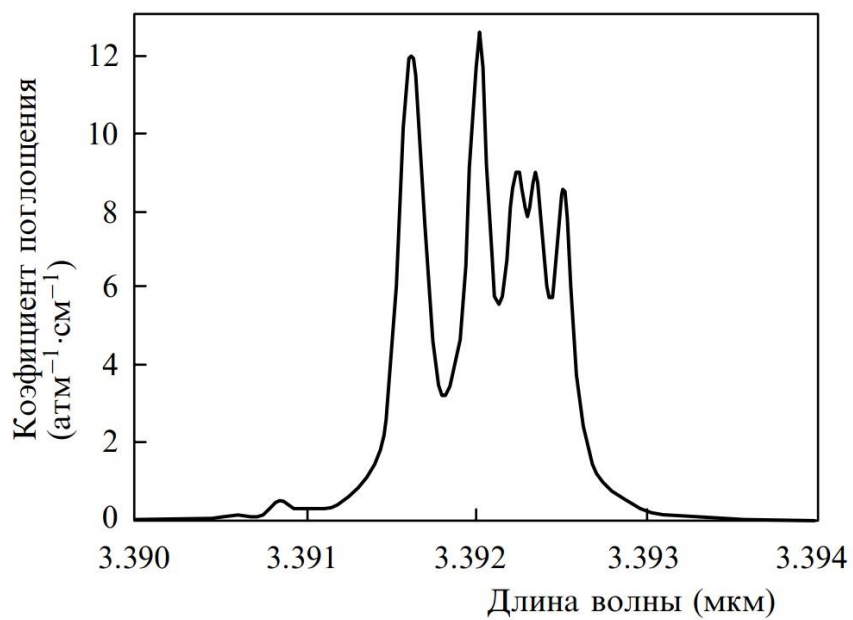


Рис. 7. Спектр поглощения метана в области генерации He-Ne-лазера [15]

В процессе лидарного зондирования атмосферы методом дифференциального поглощения измеряется ослабление излучения одной из наиболее сильных линий генерации He-Ne-лазера с длиной волны 3.3922 мкм (2947.9 см<sup>-1</sup>), которая практически совпадает с центральной частотой линии F1(2) перехода P(7) полосы V3 поглощения метана [13,14]. Ширина спектра генерации лазера во много раз меньше отдельных линий поглощения основных атмосферных газов, поэтому такое совпадение обеспечивает высокую чувствительность и селективность при лидарном детектировании фоновых концентраций метана.

### СТРУКТУРНАЯ СХЕМА И ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ БОРТОВОГО ЛАЗЕРНОГО ГАЗОАНАЛИЗАТОРА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ

Структурная схема приемо-передающей системы бортового лазерного газоанализатора и его общий вид представлены на рис. 8 и рис. 9 соответственно.

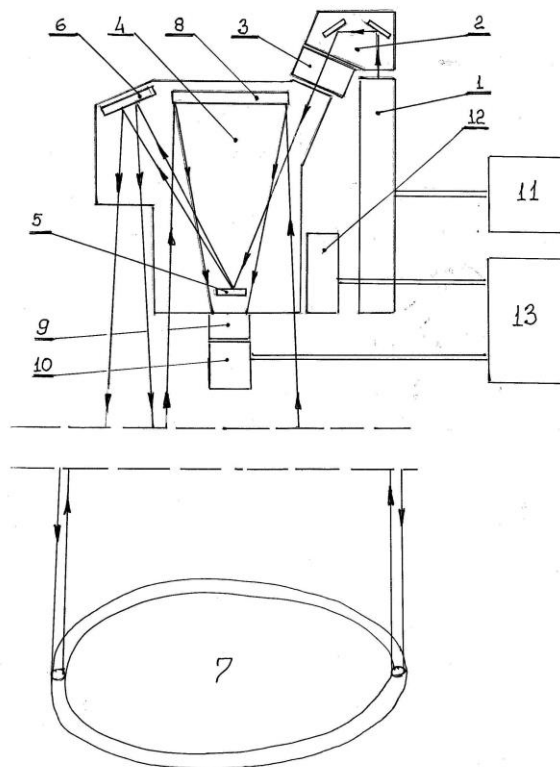


Рис. 8. Структурная схема приемо-передающей системы бортового лазерного газоанализатора

1- перестраиваемый He-Ne-лазер; 2 – системы поворотных диэлектрических зеркал; 3 – модулятор; 4 – телескопы для приема обратно рассеянного излучения; 5 – зеркало сканирующей системы; 6 – вспомогательное зеркало; 7 – участок сканируемой поверхности земли; 8 – фокусирующее зеркало; 9 – сканер; 10 – приемник излучения; 11 – блок питания лазера; 12 – видеокамера; 13 – компьютер.

Бортовой лазерный газоанализатор работает следующим образом. Излучение непрерывного He-Ne-лазера 1 на длинах волн  $\lambda=3,3922$  и  $3,3903$  мкм с помощью системы зеркал 2 направляется через модулятор 3 в телескоп 4 на зеркало сканирующей системы 5 и, отразившись от вспомогательного зеркала 6, через датчик угла поворота сканера уходит в атмосферу через окно.

Лазерный блок жестко закреплен на верхней плоскости телескопа с помощью специальных держателей. Корпус лазера выполнен из алюминиевого сплава. Его габаритные размеры: диаметр 64 мм, длина 780 мм. Внутренние поверхности покрыты светопоглощающей краской.

Механический модулятор 3 лазерного излучения представляет собой металлический диск с прецизионно расположенными отверстиями. Диск закреплен на оси двигателя. При вращении оси двигателя происходит модуляция лазерного луча, проходящего через отверстия в диске. Частота модуляции определяется скоростью вращения двигателя и количеством отверстий. Диапазон изменения частоты модуляции - от 0 до 5000 Гц.

Сканирующая система (см. фото на рис. 10) предназначена для развертки лазерного излучения в конус с углом сканирования  $\pm 3$  град и синхронного приема возвратного излучения от фокусирующего зеркала. Система состоит из плоского зеркала 5, на которое падает лазерный пучок и, отразившись,

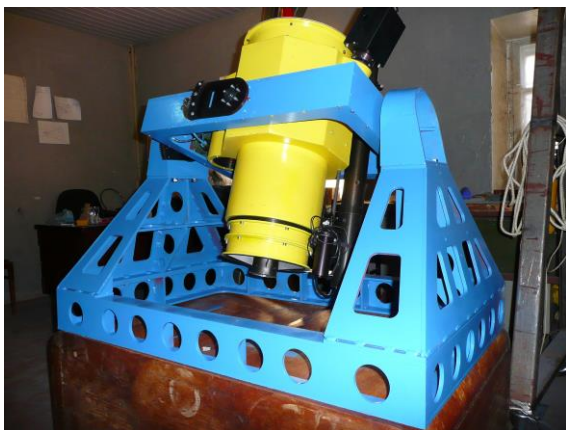


Рис. 9. Общий вид бортового газоанализатора



Рис. 10. Сканирующая система

создает при вращении световой конус. На периферии находится входная диафрагма для приема излучения. Через специальную перебрасывающую оптическую систему излучение передается от периферийной диафрагмы через полую ось вращения сканера 9 на приемник излучения 10.

Датчик угла поворота сканера представляет собой металлический диск с двумя секторами прецизионно расположенных между собой отверстий. Диск закреплен на оси сканера 10. Каждому сектору отверстий соответствует своя оптопара. Один оборот сканера соответствует четырем оборотам диска. Шаг датчика – 2,88 град., что соответствует 125-ти позициям на один оборот. Устройство управления двигателем сканера представляет собой электронную плату, задающую вращение сканирующего элемента со скоростью от 2 до 15 оборотов в секунду, что обеспечивает вращение зондирующего лазерного луча на исследуемой поверхности газопроводов с шагом сканирования до 0,8 м при скорости 100 км/ч.

Оптическая схема приемо-передающей системы представлена на рис. 11.

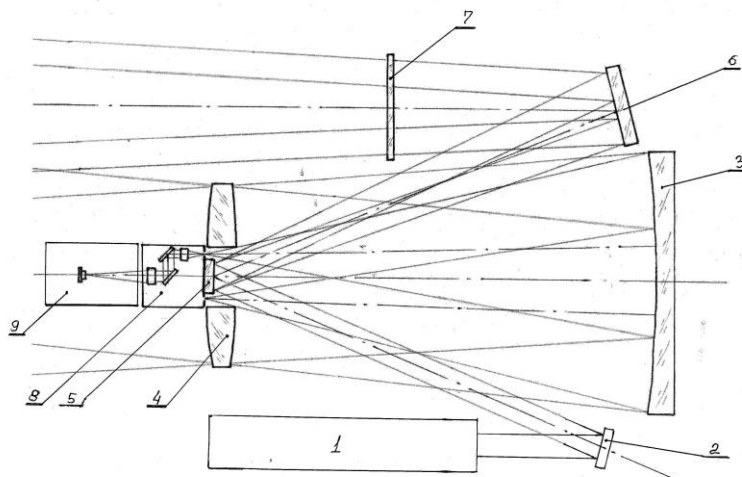


Рис. 11. Оптическая схема приемо-передающей системы

1 – лазер; 2,6 – диэлектрические зеркала; 3 – фокусирующее зеркало; 4 – оптический корректор; 5 – сканирующее зеркало; 7 – выходное окно; 8 – система переброски изображения; 9 – блок фотоприемника.

Излучение лазера, рассеянное от поверхности газопроводов в обратном направлении, поступает в апертуру телескопа и через систему зеркал и демодулятора поступает на фотоприемный блок 10.

Телескоп представляет собой объектив типа Слефогта – Ригтора. Корпус телескопа выполнен из стали. Внутренняя поверхность покрыта светопоглощающей краской. К корпусу телескопа крепятся фланцы, на которых он крепится в раме стабилизирующей платформы. На задней части корпуса закреплено фокусирующее зеркало в оправе. На передней части корпуса закреплены оправы корректора



и сканера с приемником излучения. В верхней части укреплен лазер с поворотными зеркалами и модулятором, с противоположной стороны корпуса - узел вспомогательного зеркала для направления лазерного излучения в выходное окно.

Фотоприемный блок предназначен для регистрации рассеянного поверхностью газопровода лазерного излучения с последующей передачей информации в систему регистрации и обработки сигнала. В фотоприемном блоке используется детекторный модуль HamamatsuP4631, предназначенный для регистрации сигналов в инфракрасной области спектра с максимумом 3,390 мкм. Фотодетектор преобразует световые сигналы в электрические (аналоговые) и усиливает их. В фотоприемный блок также входит предварительный усилитель, синхронный детектор и термостабилизатор. Все эти элементы смонтированы в одном небольшом металлическом корпусе.

Фотоприемный блок жестко присоединен к сканеру в передней (приемной) части телескопа. Корпус фотоприемника изготовлен из алюминия. Его габаритные размеры: диаметр 90 мм, длина 200 мм.

Для питания лазера, фотодетектора, модулятора и сканера используются источники питания.

Из фотоприемного блока сигналы далее поступают в аналого-цифровой преобразователь (АЦП), установленный в слот компьютера. АЦП преобразует аналоговые сигналы в цифровую форму и передает их в память компьютера для сохранения и дальнейшей обработки.

Все элементы приемо-передающей системы (лазерный блок, телескоп, сканирующая система, фотоприемный блок и датчик угла поворота сканера), смонтированы в единый блок, установленный в раму стабилизирующей платформы. Стабилизирующая платформа необходима для постоянного удержания лазерного спектрометра в горизонтальном положении при внезапных движениях летательного аппарата. Стабилизация позволяет использовать только те географические данные (значения по осям  $x$ ,  $y$  и  $z$ ), которые требуются для вычисления алгоритма управления движением лазера. Управление движением лазера осуществляется при помощи поворотной головки, подвижность которой, однако, ограничена максимально возможным углом поворота.

Стабилизирующая платформа обеспечивает компенсацию углов поворота летательных аппаратов по двум осям в диапазоне  $\pm 16$  град со скоростью 30 град/сек.

Управление процессом измерений осуществляется в интерактивном режиме с помощью «Программы для контроля измерений», а для анализа данных используется «Программа обработки данных».

Система обеспечивает визуализацию положения сканирующего пятна и контроль наличия метана в диагностируемом пространстве. Наличие метана отображается на мониторе в виде графика зависимости концентрации метана от углового положения пятна. Система визуализации работает с частотой 12 Гц.

Были проведены испытания созданного действующего макета бортового лазерного газоанализатора в полевых условиях. Испытания проводились в Кременчугском районе на краю карьера Полтавского горно-обогатительного комбината на высоте около 120 м над уровнем земной поверхности в карьере. Испытания показали хорошую работоспособность и пригодность созданной системы для обнаружения малых концентраций метана (единицы ppm) на расстояниях в несколько сотен метров.

## ВЫВОДЫ

Дистанционный лазерный метод определения фоновых концентраций метана является наиболее оптимальным способом оперативного обнаружения утечек газа из магистральных трубопроводов и газопроводов жилищно-коммунального хозяйства. Для реализации этого метода идеально подходит перестраиваемый He-Ne-лазер, одна из наиболее сильных линий генерации которого с длиной волны 3.3922 мкм (2947.9 см<sup>-1</sup>) практически совпадает с центральной частотой линии F1(2) перехода P(7) полосы V3 поглощения метана. Использование при зондировании атмосферы второй длины волны 3,3903 мкм, которая находится за пределами указанной полосы поглощения, позволяет использовать метод дифференциального поглощения для определения концентрации метана в местах расположения газопроводов. Проведенные предварительные исследования и анализ имеющихся в литературе данных показали, что выбранные рабочие длины волн располагаются в окне прозрачности атмосферы, а также попадают в спектральную область, где интенсивность солнечного излучения практически равна нулю, что позволяет проводить измерения в дневное время. Полевые испытания созданного действующего макета бортового лазерного газоанализатора показали возможность обнаружения малых концентраций метана на расстояниях в несколько сотен метров, что делает его пригодным для обнаружения утечек газа из магистральных трубопроводов и газопроводов жилищно-коммунального хозяйства.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Титарь В.П., Шпаченко О.В. Голографический лидар для экологического мониторинга атмосферы // Вісник Харківського національного університету ім. В.Н.Каразіна, серія «Радіофізика та електроніка». – 2001. – № 513. – Вип. 1. – С 151-160.

2. Титарь В.П., Шпаченко О.В. Поляризационные голографические методы лидарного контроля за состоянием атмосферы // Электромагнитные явления. 2001. Т. 2. № 1(5). – С. 111-117.
3. Titar V.P., Shpachenko O.V., Yartsev V.I. Mobile holographic lidar // Proceeding of 8th International Conference on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling (LFNM'2006), June 29 – July 1, 2006. – Kharkiv, 2006. – P. 187-190.
4. Титарь В.П., Шпаченко О.В., Ярцев В.И. Мобильный голографический лидар // Экология и здоровье человека. Охрана воздушного и водного бассейнов. Утилизация отходов. Сб. науч. статей 15-й Междунар. науч.-практ. конф., г.Щелкино, АР Крым, 4-8 июня 2007 г. – Харьков, 2007. – С. 254-258.
5. Чуприн В.Р., Гаськов Е.В., Майзель Д.И. Методы обнаружения утечек газа из магистральных трубопроводов // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. – 2012. – № 2 (3). – С. 123-127.
6. Патент № 51745 РФ, МПК G01N21/61 (2006/01) Локатор утечек газа «ЛУГ» / Плюснин И.И., Глуховцев А.А., Суханюк А.М., Демко А.И. – 2005128259/22, заявл. 09.09.2005, опубл. 27.02.2006, бюл. № 6/2006.
7. Патент № 107362 РФ, МПК G01N21/00 (2006.01) Лазерный локатор утечек газа / Табарин В.А. – 2011111839/28, заявл. 29.03.2011, опубл. 10.08.2011, бюл. № 22/2011.
8. Патент № 100268 РФ, МПК G01N21/00 (2006.01) Лазерный локатор для обнаружения газа / Салюков В.В., Глуховцев А.А., Конюхов Ю.А., Левченко А.В. – 2010136068. Заявл. 31.08.2010, опубл. 10.12.2010, бюл. № 34/2010.
9. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование: Пер. с англ. – М.: Мир, 1987. – 550 с.
10. Хргиан А.Х. Физика атмосферного озона. – Л.: Гидрометеиздат, 1973. – 290 с.
11. Смух С., Кочанов Ю., Петрошенко М., Соломицкий Д. Инфракрасные датчики длинноволнового диапазона на квантовых ямах компании IRnova // Компоненты и технологии. – 2014. – № 1. – С. 152-157.
12. Муртазов А.К. Космические воздействия на геосистемы. Учебное пособие. – Рязань: 2014. – 270 с.
13. Айрапетян В.С. Расчётные и дистанционно измеренные спектры поглощения полосы метана и их анализ // Вестник НГУ. Серия: Физика. – 2009. – Т. 4. – Вып. 3 – С. 25-29.
14. Багаев С.Н., Чеботаев В.П. Лазерные стандарты частоты. // Успехи физических наук. – 1986. – Т. 148. – Вып. 1. – С. 143-178.
15. Васильев Б.И., Маннун У.М. ИК лидары дифференциального поглощения для экологического мониторинга окружающей среды // Квантовая электроника. – 2006. – Т. 36. – № 9. – С. 801-820.