

ДИСТАНЦИОННЫЙ ГАЗОАНАЛИЗАТОР ДЛЯ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ УТЕЧЕК МЕТАНА БЕСПИЛОТНЫМИ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ

С.Н. Щербакова, А.С. Венгеров

МИРЭА - Российский технологический университет. Проспект Вернадского, д. 78, ЦФО, Москва, Российская Федерация, 119454
E-mail: Shcherbakova@mirea.ru

В данной статье рассматривается работа дистанционного газоанализатора, работающего по методу абсорбционной спектроскопии. Компактность разработанного устройства позволяет использовать его на бортах беспилотных летательных аппаратов.

Ключевые слова: абсорбционная спектроскопия, дистанционного газоанализатора

REMOTE GAS ANALYZER FOR DETECTING METHANE LEAKS BY UNMANNED AERIAL VEHICLES

S.N. Shcherbakova, A.S. Vengerov

MIREA - Russian Technological University, Vernadsky Av., 78, Moscow, Russian Federation, 119454
E-mail: Shcherbakova@mirea.ru

This article discusses the operation of a remote gas analyzer operating by the method of absorption spectroscopy. The compactness of the developed device allows it to be used on the boards of unmanned aerial vehicles.

Key words: absorption spectroscopy, remote gas analyzer

Для цитирования:

Щербакова С.Н., Венгеров А.С. Дистанционный газоанализатор для детектирования утечек метана беспилотными летательными аппаратами. *Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва)*. 2021. Т. LXV. № 4. С. 77–81

For citation:

Shcherbakova S.N., Vengerov A.S. Remote gas analyzer for detecting methane leaks by unmanned aerial vehicles. *Ros. Khim. Zh.* 2021. V. 65. N 4. P. 77–81

Абсорбционная спектроскопия, или спектроскопия поглощения – спектроскопический метод, при использовании которого измеряют поглощение излучения при прохождении через образец в зависимости от частоты или длины волны. Образец частично поглощает энергию, т.е. фотоны источника излучения. Интенсивность поглощения изменяется в зависимости от частоты, и такое изменение представляют в виде спектра поглощения.

Лазерные газоанализаторы, использующие абсорбционные свойства газов, обладают большей чувствительностью и быстродействием. Существует ряд таких приборов вертолетного базирования для детектирования утечек газа, в которых излучение лазера направляется на участок земли

вблизи газопровода, рассеянное излучение принимается, и по анализу получаемого с фотоприемника сигнала вычисляется средняя концентрация метана на оптическом пути от вертолета до земли [1].

На рис. 1 представлена функциональная схема дистанционного газоанализатора, работающего по методу абсорбционной спектроскопии.

Рассмотрим основные функциональные узлы схемы.

ИСТОЧНИК ДЕТЕКТИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Для детектирования утечек метана необходимо подобрать лазер, длина волны излучения которого, будет совпадать с одной из линий поглощения метана.

Также важным требованием является соответствие лазера I классу опасности, ведь эксплуатация газоанализатора подразумевает инспекцию и облучение потенциально взрывоопасных участков газопровода [2].

Источником детектирующего излучения стал InGaAg диодный лазер с мощностью 15 мВт, и длиной волны 1650 нм, где метан имеет ряд относительно сильных (с сечением 10-20 см²) и множество слабых линий поглощения.

Данный лазер удовлетворяет требованиям ГОСТ 31610.28-2017, и соответствует I классу опасности.

Несмотря на то, что поглощение метана в средней ИК области спектра (3,1 – 3,6 мкм) примерно в 100 раз больше, чем в ближней ИК области около 1,65 мкм, в газоанализаторе используются ДЛ ближнего ИК диапазона. Для этого существует несколько причин.

Прежде всего, чувствительность и уровень шумов, используемых в устройстве фотоприемников (типа InGaAs) в 100 раз лучше по сравнению с лучшими фотоприемниками из диапазона 3 – 4 мкм. Используемая в устройстве приемная система обеспечивает уровень шумов 2 пВт (при усреднении за 0,5 сек). Это дает возможность производить измерения при меньшем уровне мощности излучения лазера. В газоанализаторе используется ДЛ мощностью 15 мВт, при этом мощность излучения, попадающая на приемник в аналитическом канале, составляет примерно 15 нВт при коэффициенте рассеяния света около 0,25 (для песка, земли, травы, листвы) и при расстоянии до топографического объекта 50 м. Таким образом, минимальное измеряемое значение поглощения составляет $1,3 \cdot 10^{-4}$ [3].

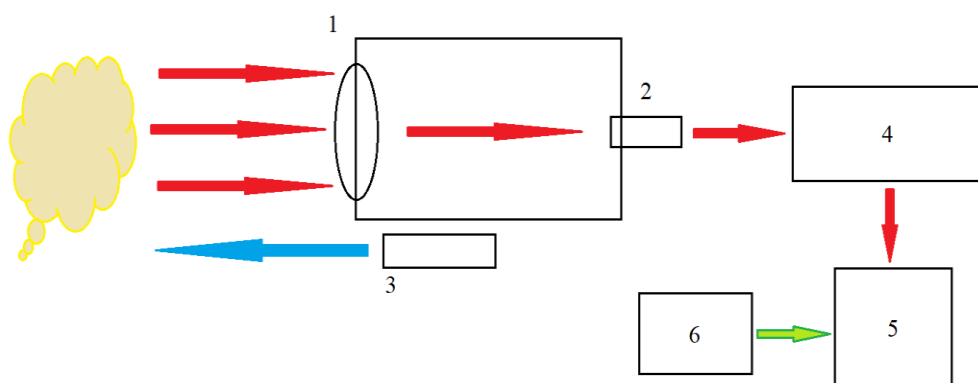


Рис. 1. Функциональная схема прибора

1 – собирающая линза, 2 – фотодиод, 3 – источник детектирующего излучения, 4 – плата обработки сигнала, 5 – одноплатный компьютер, 6 – GPS приемник

К достоинствам ДЛ ближнего ИК диапазона следует также отнести то, что они могут излучать как в непрерывном режиме, так и в импульсном вплоть до частот 10 МГц.

Энергетика лазерного излучения высчитывается по формуле

$$A = E \cdot t, \quad (1)$$

где $A=15 \cdot 10^{-6}$ Дж.

Для стабилизации температуры ДЛ используется термистор, находящийся в тепловом контакте с корпусом лазера. Он позволяет изменять температуру лазера, что приводит к изменению длины волны излучения лазера в диапазоне 1,642 – 1,656 мкм.

ДЛ в представляемом устройстве излучает в импульсном режиме с длительностью импульсов

1 мс с промежутком между импульсами 0,33 мс. Импульсы тока, питающие лазер, изображены на рис. 2 они имеют трапецевидную форму [4].

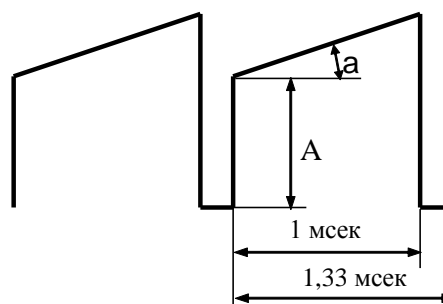


Рис. 2. Форма последовательности импульсов тока, управляющих излучением диодного лазера

Это дает возможность осуществить сканирование частоты излучения ДЛ, например, в окрестности линии метана R5 в диапазоне около 5 см^{-1} (по волновому числу). Спектр поглощения метана в диапазоне в окрестности длины волны $1,65\text{ мкм}$ показан на рис. 3, а детальный спектр в окрестности линии R5 – на рис. 4.

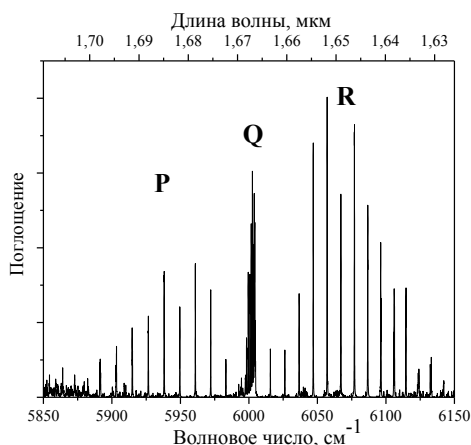


Рис. 3. Спектр поглощения метана в окрестности длины волны $1,65\text{ мкм}$

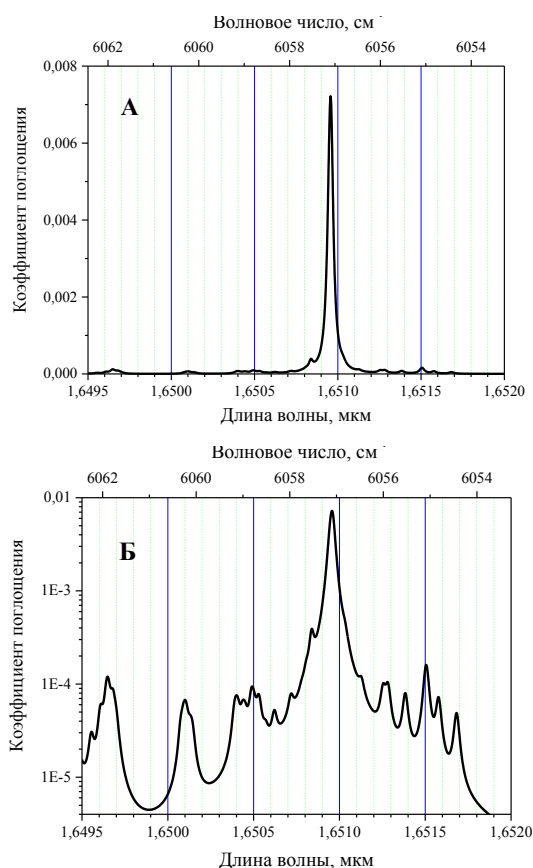


Рис. 4. Спектр поглощения метана в линейном (А) и в логарифмическом (Б) масштабе в окрестности линии R5 ($1,65095\text{ мкм}$), измеренный при следующих условиях: концентрация метана – фоновая в атмосфере, длина оптического пути – 100 м

Из рисунка видно, что кроме линии R5 в данном диапазоне находится множество слабых линий поглощения метана. Это дает возможность производить измерения одновременно не только по линии R5 (при относительно малых концентрациях метана), но также по слабым линиям метана при достаточно больших концентрациях, когда поглощение на линии R5 насыщается.

Максимальная концентрация метана в облаке утечки газа, которая может быть измерена по линии R5, составляет $0,04\%$. Более высокие значения концентраций (до 4%) измеряются одновременно при помощи слабой линии метана на длине волны $1,6501\text{ мкм}$. Таким образом, динамический диапазон измеряемых концентраций составляет 106 (при относительно медленных измерениях с усреднением за $0,5\text{ сек}$) и 105 (при быстрых измерениях за 50 мсек). Необходимый динамический диапазон (от фоновой до взрывоопасной концентрации) достигается в устройстве без дополнительной настройки параметров излучателя [5].

Описанный способ измерения позволяет помимо метана детектировать и другие летучие углеводороды, имеющие линии поглощения в диапазоне температурной перестройки длины волны излучения диодного лазера. При этом ряд газов, имеющих близкорасположенные линии поглощения в пределах токового сканирования длины волны излучения, могут детектироваться одновременно, в частности, это возможно для таких газов, как метан и этан.

Детектирование метана может производиться каждые $1,33\text{ мс}$ и по быстродействию заявляемое устройство существенно превосходит другие известные дистанционные газоанализаторы [1].

Непрерывные измерения с частотой 10 Гц позволяют детектировать утечки газа в режиме реального времени в процессе движения беспилотного летательного аппарата со скоростью до 100 км/ч [2].

Поскольку метод абсорбционной спектроскопии предполагает облучение зоны с потенциальной утечкой лазерным излучением, мы должны убедиться, что световое пятно не будет слишком мало, или велико.

При малом диаметре пятна есть шанс «пропустить» утечку, попросту не попав им в загазованную область.

При слишком же большом диаметре пятна, детектировать утечку газа проще, однако локализовать ее становится сложнее из-за большей площади.

Расходимость лазерного пучка высчитывается по формуле 2.

$$\alpha = 1,22 \lambda/d \quad (2)$$

При длине волны $\lambda=1650$ нм, и диаметре источника излучения $d=2$ мм, расходимость лазерного пучка относительно оси распространения равна $\alpha=0,001$ радиан, или $\alpha=0,057^\circ$

Диаметр светового пучка рассчитывается по формуле 3.

$$D=d+(2,44 \cdot L \cdot \lambda)/d \quad (3)$$

Таким образом, на расстоянии 100 м диаметр светового пучка будет равен 203,3мм.

Такой диаметр пятна позволяет с достаточной точностью локализовать место утечки. При этом, он не является слишком малым, чтобы пропустить загазованную область.

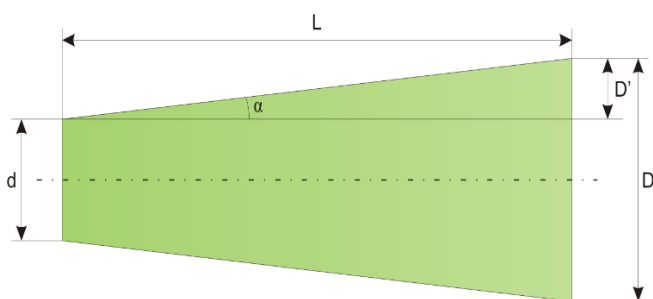


Рис. 5. Схема расходимости лазерного пучка

ПРИЕМНИК ДЕТЕКТИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ – ФОТОПРИЕМНИК

Для того, чтобы детектировать утечку, нам необходимо принять отраженное лазерное излучение.

Для этого подойдет фотодиод с высокой чувствительностью, и низким уровнем шумов, так как в газоанализаторе используется диодный лазер, мощностью 15 мВт. Фотоприемники типа InGaAs в 100 раз лучше по сравнению с лучшими фотоприемниками из диапазона 3 – 4 мкм. Такая приемная система обеспечивает уровень шумов 2 пВт (при усреднении за 0,5 с). Это дает возможность производить измерения при меньшем уровне мощности излучения лазера.

СОБИРАЮЩАЯ ЛИНЗА

Собирающая линза в системе необходима для того, чтобы принимаемое излучение попадало на фотоприемник.

Для фокусировки лазерного излучения на фотодиоде была использована собирающая линза с просветлением, подходящим под длину волны 1650 нм.

Световой диаметр линзы равен 50 мм, фокальный отрезок 97,75 мм, рабочий отрезок 85 мм.

ЦЕЛЕУКАЗАТЕЛЬНЫЙ ЛАЗЕР

Для удобства юстировки и эксплуатации прибора, в оптический блок был добавлен одномодовый лазерный модуль видимого (зеленого) диапазона с мощностью непрерывного излучения 5 мВт в спектральном диапазоне 532 нм, изготовленный на основе диодного лазера.

Малые напряжения питания (3В) и небольшие рабочие токи обеспечивают возможность его работы от автономных источников питания в течение длительного времени.

Данный лазер удовлетворяет требованиям ГОСТ 31610.28-2017, и соответствует I классу опасности.

БОРТОВАЯ КАМЕРА

Для более точной локализации найденной утечки в подвижную корзину, соосно оптическому блоку, была установлена бортовая камера.

С ее помощью, помимо координат места утечки, мы получим фото объекта, являющегося источником образовавшегося облака газа.

Такое решение сильно ускоряет нахождение источника утечки, а также упрощает ее ликвидацию.

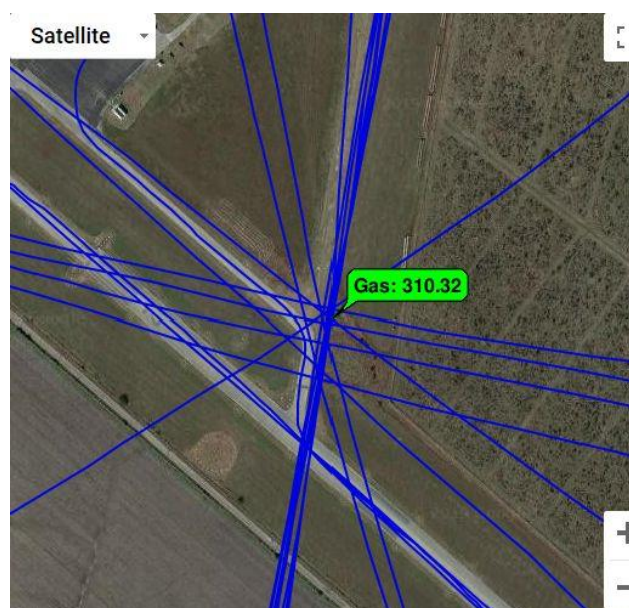


Рис. 6. Отображение места утечки на карте

КОРПУС

Поскольку газоанализатор разрабатывается для использования на борту беспилотных летательных аппаратов, он должен соответствовать следующим требованиям:

Вес прибора не должен превышать грузоподъемность беспилотного летательного аппарата

Чтобы исключить отклонение лазерного луча с инспектируемого маршрута при маневрировании, оптический блок прибора должен быть гиостабилизирован как минимум по одной оси.

При проектировании корпуса газоанализатора было принято решение изготовить часть деталей из алюминия марки Д16Т, чтобы обеспечить достаточную жесткость и прочность конструкции. Оставшуюся же часть деталей изготавливали из полиамида на 3d принтере методом порошкового спекания, для обеспечения минимального веса.



Рис. 7. Фотография места утечки, выполненная бортовой камерой

Метод спектроскопии поглощения позволил использовать на борту газоанализатора маломощный лазер, что сделало прибор безопасным в использовании, и позволило безопасно эксплуатировать его во взрывоопасной среде.

Также, метод спектроскопии поглощения позволяет использовать диодный лазер с длиной волны 1650 нм в импульсном режиме с высокой частотой, тем самым увеличивая быстродействие детектирующей системы, и позволяя проводить измерения на скорости до 100 км/ч.

Разработанный прибор весит всего 2,5 кг, в то время, как вертолетные приборы, работающие методом комбинационного рассеяния, весят до 300 кг.

Для эксплуатации прибора подойдут даже среднегабаритные беспилотные летательные аппараты.

Прибор успешно прошел полевые испытания, доказал свою работоспособность, показал очень хорошие результаты по дистанции детектирования, не показывал ложных срабаток.

Кроме того, дистанционный газоанализатор достаточно легко можно переоборудовать для детектирования иных веществ. Достаточно поменять длину волны источника излучения на ту, которая совпадет с линией поглощения требуемого вещества, при необходимости заменить фотоприемник на такой, который будет наиболее чувствителен к новой длине волны.

Экономическая целесообразность производства дистанционного газоанализатора для определения утечек метана беспилотными летательными аппаратами неоспорима, ведь за год только лишь на одной компрессорной станции в среднем потери газа достигают 1-1,2 млн м³. Такой объем газа эквивалентен примерно 13 мил. руб.

Также больше не придется тратиться на топливо для заправки инспекционного вертолета, ведь большинство беспилотных летательных аппаратов, способных нести на борту газоанализатор весом 2,5 кг, работают на электродвигателях, а не на двигателях внутреннего сгорания.

Для инспекций газопровода летательные аппараты обычно берутся в аренду, так как они крайне дороги. Беспилотный летательный аппарат же, стоит далеко не так дорого, и его вполне можно приобрести, чтобы каждый раз не брать в аренду.

ЛИТЕРАТУРА REFERENCES

1. Пат. 2679455 Российская Федерация, МПК G01N 21/61, F17D 5/02. Способ дистанционного измерения концентрации газов в атмосфере / О.В. Ершов, А.Г. Климов, С.М. Неверов; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью "Пергам Рисерч энд Девелопмент" № 2017142157; заявл. 04.12.2017; опубл. 11.02.2019. Ershov O.V., Klimov A.G., Neverov S.M., e.a. Sposob distantsionnogo izmereniya kontsentratsii gazov v atmosphere. [Method for remote measurement of the concentration of gases in the atmosphere]. Patent RF, N 2679455. 2002.
2. ГОСТ 31610.28-2017 (IEC 60079-28:2015) Взрывоопасные среды. Часть 28. Защита оборудования и передающих систем, использующих оптическое излучение. State Standard 28-2017 (IEC 60079-28:2015). Explosive atmospheres. Part 28. Protection of equipment and transmitting systems using optical radiation.
3. Система обнаружения метана в атмосферном воздухе технологических площадок компрессорных станций «ДЛС-Пергам Сельма», Паспорт 2019. Methane detection system in the atmospheric air of the technological sites of the compressor stations "DLS-Pergam Selma". 2019.
4. Дистанционный лазерный детектор метана «ДЛС-Пергам Сельма» Руководство по эксплуатации. 2019. User manual. Remote laser methane detector "DLS-Pergamon Selma". 2019.
5. ТУ 4215-145- 52398851-2013 ДЛС 2019. Echnical condition 4215-145- 52398851-2013 DLS.

Поступила в редакцию (Received) 01.08.2021

Принята к опубликованию (Accepted) 03.09.2021