

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ УТЕЧЕК МЕТАНА**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 работе проанализированы существующие методы детектирования утечек метана. Рассмотрены принципы действия инфракрасных камер, а также методы комбинированного рассеяния и абсорбционной спектроскопии.

Ключевые слова: абсорбционная спектроскопия

ANALYSIS OF METHODS FOR DETECTING METHANE LEAKS**S.N. Shcherbakova, A.S. Vengerov**

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

The article defines the existing methods for detecting methane leaks are analyzed. The principles of operation of infrared cameras, as well as methods of combined scattering and absorption spectroscopy are considered.

Key words: absorption spectroscopy

Для цитирования:

Щербакова С.Н., Венгеров А.С. Анализ методов детектирования утечек метана. *Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва)*. 2021. Т. LXV. № 4. С. 72–76

For citation:

Shcherbakova S.N., Vengerov A.S. Analysis of methods for detecting methane leaks. *Ros. Khim. Zh.* 2021. V. 65. N 4. P. 72–76

Детектирование утечек природного газа имеет очень большое значение для природы, безопасности жизни людей, газодобывающей промышленности, предприятий транспорта природного газа и других отраслей промышленности, так или иначе связанных с природным газом.

Метан – парниковый газ. По оценке Межправительственной группы экспертов по изменению климата ООН (IPCC), парниковая активность метана за последнее столетие стала в 28 раз больше, чем активность углекислого газа, а в 20-летней перспективе будет больше в 84 раза.

Парниковый газ – это газообразная составляющая воздушной оболочки Земли естественного или антропогенного происхождения, поглощающая и отражающая инфракрасное электромагнитное излучение. Увеличение концентрации таких

газов в атмосфере приводит к парниковому эффекту, что может стать причиной глобального потепления и экологической катастрофы.

Мировое сообщество в целом и правительство нашей страны в частности всерьез обеспокоено глобальным изменением климата, что выражается в регулярном ужесточении нормативов по выбросам вредных веществ в атмосферу.

В экологическом отношении, природный газ является самым чистым видом органического топлива. При его сгорании образуется значительно меньшее количество вредных веществ, по сравнению с другими видами топлива.

По независимой оценке Greenpeace, потери природного газа, связанные с его утечками, могут составлять до 10% на пути от места добычи до потребителя. Для газовой отрасли России – это около

50 млрд. м³ в год, а в денежном эквиваленте – свыше 30 млрд. рублей.

Множество различных типов приборов вертолетного или автомобильного (вездеходного) базирования непосредственно обследуют место утечки или место в непосредственной близости от утечки с некоторого расстояния (20 – 200 м). Эти приборы относятся к классу дистанционных и основаны на различных принципах действия. Можно выделить три типа приборов, различающихся по принципу действия.

ИНФРАКРАСНЫЕ (ИК) КАМЕРЫ

В качестве дистанционного детектора утечек газа используются различные Инфракрасные (ИК) камеры, установленные на борт вертолета. При этом способе детектирования получают инфракрасное изображение поверхности Земли и различных объектов вдоль трубопровода в течение полета вертолета.

Принцип действия данного способа детектирования основан на том, что при истечении газа из трубы (или другой емкости) с более высоким давлением в атмосферу через относительно небольшое отверстие, скорость потока газа оказывается достаточно высокой, что приводит к дроссельному эффекту и некоторая область пространства в окрестности утечки охлаждается. При расположении трубопровода на поверхности Земли утечка газа приведет к охлаждению некоторого участка трубы, а при подземном расположении – к охлаждению участка земли в окрестности утечки.

Величина разности температур ΔT при дроссельном эффекте пропорциональна разности давлений ΔP в трубе и в окружающей среде:

$$\Delta T = K \cdot \Delta P, \quad (1)$$

где K – константа, равная для метана 0,33 град/атм.

При давлении в магистральных газопроводах более 50 атм, максимальное охлаждение может достигать 20 град. Это приводит к уменьшению интенсивности теплового излучения охлажденных участков, что и может быть зарегистрировано ИК камерой. Однако величина охлаждения участков трубы или почвы в окрестности утечки существенно зависит также и от условий теплообмена. В частности, при наружном расположении утечки метана – материал трубы обладает достаточно высокой теплопроводностью, что приводит к «размыванию» места охлаждения на большое расстояние, в результате чего регистрируемый градиент температуры существенно уменьшается.

При подземном же расположении утечки охлаждению подвергается значительный объем

почвы, и охлаждение поверхностного слоя почвы значительно уменьшается. Приток энергии, уменьшающий градиент температуры, происходит не только за счет теплопроводности трубопровода и почвы, но и за счет конвекционных потоков и ветра в приземном слое атмосферы.

В результате максимальный регистрируемый градиент температуры в окрестности утечки оказывается ~ 10 град, а при незначительных утечках – менее 1 град. Чувствительность современных ИК камер менее 0,1 град, и, казалось бы, утечка газа легко может быть зарегистрирована. Однако при регистрации утечки ИК камерой существует множество внешних факторов, существенно уменьшающих точность и достоверность результатов. Во-первых, растительность (трава, кустарник, деревья), которые в первую очередь попадают в поле зрения ИК камеры, охлаждаются значительно меньше, чем почва. Во-вторых, получаемый результат по величине охлаждения существенно зависит от погодных условий (ветер, влажность, температура земли и воздуха) и от типа почвы. В-третьих, ИК изображение участка Земли зависит не только от теплового излучения данного участка, но и от рассеянного солнечного излучения, которое существенно различается в освещенных и затененных местах. Это приводит к значительному числу ложных результатов, а при увеличении порога срабатывания – к уменьшению чувствительности регистрации утечек.

Наблюдение окрестности трубопровода при помощи ИК камер относится к пассивному способу регистрации утечек. Гораздо эффективнее активные дистанционные способы регистрации, при которых, поверхность Земли зондируется различными источниками света и исследуется получаемый отклик. В качестве таких источников используются различные лазеры, излучение которых напрямую взаимодействует с молекулами газа (метана) и получаемый отклик зависит от концентрации газа [1].

МЕТОД КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ

Наибольшую достоверность регистрации утечек дают газоанализаторы, работающие по методу комбинационного рассеяния. Они включают в себя лазер, систему вывода лазерного излучения, приемный оптический тракт, фотоприемник, систему обработки и записи данных.

Принцип действия данных приборов основан на том, что лазерное излучение, взаимодействуя с молекулой, возбуждает ее электронную подсистему, которая в процессе релаксации излучает на собственных колебательных частотах. Это

излучение называется вынужденным комбинационным рассеянием и регистрируется приемной системой прибора.

Как правило, приемная система включает в себя спектрометр, дающий возможность регистрировать только вынужденное излучение метана. Таким образом, по интенсивности зарегистрированного излучения осуществляется прямое измерение количества молекул на оптическом пути от прибора до поверхности Земли.

Существенное достоинство данного метода заключается в том, что никакие внешние условия измерений не влияют на получаемые результаты. Но такой тип прибора также имеет недостатки, существенно ограничивающие его применение.

Во-первых, для комбинационного рассеяния света необходимы мощные коротковолновые (меньше 1 мкм) лазеры с мощностью до 3 кВт/см². Это требует достаточно громоздкой аппаратуры с высоким уровнем электропотребления, излучение такого лазера очень опасно для глаз. Такие лазеры, как правило, функционируют в импульсном режиме с относительно малой частотой повторения импульсов, что ограничивает быстродействие прибора.

Во-вторых, сечение комбинационного рассеяния относительно невелико и составляет для метана $\sim 10^{-29}$ см² (для сравнения - сечение поглощения света метаном в ближнем ИК диапазоне в центре линий поглощения $\sim 10^{-20}$ см², а в среднем ИК – 10^{-18} – 10^{-19} см²). В результате интенсивность комбинационного рассеяния относительно невелика, и даже при использовании громоздкой приемной системы чувствительность таких приборов относительно невелика.

АБСОРБЦИОННАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ

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].

Метод абсорбционной спектроскопии позволяет проводить измерения по всему электромагнитному спектру. Применяется для определения концентрации веществ в растворах. Обладает рядом ценных качеств: возможность одновременного получения качественных и количественных данных, большая информация о химической природе вещества, высокая скорость анализа, высокая чувствительность метода, возможность анализа веществ во всех агрегатных состояниях, возможность анализа смесей без их разделения на компоненты, возможность многократного использования пробы для повторного исследования, позволяет исследовать микроскопические объекты, возможность применения компьютеров для обработки данных [2].

Данный метод используется в промышленности для поиска утечек газов, например, метана.

Для детектирования метана традиционно используются гелий-неоновые лазеры, длина волны излучения которых 3,3922 мкм совпадает с центром одной из достаточно сильных линий Р7 поглощения метана. Однако излучение лазера только на одной длине волны недостаточно для получения достоверных результатов особенно в полевых условиях, так как ослабление излучения лазера может быть вызвано не только поглощением метана, а также многими другими факторами, прежде всего изменением коэффициента отражения света от разных топографических объектов в течение полета вертолета.

Более эффективен дифференциальный метод, в котором используется два гелий-неоновых лазера, излучающих на длинах волн 3,3922 мкм и 3,3912 мкм, причем поглощение метана на второй длине волны в 20 раз меньше, чем на первой. Оптическая схема вывода излучения в этих приборах сделана таким образом, что оба лазера освещают участок поверхности Земли поочередно с минимальной задержкой по времени.

При обработке принятого сигнала вычисляется разность амплитуд сигнала в промежутки времени, соответствующие излучению различных лазеров. Эта разность пропорциональна средней концентрации метана на длине оптического пути. Разница коэффициентов поглощения для двух длин волн, вызванная фоновой концентрацией метана в воздухе на длине оптического пути 100 м, составляет 15%. Такая разность сигналов достаточно

легко детектируется, и чувствительность, и точность измерений, казалось бы, должны быть достаточно высоки. Однако чувствительность и точность измерений ограничиваются другими факторами. Прежде всего, излучение лазеров в сторону поверхности Земли разнесены по времени, а коэффициент отражения света типичными топографическими объектами (песок, глина, трава, листва, снег) варьируется в пределах 15%. Поэтому для получения достаточной чувствительности и точности измерений необходимо уменьшать промежуток времени между излучениями различных лазеров до 1 мс и ниже, что усложняет оптическую систему вывода излучения.

Другой способ – расфокусировка выходного лазерного пучка для усреднения коэффициента отражения по большей площади, но при этом снижается точность определения места утечки.

Другой фактор ограничения точности измерений – несинхронные вариации мощностей излучения лазеров (дрейф и шум). Наиболее существенным недостатком таких приборов является крайне низкий динамический диапазон детектируемых концентраций. Превышение средней концентрации метана над фоновой всего в 10 раз приводит к уменьшению принимаемого сигнала на длине волны до нуля, и дифференциальный метод перестает работать.

Для того чтобы обойти эту проблему предлагается измерять поглощение только на длине волны 3,3912 мкм в случае зануления сигнала на длине волны 3,3922 мкм. Однако в этом случае получается недифференциальный метод измерений с указанными выше недостатками.

Также предлагается при насыщении поглощения на длине волны 3,3922 мкм делать повторные измерения в данном месте утечки после перестройки излучения одного из лазеров на другую длину волны с гораздо меньшим коэффициентом поглощения метаном. Это снижает оперативность измерений и усложняет конструкцию прибора. При этом динамический диапазон измеряемых концентраций увеличивается всего в 10 – 50 раз, а как было справедливо замечено, он должен быть не менее 10^5 . Следует также заметить, что общим недостатком приборов на гелий-неоновых лазерах являются ненадежность и ограниченный срок службы газовых лазеров в полевых условиях.

Существует другой тип лазерного газоанализатора, в котором используется импульсно-периодический твердотельный Nd:YAG лазер, излучающий на длине волны 1,06 мкм. Далее при помощи

нелинейного кристалла LiNbO_3 длина волны излучения перестраивается в диапазон 3,1 – 3,6 мкм, где метан имеет множество сильных и слабых линий поглощения. Конкретное значение длины волны задается углом поворота нелинейного кристалла, осуществляемого при помощи электромеханического блока, и блоком селекции длин волн.

Из-за относительно малого коэффициента нелинейного преобразования, для получения выходной мощности излучения, приемлемой для детектирования утечек метана, необходим мощный Nd:YAG лазер накачки. Поэтому лазер накачки является достаточно сложным техническим устройством, включающим в себя мощный блок питания, блок охлаждения, блок управления затвором внутри резонатора лазера для обеспечения режима генерации гигантских импульсов.

Для формирования дифференциального режима детектирования метана в приборе используется два лазера накачки и два блока нелинейного преобразователя длины волны, настраиваемых независимо на разные длины волн из диапазона 3,1 мкм – 3,6 мкм. Блок вывода излучения и блок временной задержки обеспечивают поочередное облучение поверхности Земли в окрестности трубопровода излучением на двух длинах волн. Далее, как и в газоанализаторах на гелий-неоновых лазерах, рассеянное излучение попадает в приемную систему прибора, и поглощение метана вычисляется из разности получаемых сигналов для двух разных длин волн.

По сравнению с детекторами метана на гелий-неоновых лазерах данный прибор имеет значительное преимущество в том, что две длины волны излучения могут быть выбраны любыми из диапазона 3,1 – 3,6 мкм при помощи электромеханического блока перестройки длины волны и специального блока калибровки. Таким образом существенно увеличивается динамический диапазон измеряемых концентраций, который достигает необходимой величины $5 \cdot 10^5$ (от уровня фоновой концентрации метана до взрывоопасной). Кроме того, возникает возможность детектирования не только метана, но и других углеводородов (этан, пропан, бутан), которые имеют линии поглощения в диапазоне перестройки частоты. Это позволяет детектировать не только утечки из газопроводов с природным газом, но также и утечки из других продуктопроводов, в частности ШФЛУ (широких фракций легких углеводородов). Кроме того, прибор оборудован специальной системой пространственного сканирования для зондирования относительно широкой полосы поверхности Земли в течение полета вертолета.

Проведя сравнительный анализ, можно сделать вывод о том, что детектирование утечек метана методом абсорбционной спектроскопии является наиболее удобным. Кроме того, данный метод наиболее универсальный, и позволяет детектировать утечки не только метана, но и других газов, путем изменения длины волны сканирующего излучения на такую, которая будет соответствовать линии поглощения этого газа.

Также, он дает возможность одновременного получения качественных и количественных данных о газовой смеси. Высокая скорость анализа, высокая чувствительность метода, возможность анализа веществ во всех агрегатных состояниях, возможность анализа смесей без их разделения на компоненты, возможность многократного использования пробы для повторного исследования, несомненно, являются значительными преимуществами по отношению к другим методам детектирования.

Дистанционный газоанализатор, работающий методом абсорбционной спектроскопии до-

статочно компактен, что делает возможным использование его на бортах беспилотных летательных аппаратов, тем самым удешевляя затраты на проведение инспекций участков газопровода.

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. 18.12.2000; опубл. 20.08.2002. 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. Электронный ресурс. URL: https://www.pergam.ru/catalog/gas_leaks/dls-ks/dls-ks-mini-ir.htm (дата обращения 13.12.2020). Techeiskatel' metana DLS-KS (Methane leak detector DLS-KS) Available as: https://www.pergam.ru/catalog/gas_leaks/dls-ks/dls-ks-mini-ir.htm.

Поступила в редакцию (Received) 01.08.2021

Принята к опубликованию (Accepted) 03.09.2021