

**Семнадцатая Международная научно-техническая конференция
«Оптические методы исследования потоков»
Москва, 26–30 июня 2023 г.**

УДК 535.342

Кириякова А.Ю.^{1,2,3}, Шерстов И.В.^{1,2}, Бойко А.А.^{1,2}, Костюкова Н.Ю.^{1,2,3}, Ерушин Е.Ю.^{1,2,3}

¹ Новосибирский государственный университет «НГУ», Россия,
630090, Новосибирск, Пирогова ул., 2, E-mail: a.boiko@nsu.ru

² Институт лазерной физики «ИЛФ» СО РАН, Россия,
630090, Новосибирск, Академика Лаврентьева пр., 15б, E-mail: baa.nsk@gmail.com

³ Новосибирский государственный технический университет «НГТУ», Россия,
630073, Новосибирск, К. Маркса пр., 20

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕИСКАТЕЛЕЙ МЕТАНА НА ОСНОВЕ АБСОРБЦИОННОЙ И ОПТИКО-АКУСТИЧЕСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ДИОДНЫХ МАТРИЦ И КВАНТОВО-КАСКАДНЫХ ЛАЗЕРОВ

АННОТАЦИЯ

В работе рассмотрены абсорбционный и оптико-акустический методы детектирования метана. Разработан сенсор метана на основе абсорбционной спектроскопии. В качестве источника излучения использовались светодиодные матрицы с длиной волны $\sim 3,3$ мкм, где расположена одна из линий поглощения метана, и пороговой чувствительностью около 60 pppt CH_4 . Второй течеискатель построен на принципе оптико-акустической спектроскопии на основе квантово-каскадного лазера (ККЛ) и резонансного дифференциального оптико-акустического детектора (ОАД). Лазер работает в импульсно-периодическом режиме на длине волны $\sim 7,7$ мкм, где расположена сильная полоса поглощения метана. Частота повторения импульсов излучения составляла ~ 1750 Гц. Минимальный фоновый сигнал сенсора (в азоте) равен $\sim 40 \dots 60$ ppb CH_4 .

**АБСОРБЦИОННАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ, ОПТИКО-АКУСТИЧЕСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ,
ТЕЧЕИСКАТЕЛЬ, ГАЗОАНАЛИЗ, МЕТАН, КВАНТОВО-КАСКАДНЫЙ ЛАЗЕР**

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время активно развиваются технологии создания малогабаритных устройств течеискателей метана для поиска утечек газов и замеров их концентраций [1-3]. Это связано с тем, что метан является одним из газовых маркеров для экологических исследований и промышленного мониторинга. Метан не имеет цвета и запаха, в два раза легче воздуха, мало растворим в воде, взрывоопасен при концентрации в воздухе от 5% до 15% [4]. В природе метан составляет основную долю в добываемом из газовых и газоконденсатных месторождений природного газа, около 87%. Основными источниками выбросов метана является сельскохозяйственная деятельность, утечки газопроводов и утечки шахтного метана. Рост концентрации метана в атмосфере имеет большое воздействие на изменение климата [5].

При проведении геологической разведки с целью обнаружения потенциальных месторождений нефти и природного газа для проведения измерения концентрации метана в приземном слое атмосферы над обширными территориями в режиме реального времени актуальной становится задача построения высокочувствительного сенсора метана с малыми габаритами, массой и энергопотреблением для установки на беспилотный летательный

аппарат (БПЛА). Основным параметром пригодности такого сенсора метана является его пороговая чувствительность, которая должна обеспечивать уверенную регистрацию средней фоновой концентрации метана в воздухе ($\sim 1,9$ ppm) с соотношением (сигнал/шум) ≈ 10 и лучше.

Одним из методов детектирования и определения концентрации различных газовых примесей является абсорбционный метод оптического газоанализа [2, 6, 7]. Он осуществляется за счет измерения уровня поглощения излучения при прохождении через анализируемую газовую среду. Изменение уровня мощности фиксируется фотоприемником после прохождения через оптический тракт с газовой смесью. В оптическом тракте происходит поглощение света, за счет чего на фотоприемник приходит меньшая мощность лазерного излучения.

Несмотря на ранее предложенные системы для детектирования метана абсорбционным методом с использованием светодиодов [8-10], не было разработано компактных и стабилизированных по температуре систем пригодных для использования на БПЛА. В данной работе использовалась светодиодная матрица, которая обеспечивает большую интенсивность излучения по сравнению со светодиодами. Использование температурной стабилизации матрицы и фотодиода позволило гарантировать стабильность системы вне зависимости от температуры окружающей среды.

Альтернативным подходом для детекции газовых смесей является лазерная оптико-акустическая спектроскопия (ЛОАС) [11, 12]. При совпадении частоты ИК-излучения с частотой линии поглощения анализируемого газа происходит взаимодействие молекул газа с излучением. Поглощенная энергия преобразуется в тепловую, при этом возникают акустические колебания, которые регистрируются с помощью микрофона. Интенсивность акустических колебаний в детекторе пропорциональна концентрации поглощающего вещества.

ТЕЧЕЙСКАТЕЛЬ МЕТАНА НА ОСНОВЕ СВЕТОДИОДНЫХ МАТРИЦ

Постановка задачи заключалась в создании малогабаритного недорогого сенсора метана с чувствительностью не хуже, чем 100 ppm. Для решения поставленной задачи по совокупности параметров были выбраны свето- и фотодиоды российского производства компании ООО «ЛЕД Микросенсор НТ». У компании ООО «ЛЕД Микросенсор НТ» имеется готовый модуль, состоящий из источника и приёмника света для детекции высоких концентраций метана начиная от 1000 ppm и выше. Для увеличения интенсивности излучения была выбрана модель светодиодной четырёхэлементной матрицы Lms34LED-4M-TEM-R. Данный прибор обладал встроенным отражателем на задней стенке, а также матрица была установлена на элемент Пельтье. В качестве приёмника был выбран фотодиод Lms36PD-05-TEM-R в аналогичном варианте исполнения. Общая схема прибора показана на рис. 1, габариты газовой кюветы 152,2×36×41,5 мм. Между источником и приёмником был установлен полосовой фильтр, спектр пропускания которого показан на рис. 5. Общие параметры светодиодной матрицы показаны в табл. 1 [13]. Как показано на рис. 3, спектральная ширина линии достаточно велика и зависит от температуры светодиода. Необходимость установки фильтра обусловлена наличием излучения в области 2,5-2,8 мкм, где расположены сильные линии воды. Система сбора и анализа данных включала в себя стандартный драйвер D-51 и синхронный детектор SDM также от компании ООО «ЛЕД Микросенсор НТ». Для контроля и поддержания температуры источника и приемника на заданном уровне нами были разработаны контроллеры.

На рис. 2 представлен спектр поглощения метана, записанный нами с помощью спектрометра на основе широко перестраиваемого параметрического генератора света и ЛОАС [14]. На длине волны ~ 3319 нм наблюдается узкий интенсивный пик поглощения.

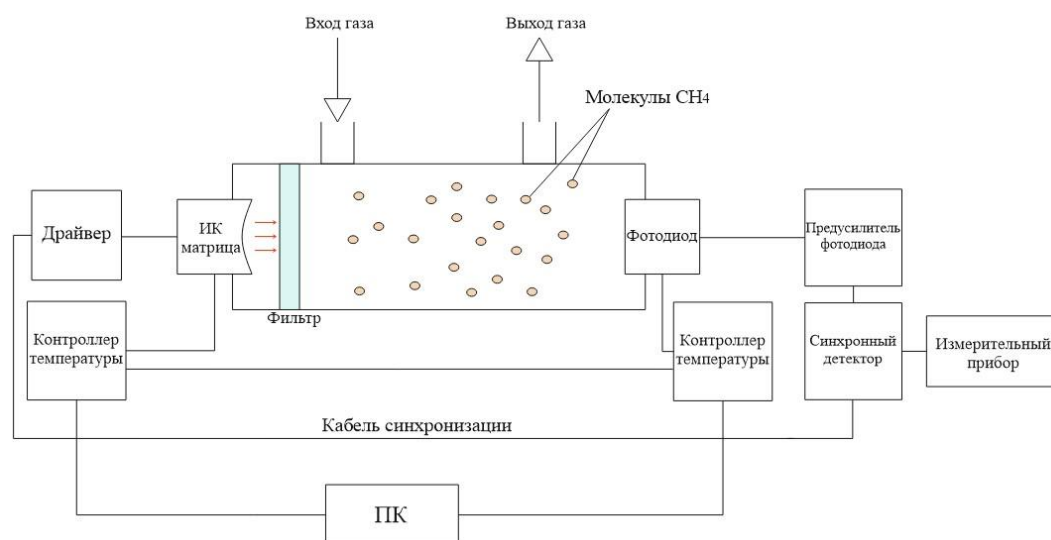


Рис. 1. Принципиальная схема течеискателя метана на основе светодиодных матриц

Табл. 1. Основные параметры матрицы Lms34LED-4M-TEM-R

Параметр	Значения	Ед. измерения
Максимальная длина волны излучения	3300-3440	нм
Полуширина спектра	250-600	нм
Оптическая мощность	500-700	мкВт
Максимальный рабочий ток	2	А
Температура работы/хранения	-60...+90	°С
Корпус	ТО-5 со встроенным термоэлектрическим модулем и параболический рефлектором с сапфировым стеклом	

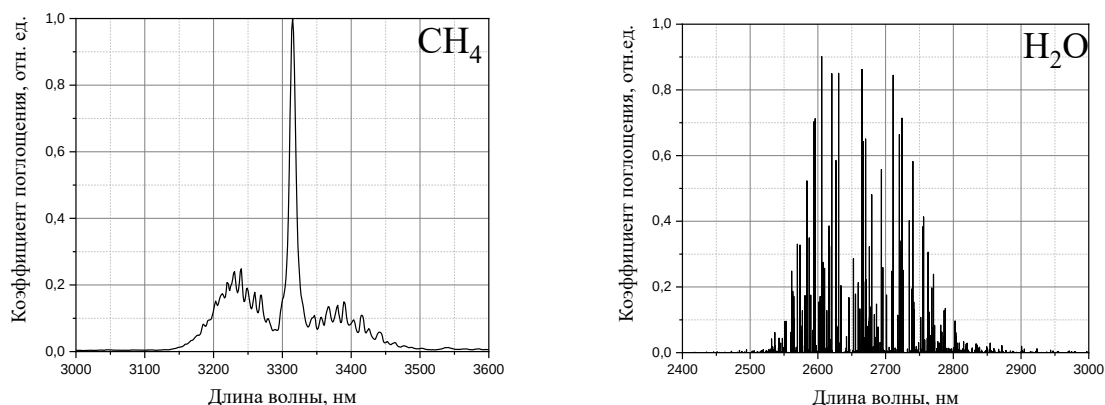


Рис. 2. Спектры поглощения метана (слева) и воды (справа)

Как показано на рис. 3, с увеличением температуры спектр излучения светодиодной матрицы смещается в длинноволновую область и интенсивность излучения уменьшается. Фиксированная температура матрицы позволяет гарантировать стабильность спектра, и совместить максимальную интенсивность излучения матрицы с максимумом линии поглощения метана. Основные параметры и характеристики фотодиода приведены в табл. 2 [13].

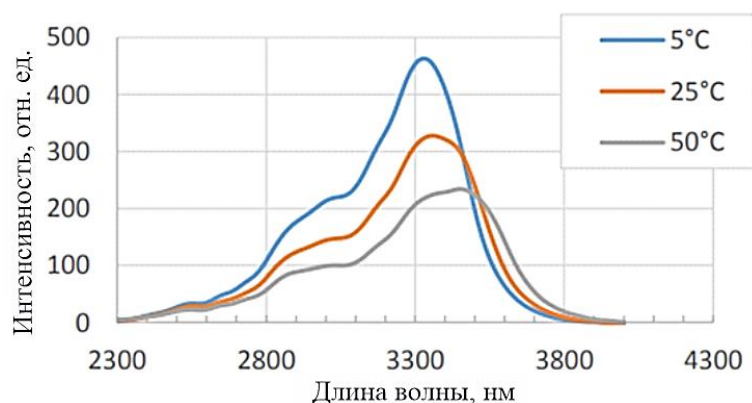


Рис. 3. Зависимость интенсивности излучения матрицы от температуры

Табл. 2. Основные параметры фотодиода Lms36PD-05-ТЕМ-R

Параметр	Условия	Значения	Ед. измерения
Диапазон максимальной чувствительности	На уровне 80%	2200-3400	нм
Темновой ток	0,1 В (при 23°C)	197	мкА
Темновое сопротивление	10 мВ (при 23°C)	0,46	кОм
Эквивалентная мощность шума	$\lambda=3,3$ мкм (при 23°C)	$5 \cdot 10^{-12}$	Вт/Гц ^{1/2}
Обнаружительная способность	$\lambda=3,3$ мкм (при 23°C)	$8,5 \cdot 10^9$	см·Гц ^{1/2} /Вт
Размер чувствительной площадки	-	0,5	мм
Температура работы/хранения	-	+5...+90	°C
Корпус	ТО-5 со встроенным термоэлектрическим модулем и параболический рефлектором с кварцевым стеклом		

Как видно из табл. 2 приемный фотодиод обладает максимальной чувствительности в спектральной области 2,2-3,4 мкм. В эту область попадают также спектры поглощения других газов. Зависимость чувствительности фотодиода от длины волны представлена на рис. 4.

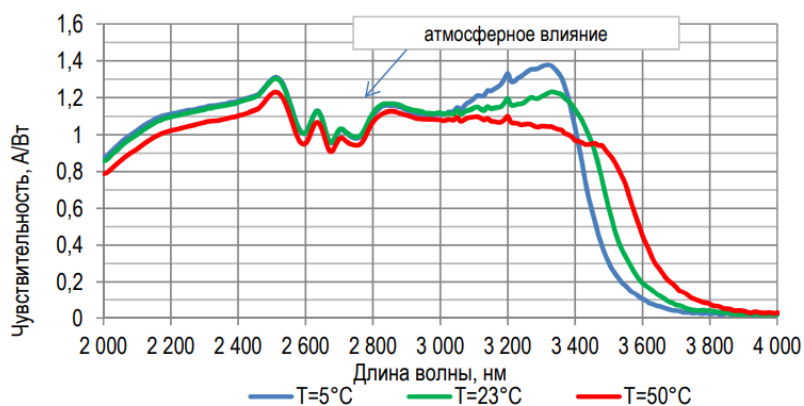


Рис. 4. Зависимость чувствительности фотодиода от длины волны

Как видно из представленной на рис. 4 зависимости, в диапазон чувствительности фотодиода попадает атмосферное влияние – поглощение воды, которое газоанализатор может определить как ложную концентрацию метана. Спектр поглощения паров воды из спектральной базы данных HITRAN [15] представлен на рис. 2 справа.

Для предотвращения влияния паров воды на детектор в схему устанавливается полосовой фильтр. Полосовой многослойный фильтр имеет центральную длину волны полосы пропускания 3250 нм. Спектр пропускания фильтра и спектр поглощения метана представлены на рис. 5. Фильтр пропускает длины волн 3250 ± 300 нм, что позволяет сократить рабочий диапазон свето-фото диодов от 3,0 до 3,4 мкм и заметно снизить влияние паров воды.

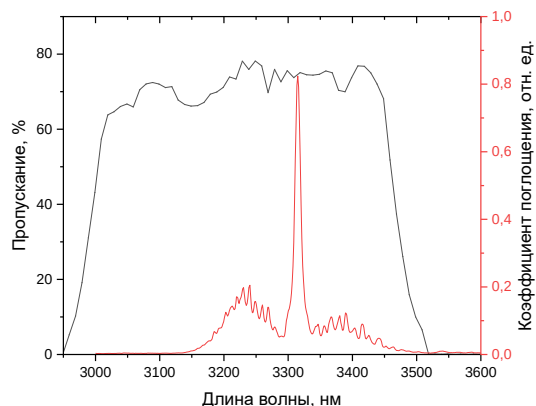


Рис. 5. Спектр пропускания фильтра и спектр поглощения метана

Драйвер управления работой светодиодной матрицы работает в импульсном режиме, для получения максимальной мощности излучения светодиода выставлена частота 16 кГц. Предусилитель предназначен для преобразования и усиления сигнала переменного тока ИК фотодиодов. Предусилитель обеспечивает работу фотодиода в фотогальваническом режиме. При таком режиме фотодиод является источником фототока, который усиливается и преобразуется в сигнал напряжения, при этом форма результирующего сигнала напряжения соответствует форме сигнала фототока [13].

Стабилизация температуры свето- и фотодиода осуществляется с помощью ПИД-регулятора с контроллером и программным обеспечением, позволяющий стабилизировать температуру в диапазоне от 0°C до 40°C.

Методика измерения

Продувка детектора осуществляется через штуцер. С помощью сжатого азота происходит продувка и калибровка детектора. При наличии метана в оптической ячейке происходит ослабление сигнала согласно закону Бугера-Ламберта-Бера

$$I = I_0 e^{-\alpha CL}, \quad (1)$$

где I – измеряемая интенсивность излучения; I_0 – интенсивность падающего излучения; C – концентрация метана; α – коэффициент поглощения для единичной концентрации; L – длина оптического пути.

При помощи фотодиода происходит регистрация падения уровня сигнала, пропорционального поглощённой газом световой энергии. Посредством калибровки детектора аттестованными газовыми смесями с известной концентрацией метана, делается вывод об измеряемых величинах концентраций.

Результаты проведенного исследования

В ходе экспериментов были подобраны оптимальные параметры работы системы, установленные на драйвере: длительность импульсов 20 мкс. Выбор указанной длительности обусловлен тем фактом, что чем больше длительность импульса, тем больше интенсивность

излучения в данной системе. Частота повторения импульсов 16 кГц, так как это повышает уровень средней мощности. Ток питания матрицы 0,2 А, это максимально возможный ток работы, указанный производителем.

На рис. 6 показаны данные проведенного исследования влияния температуры свето- и фотодиодов на величину выходного с усилителя сигнала. С увеличением температуры наблюдается уменьшение сигнала.

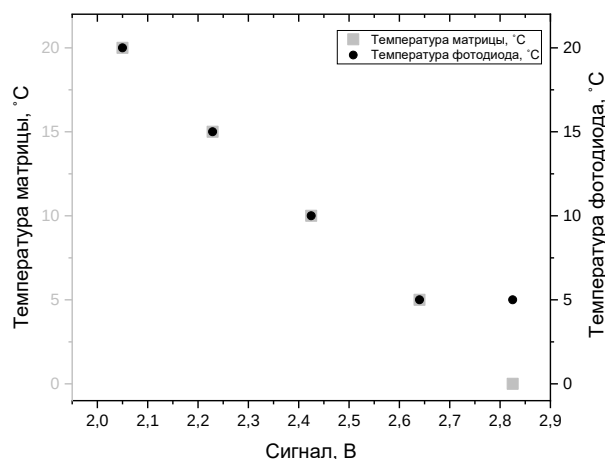


Рис. 6. Зависимость уровня выходного сигнала от температуры, установленных на свето- и фотодиоде

В эксперименте использовались несколько газовых смесей метана в азоте, следующих концентраций: 1%, 0,1%, 0,05% 0,01%. Установлены температуры для матрицы 0°С и для фотодиода 5°С, погрешность составила 0,1°С.

Для продувки ячейки использовался сжатый азот. Сорт 1 – объёмная доля азота не менее 99,99%. Результаты тестирования системы при различных концентрациях метана представлены в табл. 3 и на рис. 7.

Табл. 3. Результаты тестирования течеискателя при разных концентрациях метана

Смесь газов	Концентрация CH ₄ , ppm	Выходной сигнал, В	Стандартное отклонение, мВ	Стандартное отклонение, ppm
Сжатый азот,	0	2,825	1	30
CH ₄ +N ₂	100	2,821	1,8	54
CH ₄ +N ₂	500	2,810	1,2	36
CH ₄ +N ₂	1000	2,800	1,2	36
CH ₄ +N ₂	10000	2,672	2,2	66

Стандартное отклонение сигнала связано с шумами фотодиода.

$$S = \sqrt{\frac{\sum(u_i - \bar{u})^2}{n-1}}, \quad (2)$$

где n – количество измерений, для каждой концентрации было проведено 10 экспериментов.

По результатам экспериментов построена зависимость уровня сигнала от концентрации метана в ячейке, представленная на рис. 8.

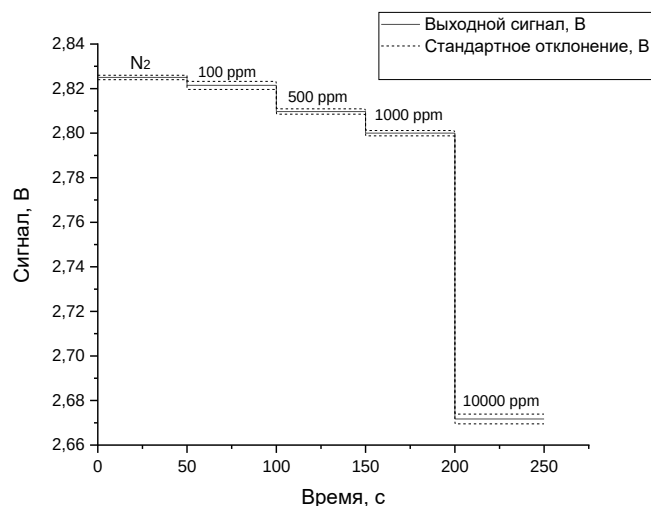


Рис. 7. Результаты тестирования течеискателя при разных концентрациях метана

Изменению сигнала на 1мВ соответствует концентрация метана ~30 ppm. Ожидаемая пороговая чувствительность 55-60 ppm.

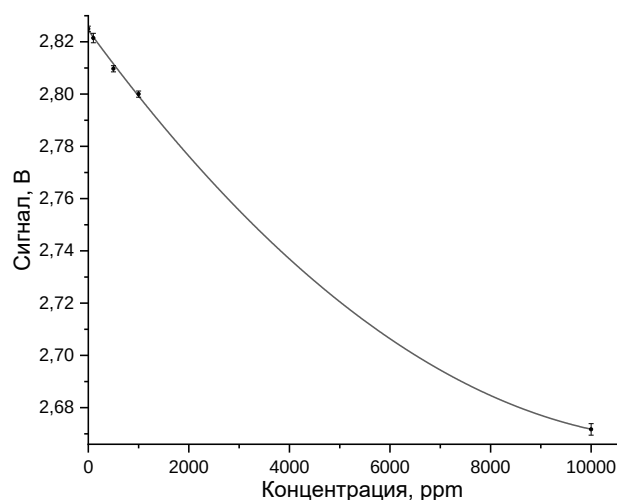


Рис. 8. Зависимость уровня сигнала от концентрации метана в ячейке

ЛАЗЕРНЫЙ ОПТИКО-АКУСТИЧЕСКИЙ СЕНСОР МЕТАНА

Для реализации метода ЛОАС был использован ККЛ с длиной волны излучения попадающего в полосу поглощения исследуемого газа. По известным данным [17], метан имеет две сильные полосы поглощения, расположенные в спектральных областях вблизи 3,3 мкм и 7,7 мкм (см. рис. 9). В наших работах [11, 18] для детектирования примеси метана в воздухе были использованы обе указанные полосы поглощения CH₄.

Разработан автомобильный лазерный оптико-акустический сенсор метана, комбинированная схема строения которого представлена на рис. 10. В состав оптической части газоанализатора метана входят: квантово-каскадный лазер ($\lambda \approx 7,7$ мкм); резонансный дифференциальный оптико-акустический детектор (ОАД); отпаянная газонаполненная ячейка (*Ref*); пироприемник (*Pyro*).

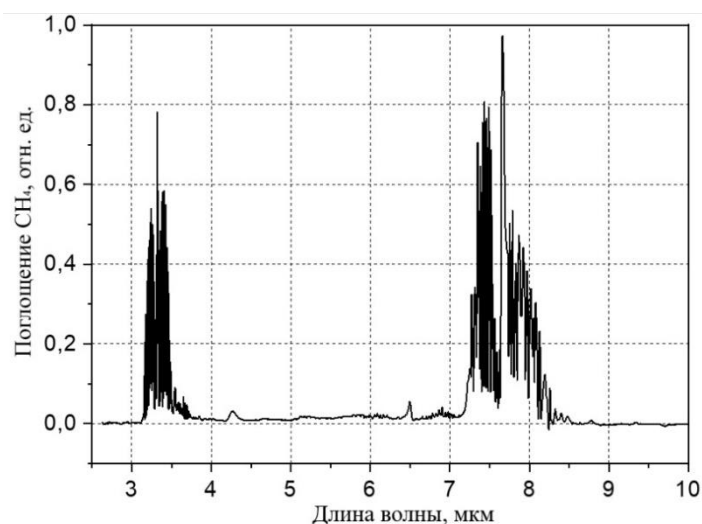


Рис. 9. Спектр поглощения метана в среднем ИК диапазоне (2,5...10 мкм) [16]

Анализируемый воздух прокачивается насосом через измерительный ОАД со скоростью $\sim 0,5$ л/мин (ламинарный поток). Резонансный дифференциальный ОАД имеет низшую резонансную частоту $f_1 \approx 1750$ Гц, добротность резонанса $Q \approx 50$. Резонансная частота ОАД (f_1) автоматически определяется при включении режима измерений газоанализатора за время $\sim 0,1$ с [20]. Лазер работает в импульсно-периодическом режиме (рабочий цикл 50%), средняя мощность излучения составляет ~ 25 мВт. Частота повторения импульсов излучения (f_{PRF}) равна измеренной резонансной частоте ОАД (f_1).

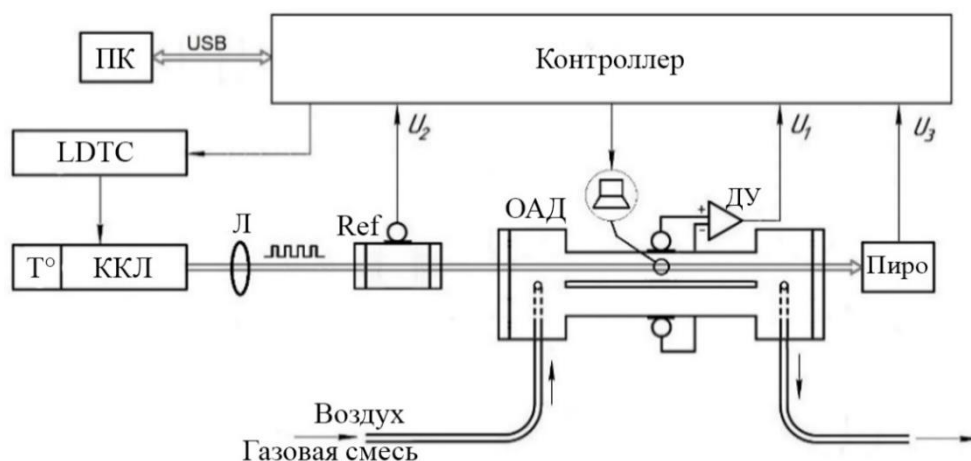


Рис. 10. Схема сенсора метана: ПК – компьютер; LDTC – контроллер управления тока лазера и термостата; T° – термостат лазера; ККЛ – квантово-каскадный лазер; Л – линза; Ref – отпаянная газонаполненная ячейка; ОАД – резонансный дифференциальный оптико-акустический детектор; Пиро – пиродетектор; ДУ – дифференциальный усилитель

На рис. 11 представлены фрагменты экспериментальных записей отклика сенсора метана длительностью по 1 мин каждый при заполнении ОАД различными газовыми смесями. При заполнении ОАД азотом особой чистоты (99,999%) и техническим азотом (99,6%) (первый и второй фрагменты записи соответственно) разницы в показаниях газоанализатора практически не наблюдается, при этом измеренная эквивалентная концентрация метана в азоте равна $n(N_2) \approx (42 \pm 14)$ ppb CH_4 . Третий фрагмент записи соответствует заполнению ОАД комнатным воздухом: $n(Air) \approx (2,692 \pm 0,021)$ ppm CH_4 . Последний (четвертый) фрагмент записи – калибровочный, по поглощению в тестовой газовой смеси $N_2 + 9,7$ ppm CH_4 .

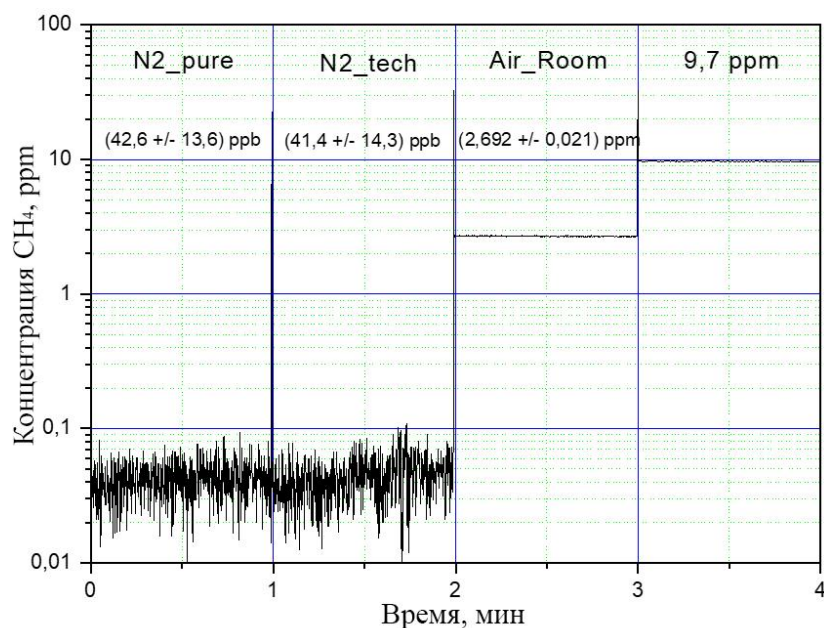


Рис. 11. Фрагменты записи фоновых значений эквивалентной концентрации метана в азоте (чистый и технический), комнатном воздухе и калибровочной газовой смеси ($N_2 + 9,7 \text{ ppm } CH_4$)

На рис. 12 представлена экспериментальная зависимость показаний сенсора метана на поверочные газовые смеси с различной концентрацией CH_4 . Линейный участок зависимости наблюдается от $\sim 1 \text{ ppm}$ до $\sim 1000 \dots 2000 \text{ ppm } CH_4$. Для расширения динамического диапазона измерений концентрации метана (вплоть до $10\% CH_4$) можно применить дополнительный ОА-детектор с малой оптической базой ($\sim 1 \text{ мм}$), как описано в нашей работе [21].

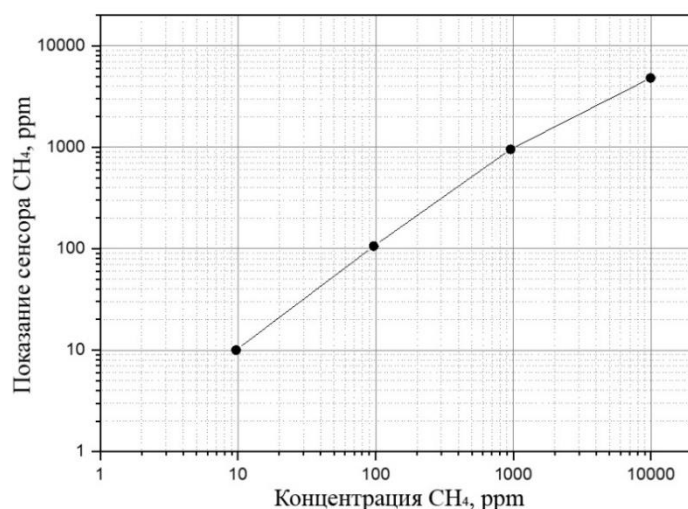


Рис. 12. Зависимость показаний сенсора метана на поверочные газовые смеси с различной концентрацией CH_4

Как видно из рис. 12 Минимальный фоновый сигнал сенсора при наполнении азотом равен $\sim 40 \dots 60 \text{ ppb } CH_4$, при этом стандартная дисперсия (1σ) составила $\sim 12 \dots 14 \text{ ppb}$ при времени интегрирования $0,1 \text{ с}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе представлены результаты исследования течеискателей метана на основе абсорбционной и оптико-акустической спектроскопии. Для первой системы получена пороговая чувствительность 60 ppm . Данный детектор газа является недорогим и имеет достаточную чувствительность для поиска утечек метана, а также для решения задач геологоразведки. Вторая система с применением ККЛ и ЛОАС является очень

чувствительной, она обладает минимальным фоновым сигналом сенсора при наполнении азотом $\sim 40 \dots 60$ ppb CH_4 , при этом стандартная дисперсия (1σ) составила $\sim 12 \dots 14$ ppb при времени интегрирования 0,1 с.

БЛАГОДАРНОСТИ

Результаты работы по исследованию абсорбционного течеискателя метана выполнены по госзаданию FSUS-2020-0036, исследование лазерного оптико-акустического сенсора метана выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 17-72-30006-П.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Табарин В.А., Шестаков А.В., Чжан Ю.В. и др. Дистанционный лазерный газоанализатор нового поколения, размещаемый на беспилотном летательном аппарате // Транспорт на альтернативном топливе. 2014. №4 (40).
2. Щербакова С.Н., Венгеров А.С. Дистанционный газоанализатор для детектирования утечек метана беспилотными летательными аппаратами // Российский химический журнал. 2021. №4.
3. Белов М.Л., Титаренко К.С., Городничев В.А. Анализ возможности дистанционного лазерного обнаружения утечек пропана // Радиостроение. 2020. №5.
4. Трофимова Г.И. Трофимов Н.И., Бакушкина И.А. и др. Метан как альтернативное топливо // Символ науки. 2016. №11-3.
5. Жилиба А.И., Вандышева Г.А., Грибанов К.Г. и др. Глобальные изменения климата: «Метановая бомба» - наукообразный миф или потенциальный сценарий? // Environmental Dynamics and Global Climate Change. 2011. Т. 2. №1. С. 1-14.
6. Агеев Б.Г., Грицута А.Н., Климкин А. В. и др. Лазерный двухканальный газоанализатор // Квантовая электроника. 2017. Т. 47. № 10. С. 956-959.
7. Bielecki Z., Stacewicz T., Smulko J., Wojtas J. Ammonia gas sensors: Comparison of solid-state and optical methods // Appl. Sci. 2020. 10. P. 5111.
8. Mahbuba P., Nooria A., Parry J., Davis J., Lucieerd A., Macka M. Continuous and real-time indoor and outdoor methane sensing with portable optical sensor using rapidly pulsed IR LEDs // Talanta. 2020. Vol. 218. P. 121144.
9. Зорин И.С., Лисаков С.А., Сидоренко А.И., Сыпин Е.В. Разработка и испытание экспериментального образца многокритериального оптико-электронного прибора контроля аварийных и предаварийных ситуаций в угольных шахтах // Южно-Сибирский научный вестник. 2019. № 4-2(28). С. 70-82.
10. Лисаков С.А., Сидоренко А.И., Сыпин Е.В. Компьютерное моделирование характеристик оптико-электронных датчиков концентрации газов и угольной пыли для контроля аварийных и предаварийных ситуаций в угольных шахтах // Вестник КузГТУ. 2018. №5 (129).
11. Шерстов И.В., Колкер Д.Б. Оптико-акустический газоанализатор метана на основе параметрического генератора света с длиной волны 3.3 мкм // Квантовая электроника. 2020. Т. 50. № 11. С. 1063-1067.
12. Шерстов И.В., Колкер Д.Б., Васильев В.А. и др. Лазерные оптико-акустические газоанализаторы на основе CO_2 лазеров и параметрических генераторов света // Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность. 2017. С. 1542-1546.
13. Каталог продукции ЛЕД. Микросенсор НТ. Режим доступа: <http://ru.lmsnt.com>.
14. Karapuzikov A.A., Sherstov I.V., Kolker D.B. и др. LaserBreeze gas analyzer for noninvasive diagnostics of air exhaled by patients // Physics of wave phenomena. 2014. Vol. 22. No. 3. P. 189-196.
15. HITRAN molecular spectroscopic database. Режим доступа: <https://hitran.org/>.

16. Каталог продукции фирмы Thorlabs. Режим доступа: <https://www.thorlabs.com/navigation.cfm>.
17. Жаров В.П., Летохов В.С. Лазерная оптико-акустическая спектроскопия. М.: Наука, 1984. 320 с.
18. Sherstov I.V., Kolker D.B., Boyko A.A. и др. Methane photo-acoustic gas analyzer based on 7.7- μm quantum cascade laser // Infrared Phys. Technol. 2021. V. 117. A.n. 103858. DOI: 10.1016/j.infrared.2021.103858.
19. NIST Standard Reference Database: <http://webbook.nist.gov/chemistry/> (Cited: January 25, 2023).
20. Karapuzikov A.I. Method for measuring the resonant frequency of photoacoustic detector in the real-time mode // Instruments and Experimental Techniques. 2016. V. 59, No. 5. P. 749-753. DOI:10.1134/S0020441216050079.
21. Sherstov I.V., Vasiliev V.A. Highly sensitive Laser Photo-Acoustic SF₆ Gas Analyzer with 10 decades dynamic range of concentration measurement // Infrared Phys. Technol. 2021. V. 119. A.n. 103922. DOI:10.1016/j.infrared.2021.103922.

Kiryakova A.Y.^{1,2,3}, Sherstov I.V.^{1,2}, Boyko A.A.^{1,2}, Kostyukova N.Y.^{1,2,3}, Erushin E.Y.^{1,2,3}

¹ Novosibirsk State University "NSU", Russia,
630090, Novosibirsk, Pirogova str., 2, E-mail: a.boiko@nsu.ru

² Institute of Laser Physics "ILPh" SB RAS, Russia,
630090, Novosibirsk, 15b Akademika Lavrentieva Ave., E-mail: baa.nsk@gmail.com

³ Novosibirsk State Technical University "NSTU", Russia, 630073, Novosibirsk, K.Marx Ave., 20

RESEARCH OF METHANE LEAK DETECTORS BASED ON ABSORPTION AND PHOTOACOUSTIC SPECTROSCOPY USING DIODE ARRAYS AND QUANTUM CASCADE LASERS

ABSTRACT

The paper considers absorption and opto-acoustic methods of methane detection. A methane sensor based on absorption spectroscopy has been developed. LED arrays with a wavelength of ~3.3 microns, where one of the methane absorption lines is located, and a threshold sensitivity of about 60 ppm CH₄ were used as a radiation source. The second leak detector is based on the principle of optical acoustic spectroscopy based on a quantum cascade laser (CCL) and a resonant differential optical acoustic detector (OAD). The laser operates in a pulse-periodic mode at a wavelength of ~7.7 microns, where a strong absorption band of methane is located. The frequency of repetition of the radiation pulses was ~ 1750 Hz. The minimum background signal of the sensor (in nitrogen) is ~40...60 ppb CH₄.

ABSORPTION SPECTROSCOPY, OPTICAL ACOUSTIC SPECTROSCOPY, LEAK DETECTOR, GAS ANALYZER, METHANE, QUANTUM CASCADE LASER