

УДК 004.17

ГАЗОАНАЛИЗАТОР ДИСТАНЦИОННОГО ИЗМЕРЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ МЕТАНА НА ОСНОВЕ ДИОДНОГО ЛАЗЕРА БЛИЖНЕГО ИК ДИАПАЗОНА И ВЫНОСНОГО ОПТОВОЛОКОННОГО ДАТЧИКА

Ахмедов Э.Р., магистрант, МГТУ МИРЭА, E-mail: ahmedover@omg.transneft.ru

Понуровский Я.Я., доцент, ИОФ РАН, E-mail: dDk@iof.ru

Москва, Россия

Аннотация. Описан газоанализатор, предназначенный для детектирования метана методом абсорбционной спектроскопии с использованием диодного лазера ближнего ИК диапазона и выносного датчика-однопроходной оптической кюветы длины 50 мм с волоконным входом и выходом излучения удаленностью более 50 км. Детектор может быть использован для дистанционного измерения концентрации газообразных веществ, в том числе метана в нефтяной, газовой промышленности, в электроэнергетике и так далее. Особо значительный эффект может быть получен от его использования при добыче и транспортировке нефти и газа.

Ключевые слова: газоанализатор, детектор метана, диодный лазер, выносной датчик, оптоволокно.

GAS ANALYZER REMOTE MEASUREMENT OF THE CONCENTRATION OF METHANE BASED ON DIODE NEAR-IR LASERS AND REMOTE FIBER OPTIC SENSORS

Akhmedov E.R., undergraduate, MSTU MIREA, E-mail: ahmedover@omg.transneft.ru

Ponurovsky Y.Y., assoc. prof., IOF of RAS, E-mail: dDk@iof.ru

Moscow, Russia

Abstract. Discloses a gas analyzer for detecting methane by absorption spectroscopy using a laser diode near-infrared sensor, and a remote-pass optical cell length of 50 mm with fiber entrance and exit radiation delete over 50 km. The detector can be used for remote measurement of the concentration of gases, including methane in the oil and gas industry, in power generation and so on. Particularly significant effect can be obtained from its use in the production and transportation of oil and gas.

Keywords: analyzer, methane detector, diode laser, remote sensor fiber.

1. Введение

Газоанализатор метана разработан для использования в составе системы мониторинга протяжённых объектов (СМПО), выпускаемой ЗАО «ОМЕГА» согласно ТУ 4372-001-63676632-14, и предназначен для определения до взрывоопасных концентраций метана в подземных переходах газопроводов через автомобильные и железные дороги. Газоанализатор должен обладать следующими техническими характеристиками:

- высокими параметрами чувствительности и быстродействия,
- наличием порога срабатывания при измерении концентрации – не выше 60% он

нижнего концентрационного предела распространения пламени (НКПР),

- тип датчика – выносной, волоконнооптический, диффузионный,
- удаленность датчика – не менее 50 км,
- наличие сигнализации обрыва кабеля и падения напряжения питания,
- широкий температурный диапазон детектирования от - 20 до +55 град,
- максимальная влаго и пылезащищенность.

Существующие в настоящее время датчики метана (ДМ) не обеспечивают одновременно все вышеперечисленные требования. Известны работы зарубежных авторов [1], [2], в которых впервые с использованием диодных лазеров ближнего ИК диапазона и оптоволоконна было продемонстрировано дистанционное детектирование метана. В первой работе для этих целей использовался многомодовый диодный лазер Фабри-Перо типа, генерировавший на длине волны 1,61 мкм, однопроходная оптическая кювета длины 0,5 м и оптическое волокно 1 км длины в один конец. Чувствительность к детектированию метана составила величину 0,07 % от нижнего уровня безопасности (5% объемных от атм.). Во второй работе при детектировании метана использовался диодный лазер Фабри-Перо на длине волны 1,33 мкм, оптическая кювета длины 1 м с волоконным входом и выходом и оптоволоконно небольшой длины (не более нескольких км). Чувствительность к детектированию метана составила +/- 0,05 %. Основным недостатком этих работ явилось существенное ограничение области их применения в виду технической сложности систем, малой мощности излучения диодных лазеров, низкой эффективности ввода излучения в волокно и как результат небольшой дальности действия этих систем.

Известен абсорбционный волоконно-оптический газоанализатор, содержащий последовательно установленные и оптически связанные излучатель, входное оптическое волокно, многоходовую кювету, состоящую из трех сферических зеркал, выходное оптическое волокно, блок регистрации и обработки информации[3]. Между выходным оптическим волокном и блоком регистрации установлен спектральный интегральный демультимплексор, а на продолжении сферы зеркала-коллектива в непосредственной близости от его края с одной стороны установлены торцы входного и выходного оптических волокон, оба зеркала-объектива установлены с возможностью совместного поворота относительно центра кривизны зеркала-коллектива в общей меридиональной плоскости всех зеркал

Известен также оптический абсорбционный газоанализатор, содержащий оптически сопряженные лазерный источник инфракрасного электромагнитного излучения с длиной волны из области поглощения анализируемого газа, многоходовую

газовую кювету, выполненную в виде интегрирующей сферы с внутренним светоотражающим покрытием, где оптический вход и выход расположены асимметрично относительно центра сферы, светофильтр и приемник излучения, подключенный через усилитель к блоку обработки и регистрации информационного сигнала [4]. Внутренняя поверхность интегрирующей сферы может быть выполнена эллипсоидной. Для повышения точности и надежности исследований оптический абсорбционный газоанализатор содержит широкополосный оптический излучатель, расположенные по ходу его излучения трубчатую газовую кювету с внутренними светоотражающими стенками и два фотоприемника, снабженные светофильтрами в области поглощения и прозрачности анализируемого газа соответственно, подключенные к блоку дифференциальной обработки и регистрации информационных сигналов.

Известен оптический абсорбционный газоанализатор, содержащий источник электромагнитного излучения с длиной волны, по крайней мере, из области поглощения анализируемого газа, расположенные по ходу излучения трубчатую газовую кювету с внутренними светоотражающими стенками и фотоприемник, подключенный через усилитель к блоку обработки и регистрации информации, отличающийся тем, что трубчатая газовая кювета выполнена спиралеобразной (спираль Архимеда) и в ее стенках выполнены сквозные отверстия под острым углом к ее плоскости симметрии со стороны источника электромагнитного излучения [5].

Основные недостатки вышеперечисленных газоанализаторов: сложность в изготовлении и эксплуатации, сложности с подстыковкой и отводом излучения к моноходовым кюветам, высокая нестабильность принимаемого сигнала, частичное несоответствие требованиям взрывобезопасности при эксплуатации во взрывоопасной среде.

Задачей настоящей работы было создание простого по конструкции устройства - детектора метана, обладающего высокой точностью измерения концентрации метана на удаленных расстояниях, во взрывоопасных зонах с использованием одномодового оптоволокна и диодных лазеров ближнего ИК диапазона в качестве источников излучения. Для реализации поставленных задач был выбран диодный лазер с распределенной обратной связью (РОС ДЛ) с волоконным выводом излучения, генерирующий на длине волны 1,651 мкм, с мощностью излучения не менее 10 мВт.

2. Блок-схема ДМ

На рисунке (рис.1) представлен ДМ на основе ДЛ ближнего ИК диапазона.

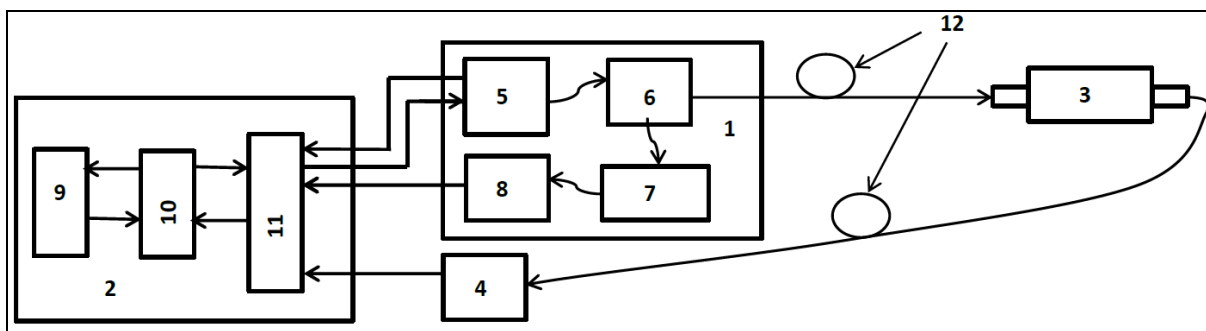


Рис.1 Датчик метана на основе ДЛ ближнего ИК диапазона

ДМ, содержит блок лазерного излучения (1) работающий на длине волны, изменяющейся в спектральном диапазоне поглощения детектируемой молекулы, и детектор аналитического сигнала (4), оптически связанный с блоком лазерного излучателя через одномодовое оптоволокно (12) и аналитическую однопроходную кювету (3), а также блок управления, приема и обработки данных (2), блок лазерного излучателя содержит оптически последовательно связанные модуль диодного лазера (5), волоконный разветвитель (6), один конец волокна, которого через кювету сравнения (7) оптически связан с детектором сигнала сравнения (8), а второй конец через дополнительный волоконно оптический кабель (12), доставляющий излучение к объекту исследования и аналитическую кювету с волоконным входом и выходом, оптически связан с детектором аналитического сигнала (4). Блок управления, приема и обработки данных (2) выполнен в виде трех модулей, а именно цифрового программируемого модуля (9), модуля цифроаналоговых и аналогово-цифровых преобразователей (ЦАП и АЦП) (10) и модуля преобразователей аналоговых сигналов (11). Модуль диодного лазера (5) представляет собой диодный лазер с распределенной обратной связью с выходом излучения в одномодовое волокно, генерирующий в ближнем ИК диапазоне длин волн (1,651 мкм), мощностью излучения не менее 10 мВт.

Аналитическая кювета (3) с волоконным входом и выходом, длиной оптического пути 50 мм и суммарными потерями не более 1 дБ. Кювета может быть выполнена в форме скобы с волоконно оптическими коллиматорами на торцах, или в виде трубки с встроенными фланцами из волоконнооптических коллиматоров. Детекторы аналитического сигнала (4) и сигнала сравнения (8) - это InGaAs p-i-n фотодиоды с диаметром активной площадки 2 мм.

Волоконно оптический кабель (12) выполнен в виде кварцевого одномодового волоконного световода с потерями оптического излучения на длине волны 1,65 мкм не более 0,25 дБ/км. Цифровой программируемый модуль (9) и модуль ЦАП и АЦП (10) реализован на базе платы ввода/вывода NI PCI-6052E .

Устройство работает следующим образом.

Диодный лазер (5) по команде цифрового программируемого модуля (9) и модуля ЦАП и АЦП (10), генерирует последовательность коротких импульсов на длине волны, совпадающей с линией поглощения детектируемого газа. Импульсы тока накачки диодного лазера трапециевидные - это позволяет дополнительно проводить сканирование излучения в области центра линии поглощения, захватывая весь контур линии и обеспечивая тем самым высокую селективность к выбранной газовой компоненте. С помощью информации, поступающей от детектора сигнала сравнения (8), производится настройка прибора, а именно выведение диодного лазерного излучателя в заданный диапазон длин волн. Это происходит за счет изменения температуры термоэлемента Пельтье, на котором расположен диодный лазер. Управление током термоэлемента Пельтье осуществляется из цифрового программируемого модуля (9) через модуль ЦАП и АЦП (10) и модуль преобразователей аналоговых сигналов (11). Измерение температуры осуществляется посредством датчика температуры, расположенного на термоэлементе Пельтье рядом с диодным лазером. Электрический сигнал от датчика температуры поступает в цифровой программируемый модуль (9) через модуль преобразователей аналоговых сигналов (11) и через модуль ЦАП и АЦП (10). Термоэлемент Пельтье и датчик температуры являются обязательными элементами как серийных, так и опытных образцов модулей диодного лазера, предназначенных для проведения спектральных измерений. По окончании процесса настройки прибор переходит в режим стабилизации диапазона перестройки длины волны по спектру вещества, находящегося в кювете сравнения, и он готов к проведению измерений. Далее часть излучения с помощью волоконного разветвителя попадает в кювету сравнения (7) и регистрируется детектором сигнала сравнения (8).

Канал сравнения выполняет две функции: 1 – основная функция канала сравнения при вычислении концентрации, 2- проведение дополнительной температурной стабилизации циклов сканирования тока накачки диодного лазера по линии поглощения газа в кювете сравнения. Реперная кювета содержит известную концентрацию исследуемого газа уширенного до атмосферы воздухом. Следующая часть излучения диодного лазера от волоконного разветвителя попадает в волоконно оптический кабель (12), доводится до нужного объекта исследования и далее попадает на вход кюветы (3). В кювете происходит прямое поглощение излучения лазера в случае присутствия детектируемого газа. Выходное излучение из кюветы с использованием выходного оптоволоконного кабеля (12) попадает на вход детектора

аналитического сигнала, усиливается, оцифровывается (10, 11) и далее с помощью цифрового программируемого модуля (9) производится вычисление концентрации детектируемого газа.

Пример:

Диодный лазер с распределенной обратной связью (РОС) и выходом излучения в одномодовое волокно генерирует на длине волны 1,651 мкм, мощность излучения не менее 10 мВт. Имеется одномодовый волоконный кабель значительной длины не менее 25 км в один конец для переноса излучения ДЛ к объекту исследования (место утеки метана в трубопроводе). Имеется однопроходная открытая кювета (пылезащищенная) с волоконным входом и выходом, длиной 50 мм.

Длительность трапецевидного импульса тока накачки составляет 1 мс, частота повторения 200 Гц. При типичном коэффициенте токовой перестройки 0,02 см-1/мА для РОС лазеров структуры АЗВ5 и токах накачки не более 100 мА развертка частоты сканирования в импульсе составляет величину не менее 2,0 см-1. Этой перестройки вполне достаточно для регистрации мультиплета R4 полосы 2v3 метана[6]. В РОС лазерах типичная ширина линии генерации 5 мГц, что обеспечивает спектральное разрешение мультиплета, ограничиваемое только доплеровским уширением линий при комнатных температурах. При частотах модуляции импульсов тока накачки не менее 25 кГц пространственное разрешение в кварцевом одномодовом волокне составит величину менее 10 км.

Волоконный разветвитель с коэффициентом деления 1/4 направляет часть излучения (25% по мощности) в канал сравнения для выполнения процедуры сравнения при вычислении концентрации метана и для обеспечения дополнительной частотной стабилизации излучения диодного лазера на уровне 0,0002 см-1 по линии поглощения реперного газа – метана в кювете сравнения.

Вторая часть излучения (75% по мощности) с помощью оптоволоконного кабеля доводится до места утечки метана и с помощью аналитической кюветы длины 5 см регистрируется поглощение на мультиплете R4. Второе оптоволокно так же длины не менее 25 км, переносит излучение, выходящее из кюветы и несущую информацию о поглощающем объекте к детектору аналитического сигнала. Там происходит усиление аналитического сигнала, оцифровка и производится вычисление концентрации. Чувствительность к измерению концентрации метана при этих параметрах в открытой атмосфере и при температурах -40 + 50 С0, а так же при величинах ослабления лазерного излучения в волокне 0,25 дБ/км, составит величину менее 0,02 % объемной концентрации метана. Этого вполне достаточно, чтобы измерять утечки газа при

концентрациях существенно меньших взрывоопасных. Вычисление производится в режиме “on-line” с частотой обновления менее 30 мс. Технические характеристики описанного устройства, полученные экспериментальным путем: длина оптоволокну в один конец не менее 25 км, оптическая длина аналитической кюветы 50 мм, чувствительность к измерению объемной концентрации метана менее 0,02 % , время регистрации менее 30 мс. Аппаратные и программные средства, обеспечивающие высокие технические характеристики описанного устройства, позволяют после модернизации оптоволоконной и приемной частей (узлы 4,12,3 рис.1) существенно увеличить дальность приема, а так же число аналитических каналов детектирования метана (см. рис.2).

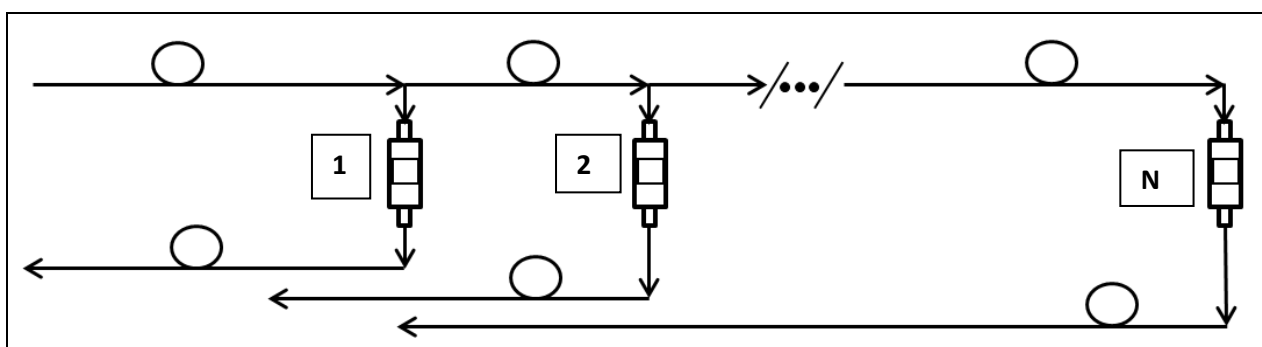


Рис.2 Увеличение числа аналитических каналов при параллельной схеме подключения. (1-первая кювета детектирования, 2- вторая кювета, N- N-я кювета детектирования).

Для этих целей, по пути следования оптоволокну (верхняя часть волокна (12), рис.1), параллельно через волоконные разветвители (с коэффициентом деления, например, 95/5 %) добавляются аналитические каналы с оптической кюветой и возвратным оптоволоконном, а так же с соответствующим детектором аналитического сигнала. Модуль преобразователей аналоговых сигналов (11) в этом случае оптимизируется под число аналитических каналов. Преимущества вышеописанной схемы подключения обусловлено независимостью (автономностью) аналитических каналов в случае выхода из строя одного из них.

2.1. Внешний вид ДМ

На рис. 3 представлены фотографии внешнего вида ДМ. Для удобства использования все оптоэлектронные компоненты ДМ размещены в системном блоке ПК. Под литерами А представлен системный блок, Б-задняя панель прибора с тумблерами включения, оптоволоконными и электрическими разъёмами.

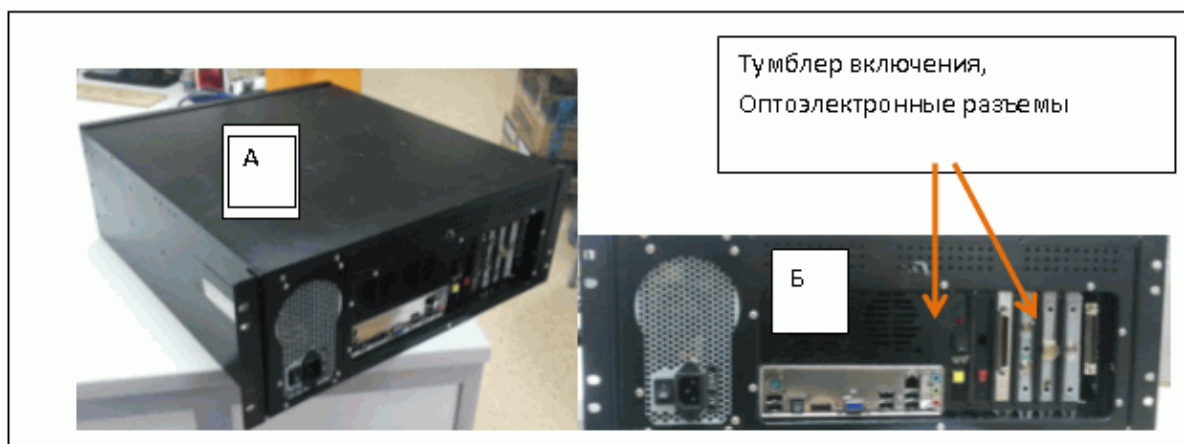


Рис 3. Внешний вид ДМ. А - Системный блок, Б- задняя панель

2.1.1 Канал сравнения

Часть излучения ДЛ с помощью волоконного разветвителя проходит через кювету сравнения и направляется в модуль регистрации. Оптоэлектронный канал сравнения устанавливается в блок электронного управления ДМ около модуля ДЛ. Блок схема канала сравнения показана на рис.4

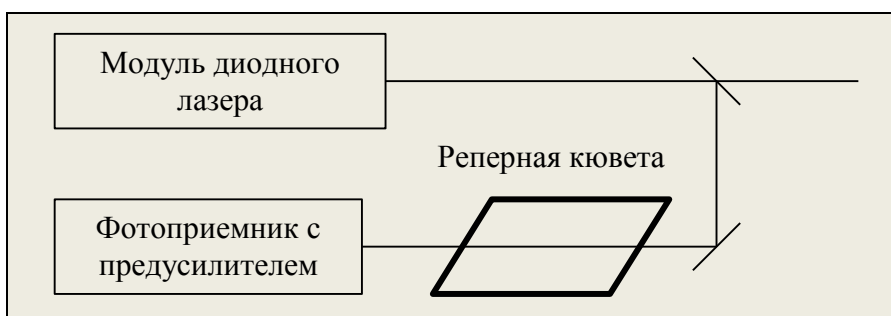


Рис. 4 Блок схема канала сравнения

Он выполняет две функции: 1 – основная функция канала сравнения при вычислении концентрации, 2- проведение дополнительной температурной стабилизации циклов сканирования тока накачки диодного лазера по линии поглощения газа в кювете сравнения. Кювета сравнения длины 45 мм изготавливалась из стеклянной трубки диаметром 12 мм, к концам которой приваривались клиновидные окна из стекла. Диаметр окон 12 мм, клин- 3,0 %. Кювета имеет стеклянный отвод («хвост») для закачки смеси газа и последующей запайки. Использовалась смесь газа метана с сухим азотом в соотношении 1:10. Полное давление 1 атм.

2.1.2 Аналитический канал

Использовалась аналитическая кювета входом и выходом в одномодовое волокно (<http://www.thorlabs.de>). Длина кюветы 5 см На рис. 5 представлена фотография кюветы

с габаритными размерами.

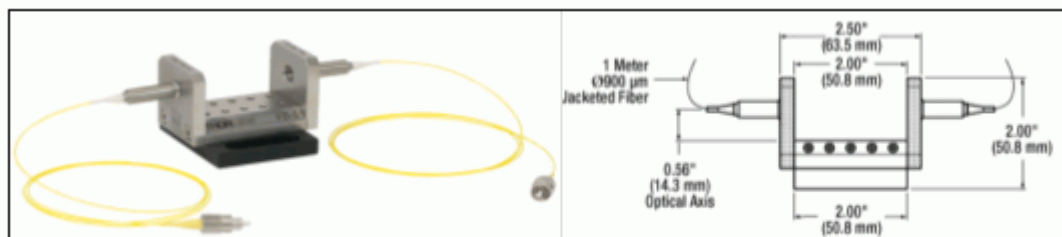


Рис. 5. Аналитическая кювета входом и выходом в одномодовое волокно.

Внутренние потери в кювете не более 0,6 +/- 0,3 дБ, она термомеханически стабильна.

2.2. Модуль диодного лазера

В настоящем приборе используется модуль диодного лазера фирмы «NTT ELECTRONICS» с выводом излучения через одномодовый световод (рис. 6).

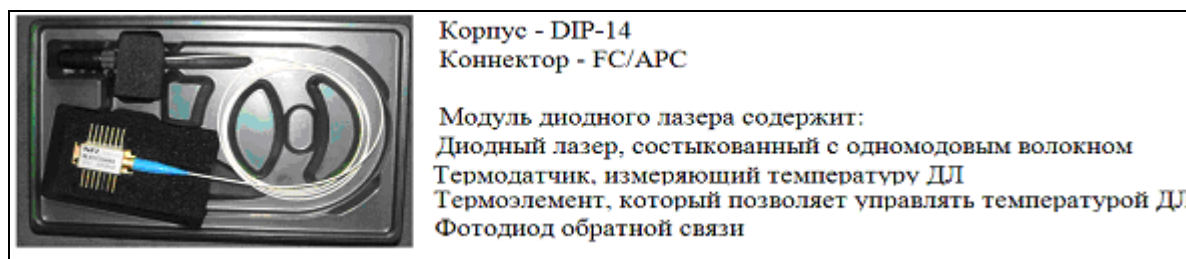


Рис. 6. Внешний вид и структура модуля диодного лазера фирмы «NTTELECTRONICS» с одномодовым выводом излучения.

Цоколевка модуля ДЛ

Номер ножки модуля	Назначение
1, 14	Термоэлемент
11, 12	Термодатчик
5, 9	Диодный лазер
7, 8	Фотодиод обратной связи

В ГМ используется ДЛ, излучающие на длине волны 1,651 мкм. Излучение указанной длины волны инфракрасное и не видно глазу. 2 Класс опасности излучения согласно ГОСТ 12.1.040-83. Для его визуализации необходимо использование инфракрасных видео камер, либо иных визуализаторов ИК излучения, например ИК карту NewportF-IRC4 [<http://www.newport.com>]. Ниже приведены параметры ДЛ [http://c1170156.r56.cf3.rackcdn.com/UK_NEL_NLK1U5FAAA_DS.pdf]

NLK1U5FAAA

1650 nm DFB laser diode in a butterfly-type 14 pin package with thermo-electric cooler. Pigtail fiber is connectorized with an FC/PC connector.

FEATURES

* Wavelength Range	1650nm
* Fiber Output Power	15mW

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS($T_{sub}=25deg.C$)

Parameter	Symbol	Ratings	Units
Laser diode reverse voltage	V_R	2.0	V
Laser diode forward current	I_F	225	mA
Operating case temperature	T_{case}	-5 to 70	deg.
Storage temperature	T_{stg}	-40 to 85	deg.
Photodiode reverse voltage	V_{DR}	10	V
Photodiode forward current	I_{DF}	10	mA
Peltier current	I_p	1.4	A

ELECTRICAL/OPTICAL CHARACTERISTICS($T_{sub}=25deg.C$)

Parameter	Symbol	Condition	Min.	Typ.	Max.	Units
Forward voltage	V_F	$I_F=30mA$		1.2	1.6	V
Threshold current	$I_{(TH)}$	CW		15	20	mA
Fiber output power	ϕ_o	CW, $I_F=130mA$	15			mW
Peak wavelength	λ_p	CW, $\phi_e=15mW$	1625		1655	nm
Spectral linewidth*	$\Delta\nu$	CW, $\phi_o=15mW$		2		MHz
Side mode suppression ratio	SMS	CW, $\phi_e=15mW$	35			dB
Monitoring Current(PD)	$I_{R(E)}$	CW, $\phi_e=15mW$	0.1			mA
Dark current(PD)	$I_{r(0)}$	CW, $V_{DR}=5V$			100	nA
Tracking error	E_R	$I_{R(E)}=constant$	-0.5		+0.5	dB
Cooling capacity*	ΔT_{PE}	$\phi_o=15mW, T_{case}=70deg$	45			deg.
Peltier current	I_{PE}	$T_{case}=-5 to 70deg.$			1	A
Peltier voltage	V_{PE}	$T_{case}=-5 to 70deg.$			2	V
Thermister resistance*	R	$T_{sub}=25deg.$		10		k Ω
Isolation*	I_s	$T_{sub}=25deg.$		30		dB

$$\Delta T = |T_{case} - T_{sub}|$$

2.3. Фотодиод

В приборе ГМ используются фотоприемники PIN InGaAS серии G8370-02 фирмы "Hamamatsu", Япония [<http://www.hamamatsu.com>] Диаметр активной площадки 2 мм. Величина NEP (W/Hz^{1/2}) = 4*10⁻¹⁴. Ниже приведены электрические и оптические характеристики фотоприемников. На рис.7 показана спектральная чувствительность фотоприемника (А/Вт) На длине волны 1,65 мкм при температуре 25 градусов она составляет величину 0,9 А/Вт.

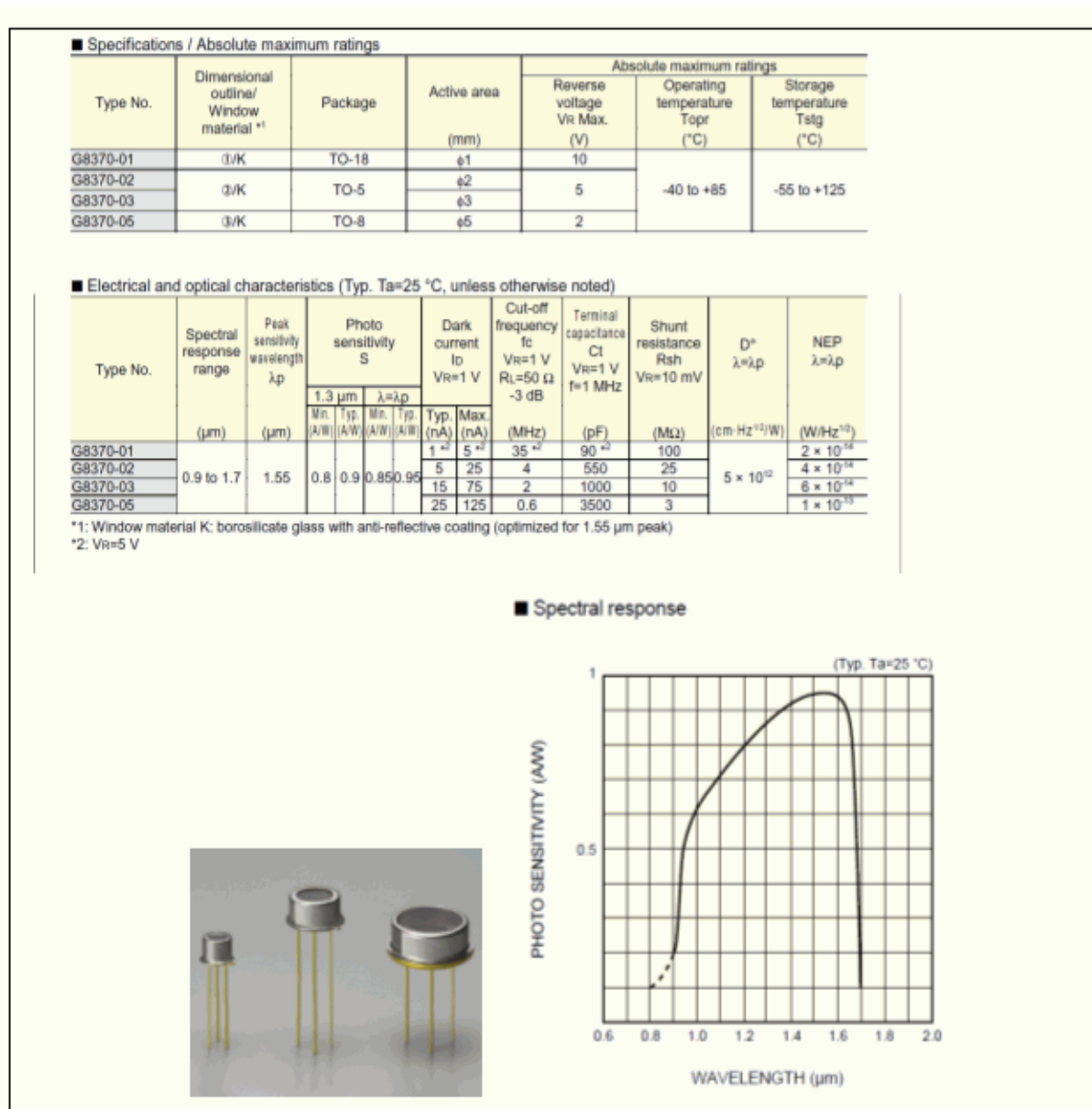


Рис.7 Спектральная чувствительность фотоприемника G8370-02 (А/Вт).

3. Спектры поглощения метана

Практически все молекулы имеют полосы поглощения в ближнем ИК диапазоне. Расположенные в этом спектральном диапазоне молекулярные полосы поглощения газов H₂O, CH₄, NH₃, CO₂ являются характеристическими, поскольку определяются частотами молекулярных связей ОН, СН, СО. Проста и доступность детектирования этих молекул обусловлена огромным мировым рынком промышленно выпускаемых ДЛ. На рис. 8 представлены спектры поглощения наиболее известных молекул

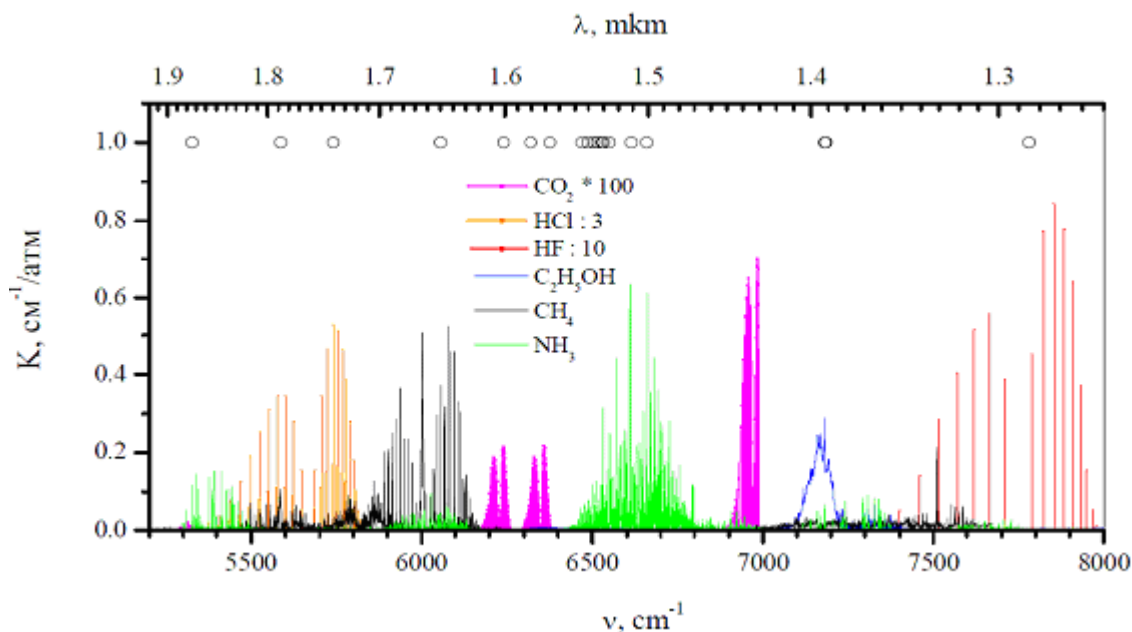


Рис.8 Спектры поглощения наиболее известных молекул в ближнем ИК диапазоне длин волн

3.1. Спектр CH₄ в ближнем ИК диапазоне

Детектирование CH₄ в ДМ происходит в окрестности 1,65 мкм, где располагается полоса $2\nu_2 + \nu_3$. Спектр поглощения метана в диапазоне 1.65 мкм приведен на рис.9. Параметры модулированного спектра: длина кюветы 5 см, концентрация метана 1%, при атмосферном давлении.

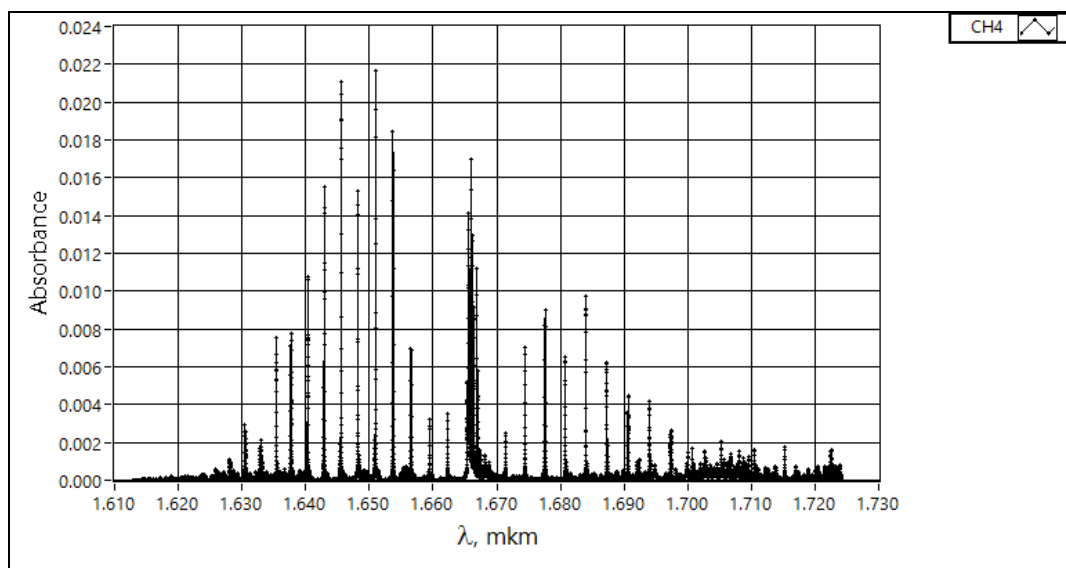


Рис. 9 Спектр поглощения метана в ближнем диапазоне длин волн.

Данные спектроскопических параметров линий метана брались из базы данных HITRAN-2012 [<http://www.cfa.harvard.edu/hitran>]. Наиболее интенсивная линия поглощения R4 находится в диапазоне 1,651 мкм. Она была выбрана в качестве

аналитической при детектировании метана. Величина оптической плотности составляет 2.2%. На рис.10 представлена линия R4 («черные» линии) совместно с линиями поглощения воды («синие» линии). По оси у представлена оптическая плотность в логарифмическом масштабе. Параметры моделирования спектров: длина кюветы 5 см, концентрация метана 1%, концентрация паров воды 1%, при атмосферном давлении.

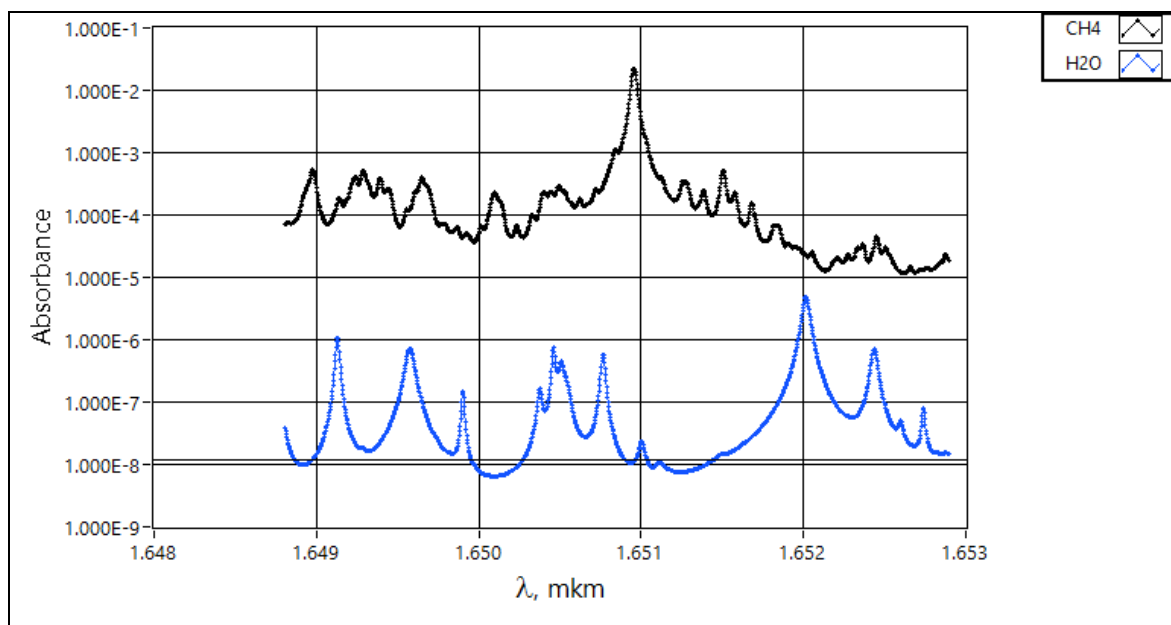


Рис.10 Спектры поглощения метана и паров воды в области 1,651 мкм.

Из рис.8 видно, что поглощение паров воды на 4 порядка меньше поглощения метана. Даже при концентрации паров воды близкой к нормальной атмосферной (порядка 2-3%) при $T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$ поглощение воды не оказывает влияния на детектирование метана). Линии поглощения CO_2 и других атмосферных газов (см. рис.8) находятся существенно дальше от полосы метана.

3.2. Влияние углеводородов семейства метана

Для учета влияния легких углеводородов из семейства метановых были исследованы спектры поглощения этана, пропана и бутана в области 1,651 мкм. Как видно из рис.11 полосы поглощения этих углеводородов имеют сплошные неразрешенные структуры и, что важно, существенно сдвинуты по частоте от аналитической области 1,651 мкм. Таким образом, выбранная нами аналитическая область детектирования метана обладает высокой селективностью к измеряемой компоненте, что обеспечивает высокую чувствительность при детектировании CH_4 методом диодной лазерной спектроскопии.

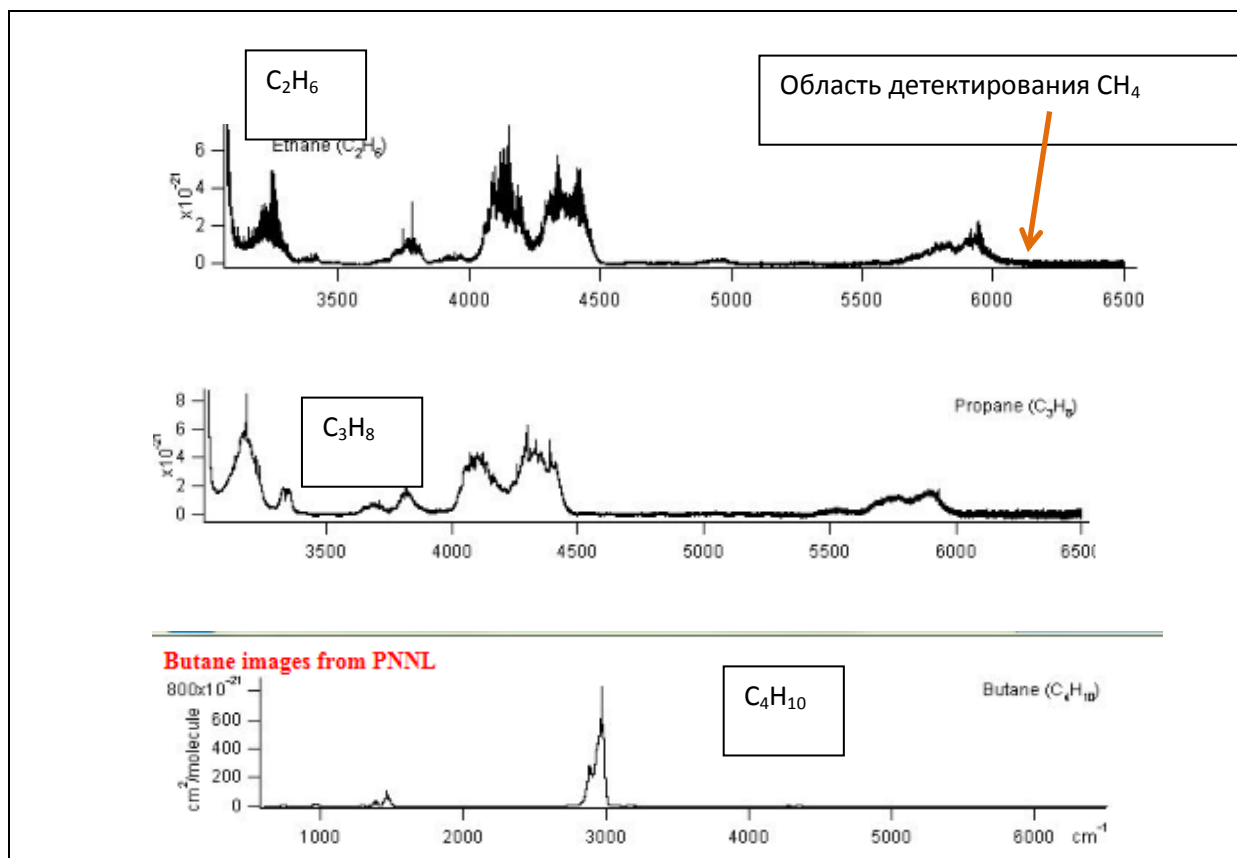


Рис.11 Спектры поглощения этана, пропана и бутана в ближней ИК области

3.3. Алгоритм определения концентрации

Сигнал, регистрируемый фотоприемником после прохождения излучения лазера через исследуемый газ, можно представить в виде:

$$I = I_0 T(\nu) = I_0 \exp[-\sigma(\nu) P_0 C L] = I_0 \exp[-K(\nu)], \quad (1)$$

где I_0 – излучение лазера, $T(\nu)$, $K(\nu)$ - спектры пропускания и поглощения, соответственно, σ - сечение поглощения, $P_0 = 1$ атм – давление исследуемой газовой смеси, C – концентрация детектируемой молекулы, L – длина оптического пути в кювете с исследуемым газом. После прохождения излучения через исследуемую газовую смесь регистрируется спектр пропускания. Диодный лазер возбуждается периодическими импульсами тока специальной формы. В данной модификации прибора используется трапециевидная форма импульса тока накачки. По этой причине мощность, излучаемая лазером, а также сигнал, регистрируемый фотоприемником, имеют форму, близкую к трапециевидной. Длительность импульса тока накачки 1-2 мс, частота повторения 40 Гц. Изменение тока накачки во время импульса сопровождается изменением его частоты излучения.

Импульс тока накачки ДЛ модулировался по амплитуде с частотой равной частоте update платы NI PCI-6052E. Частота оптимизировалась под полосу пропускания

предусилителей фотоприемников аналитических каналов и составляла 60 КГц. Глубина модуляции подбиралась таким образом, что бы обеспечить частотный сдвиг в моде на полуширину линий поглощения метана и получить максимальный контраст поглощения. В дальнейшем проводилась математическая обработка амплитудно-модулированных сигналов[7]:

1- логарифмирование частотно сдвинутых компонент сигналов, в соответствии с законом Бугера-Ламберта-Берра и получения эффективных первых производных;

2- автокорреляционная свертка производных реперного сигнала и кросскорреляционная свертка реперного сигнала с аналитическим. Эта процедура обеспечивает дополнительную фильтрацию полезного сигнала зашумленного помехой;

3-Линейная подгонка кросскорреляционной функции по автокорреляционной и нахождение коэффициента совпадения функций. Коэффициент совпадения \square пропорционален неизвестной концентрации исследуемого газа, которая определяется

$$\text{по формуле (2): } R_{xy} = \alpha * R_{xx}; \quad C = \frac{\alpha \cdot P_R \cdot L_R}{P_A \cdot L_A} \cdot 10^2, \quad (2)$$

Где R_{xy} и R_{xx} - кросскорреляционная и автокорреляционная функции, C - концентрация метана в %, P_R , P_A – парциальное давление метана в канале сравнения и в аналитическом канале соответственно, L_R , L_A – оптические длины в кювете сравнения и аналитической кювете соответственно.

На рис.12 литер А – зарегистрированные фотоприемниками сигналы импульсов ДЛ (модулированные с частотой дискретизации платы ввода/вывода) в канале сравнения («желтая» кривая) и в аналитических каналах. Литер Б- логарифмы частотно сдвинутых компонент сигналов А.

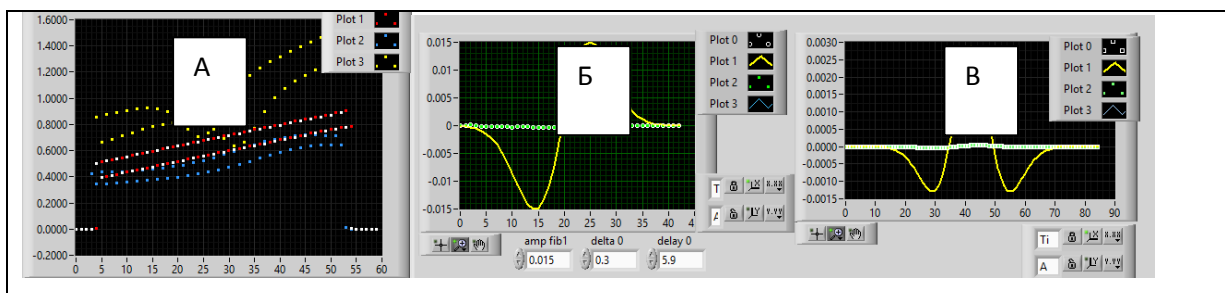


Рис. 12. А – форма импульса тока накачки ДЛ, Б-логарифмы частотно сдвинутых компонент сигналов А, В- автокорреляционная и кросскорреляционная свертка сигналов Б.

Представленная процедура вычисления концентрации метана существенно лимитирует различные низкочастотные (вибрационные, фликкерные) шумы приёмно-

регистрирующего тракта ДМ, Она линейна к измерению концентрации метана на оптических длинах до 10 см и диапазонах изменения концентрации метана от 0 до 10 %объемных и температурах от -50 до +70 0С. Калибровка концентрации производится только по содержанию метана в кювете сравнения.

На рис.13 представлено окно вывода концентрации метана. Разными цветами представлены измеренные концентрации в 3 аналитических каналах.

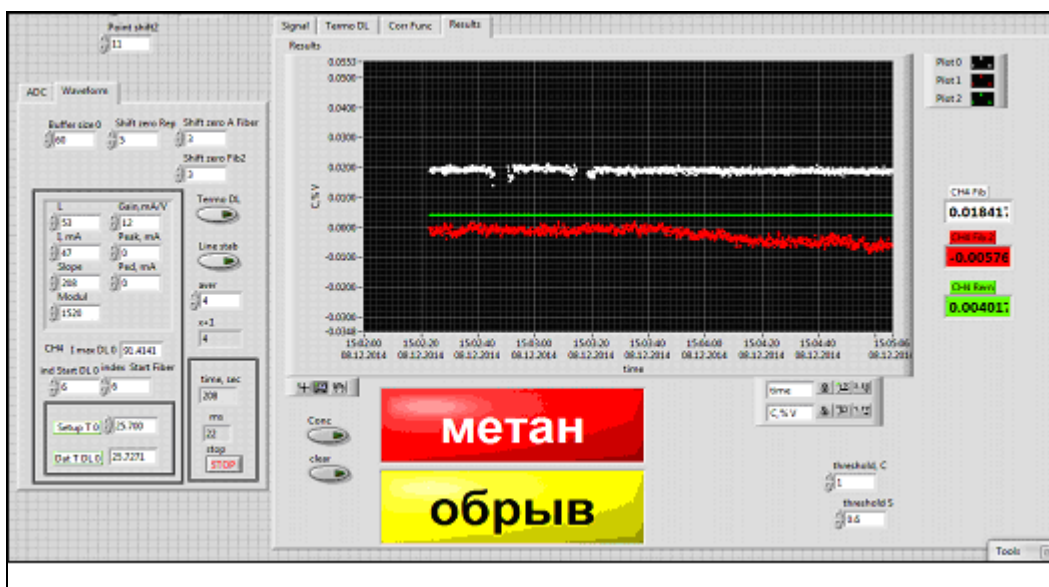


Рис.13 Окно результатов измерений концентраций метана.

Концентрация метана выводится в режиме «on-line», на жесткий диск записываются результаты измерений («протокол измерений») В программе выводится аварийная сигнализация при превышении порога детектирования, обрыва кабеля и т.д. Время единичного измерения 30 мс. Чувствительность при детектировании с выносной кюветой 5 см. составила 0,01 объемных %.

4. Заключение

В заключении приведем основные характеристики ДМ:

1. Удаленность детектора от программно-аппаратного блока, не более, км 50
2. Порог срабатывания, % 1+/-0,02
3. Время срабатывания, не более, с 27
4. Программно-аппаратный блок газоанализатора размещается в линейном модуле СМПО
5. Масса программно-аппаратного блока, не более, кг 8
6. Допустимая рабочая температура, 0С от +1 до +40
7. Габариты, мм 480x560x360

8. Напряжение и частота питающей сети, В 230 , частота 60 Гц.
9. Потребляемая мощность, не более, Вт 300
10. Время установления рабочего режима после включения питания, мин 10
11. Количество, подключаемых детекторов метана, не более, шт. 5
12. Время работы от автономного источника электропитания, не менее, час 3

Список литературы:

1. Chan, K., et al. “An Optical Fiber-Based Gas Sensor for Remote Absorption Measurement of Low-Level Methane Gas in Near-Infrared Region”, J Lightwave Tech. LT-2 (1984) pp. 234-237.
2. Mohebbati, A., et al. “Remote Detection of Gases by Diode Laser Spectroscopy”, J Modern Optics 35 (1998) pp. 310-324.].
3. Патент RU 2091764, G 01 N 21/61, 1997.
4. Патент RU 2022249, G 01 N 21/61, 1994.3
5. Патент RU 2262684.
6. K.Y. Osipov, et al. “Collision parameters of N₂-broadened methane lines in R5 multiplet of 2ν₃ band. Multispectrum fitting of overlapping”.// Appl. Phys. B (2011) 106:725-732.
7. A. I. Nadezhdinsky, et al. Preliminary results of an aircraft system based on near-IR diode lasers for continuous measurements of the concentration of methane, carbon dioxide, water and its isotopes.// Appl.Phys. B. 2012. V. 109. P. 505-510