

С.Ф. Баландин, С.А. Шишигин

## Влияние влажности на показания корреляционного газоанализатора, используемого для измерения концентрации метана и этана

*Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск*

Поступила в редакцию 31.03.2006 г.

Проведен анализ современных газоаналитических дистанционных комплексов для обнаружения локальных аномалий метана в воздухе. Разработана схема дистанционного ИК корреляционного газоанализатора для измерения содержания метана, приведены его технические характеристики, рассчитаны коэффициенты корреляции при разных влажностях воздуха.

### Введение

В настоящее время оперативный контроль концентрации метана в воздухе чрезвычайно актуален и позволяет заблаговременно предупреждать техногенные катастрофы на нефтегазопроводах, в шахтах, в производственных помещениях. Для этого используют контактные и дистанционные приборы [1–4]. В газоанализаторах с отбором проб воздуха из исследуемого объема применяются полупроводниковые, термокаталитические, электрохимические, спектрально-оптические, пламенно-индикационные датчики. Выбор типа прибора определяется такими факторами, как селективность по измеряемому газу, пороговая чувствительность, надежность, простота конструкции, сервисные требования, его стоимость. Нижний предел обнаружения метана составляет около  $2 \text{ нг/м}^3$  [1]. Пороговая чувствительность измеряемой концентрации метана в воздухе менее  $0,04 \text{ ppm}$  [2, 12].

Использование контактных газоанализаторов ограничено в местах, труднодоступных для забора проб, поэтому в последние годы наметилась ярко выраженная тенденция к разработке аппаратуры оперативного дистанционного контроля метана с борта летательных аппаратов [3, 4], что значительно повышает эффективность и оперативность ее использования для обнаружения различных метановых аномалий на обширных территориях.

### 1. Анализ газоаналитических комплексов регистрации метана

Существующие в настоящее время отечественные системы для контроля  $\text{CH}_4$  используются при проведении геологоразведочных и геофизических работ на стадии обнаружения и оконтуривания перспективных районов при поиске месторождений нефти и газа. К таким системам относятся контактные газоанализаторы, например «Обзор-2», «МАГ-1», «АЭРОПОИСК», «ДОУ», которые устанавливаются

на борту вертолета и позволяют обнаруживать содержание метана в воздухе в диапазоне  $0,01\text{--}0,05\%$  (процентное количество детектируемого газа в единице объема среды, умноженное на длину оптического пути). Фоновую концентрацию метана получают из анализа пробы воздуха за бортом вертолета при пролете местности [4]. Однако такие приборы не позволяют обнаруживать локальные области утечек метана до высот  $\sim 4,0 \text{ м}$ , что значительно ограничивает их область применения.

Более перспективны дистанционные газоаналитические комплексы, используемые в настоящее время [3–7], систематизированные в табл. 1.

К последним наиболее перспективным разработкам можно отнести дистанционный лазерный детектор метана «ДЛС-ПЕРГАМ». Принцип его действия основан на сканировании спектра диодного лазера, работающего в полосе поглощения метана с центром  $1,65 \text{ мкм}$ . Интенсивность полосы поглощения метана в этой области спектра на 2–3 порядка меньше интенсивности полос поглощения в области  $3,3$  и  $7,8 \text{ мкм}$ , что ограничивает использование данного спектрального диапазона для лидарного зондирования метана лишь для больших концентраций [3]. Пороговая чувствительность измерений за время  $0,5 \text{ с}$  с расстояния  $100 \text{ м}$  составляет  $100 \text{ ppm} \cdot \text{м}$ , что позволяет измерять превышение концентрации над фоновым значением. Однако необходимость перестройки частоты лазерного излучения в области линии поглощения исследуемого газа, высокие требования к поступающему на приемник лидара рассеянному лазерному излучению (учет в течение сканирования линии поглощения измеряемого газа, флуктуации молекулярного и аэрозольного ослабления лазерного излучения на исследуемой трассе и изменения рассеивающих свойств отражающей поверхности), сложность в эксплуатации, невозможность одновременного измерения содержания в исследуемом объеме другого газа ограничивают практическое применение данного лидара в геологоразведочных работах, геофизических и научных исследованиях.

Системы для обнаружения утечек метана дистанционным методом

Система	Производитель	Состав оборудования	Носитель	Предел обнаружения	Практическое применение
Авиационный сканирующий радиометрический комплекс «САВР»	ООО «ЦЕТМ» г. Трехгорный	1. Сканирующая тепловизионная система «САВР-М», «САВР-С» и «Климат-С» 2. Система обеспечения и привязки координат	Вертолет, самолет	70– 100 м <sup>3</sup> /сут	Модельные участки газопроводов
Лазерно-тепловизионный комплекс	ЗАО «ЦИП» г. Москва	1. Тепловизионная камера 2. Тепловизионная система «Agema-1000» 3. Лазерный газоанализатор 4. Бортовая вычислительная система 5. Система обеспечения и привязки координат	Вертолет, автомобиль, судно	340– 350 м <sup>3</sup> /сут	Мострансгаз, Пермтрансгаз, КС, ПХГ
Система радиолокационного обнаружения утечек Ridim-газ	ОАО «Улан-Удэнский авиаремонтный завод»	1. Авиационный метеорологический радиолокатор «Контур-А813Ц» 2. Система обеспечения и привязки координат	Автомобиль	250– 300 м <sup>3</sup> /сут	Лентрансгаз
Система Gas Finder 2.0	—	1. Дiodный лазер 2. Угловые отражатели 3. Блок приема/передачи	Вертолет	1 ppm	Пермтрансгаз
Система оперативного контроля экологической безопасности	НИИКИ ОЭП г. Сосновый Бор	1. Лазерно-локационная система «Везувий-ЭК» 2. Система обеспечения и привязки координат	Вертолет, самолет	200 м <sup>3</sup> /сут	В стадии разработки
Детектор метана ДЛС-ПЕРГАМ	ОАО «ПЕРГАМ инжиниринг» г. Москва	1. Оптический блок 2. Система обеспечения и привязки координат	Вертолет	1 ppm	—

Отмеченные выше недостатки могут быть устранены при дистанционном измерении примесного газа в воздухе корреляционным радиометром [5–8, 10, 11], работающим как в пассивном режиме — по регистрации теплового излучения подстилающей поверхности, рассеянной и прямой солнечной радиации, так и в активном — по регистрации излучения, прошедшего исследуемую трассу от искусственного источника, установленного в конце или начале трассы. При этом идентифицировать происхождение метана позволяют дополнительные измерения на той же трассе другого газа, входящего в состав природного газа, — этана, этим же прибором [5].

При измерении содержания метана в воздухе в области 7,8 мкм с помощью корреляционного газоанализатора по имеющимся сообщениям в научных журналах [5] достигнута чувствительность  $7 \cdot 10^{-3} \% \cdot \text{м}$ . Для регистрации фоновой концентрации метана (1,6 ppm) необходима трасса длиной не менее 50 м. В данной области спектра полоса поглощения метана перекрывается с полосой поглощения водяного пара.

В настоящей статье на основе банка данных ИОА СО РАН спектральных линий атмосферных газов приведены результаты исследования ранее не рассмотренного влияния влажности на показания корреляционного радиометра при варьировании ширины анализируемого спектрального диапазона, приведены оценочные параметры работы предлагаемой принципиальной схемы пассивного корреляционного газоанализатора метана и этана.

## 2. Принцип работы корреляционного радиометра

При использовании метода корреляции газовых светофильтров частотный спектр излучения, поглощаемого или испускаемого искомым газом, выделяется при помощи высокоэффективного и селективного спектрального светофильтра, которым служит проба самого искомого газа в первом канале регистрации излучения и сравнивается с опорным сигналом второго канала. По разбалансировке данных каналов судят о концентрации газа в исследуемом объеме. Оптическая толщина газа в корреляционной кювете (в заданном спектральном интервале) выбирается так, чтобы произведение глубины модуляции входного светового потока на средний коэффициент пропускания было максимально.

Разностный сигнал  $\delta\Phi$  между двумя каналами пропорционален полному количеству исследуемого газа в столбе воздуха на исследуемой трассе, ограниченном полем зрения телескопа, и может быть выражен в виде [5]:

$$\delta\Phi = A\Omega \int_{\delta\nu} [\eta_c N_T(\nu) \exp(-\tau_c(\nu)) - \eta_r N_T(\nu) \exp(-\tau_r(\nu))] d\nu + I_c, \quad (1)$$

где  $\eta_c$  и  $\eta_r$  — коэффициенты пропускания оптических компонентов в корреляционном и опорном каналах;  $A\Omega$  — угловой аксептанс;  $\tau_c(\nu)$  и  $\tau_r(\nu)$  — опти-

ческие толщи газов в корреляционной и опорной кюветках;  $I_c$  – слагаемое, соответствующее излучению, испускаемому газом корреляционной кюветки;  $N_T(\nu)$  – полная энергетическая светимость поверхности Земли и атмосферы в пределах поля зрения телескопа. Согласно упрощенной модели однородной однослойной атмосферы

$$N_T(\nu) = [\varepsilon(\nu)B_e(\nu, \Theta) \exp(-\tau_a(\nu)) + B_a(\nu, \Theta)(1 - \exp(-\tau_a(\nu)))] \quad (2)$$

где  $B_e(\nu, \Theta)$  – светимость абсолютно черного тела с температурой  $\Theta$  на частоте  $\nu$ ;  $\varepsilon$  – относительная излучательная способность (степень черноты) поверхности Земли, а  $\tau_a(\nu)$  – оптическая толщина искомого газа. Индекс «e» относится к Земле, «a» – к атмосфере.

Необходима точная балансировка сигналов корреляционной и опорной кювет, чтобы в отсутствие искомого газа разностный сигнал  $\delta\Phi$  не зависел от изменений светимости источника.

С учетом (2) и балансировки выражение для  $\delta\Phi$  (1) можно переписать в следующем виде:

$$\delta\Phi = A\Omega\eta_c(\varepsilon B_e - B_a) \left( \int_{\delta\nu} T_a T_c d\nu - 1/\delta\nu \int_{\delta\nu} T_a d\nu \int_{\delta\nu} T_c d\nu \right) + I_c \quad (3)$$

Здесь принято, что спектральная чувствительность в опорном канале постоянна в рабочем интервале частот, и введено обозначение  $T(\nu)$  для коэффициента пропускания  $T(\nu) = \exp(-\tau(\nu))$ .

На практике выполнения условия балансировки добиваются путем изменения усиления сигналов, соответствующих корреляционной и опорной кюветкам. Усиление регулируют так, чтобы усиленные сигналы были равны в отсутствие искомого газа. Величина  $\rho_n = \left( \int_{\delta\nu} T_a T_c d\nu - 1/\delta\nu \int_{\delta\nu} T_a d\nu \int_{\delta\nu} T_c d\nu \right)$  называется ненормированным коэффициентом корреляции, определяющим принцип работы любого корреляционного спектроанализатора. Максимальной чувствительности прибора добиваются, оптимизируя произведение  $\eta_c$  на  $\rho_n$ . Из полученной формулы следует, что оптимальная оптическая толщина корреляционной кюветки зависит от детальной структуры спектра исследуемого газа.

Учитывая, что нормированный коэффициент корреляции  $\rho$  между  $T_c(\nu)$  и  $T_a(\nu)$  может быть записан в виде

$$\rho = \left( \int_{\delta\nu} T_a T_c d\nu - 1/\delta\nu \int_{\delta\nu} T_a d\nu \int_{\delta\nu} T_c d\nu \right) / \sigma_{T_c} \sigma_{T_a} \quad (4)$$

где  $\sigma_{T_c}$ ,  $\sigma_{T_a}$  – среднеквадратические отклонения функций  $T_c(\nu)$  и  $T_a(\nu)$  в спектральном интервале

$\delta\nu$ , получим функциональную связь отношения  $\Gamma$  ( $\Gamma = \delta\Phi/\Delta\Phi$ , где  $\delta\Phi$  – разбалансировка каналов;  $\Delta\Phi$  – сумма сигналов каналов) и коэффициента корреляции  $\rho$  в виде

$$\Gamma = \rho \sigma_{T_c} \sigma_{T_a} \left[ 2 \int_{\delta\nu} T_a T_c d\nu - \rho \sigma_{T_c} \sigma_{T_a} \right]^{-1} \quad (5)$$

Зависимость аппаратной функции  $\Gamma$  от коэффициента корреляции  $\rho$ , который обусловлен внешними параметрами исследуемой среды (влажностью, температурой, давлением, присутствием других газов), нелинейна (5). Содержание паров воды в воздухе изменяется от  $10^{-3}$  до 8% (тропики) [9].

На рис. 1 приведены коэффициенты корреляции, полученные для модельной атмосферной трассы длиной 100 м (содержание в воздухе  $O_2$  – 21%,  $N_2$  – 76–78%,  $CH_4$  – 0–0,2%) при различной удельной влажности воздуха  $r = 0$ –3% (3% – максимальная влажность для средних широт) в области частотных интервалов с волновыми числами  $k = 1250$ – $1350$  (спектральный диапазон в области  $\sim 7,7$  мкм) и  $2900$ – $3100$   $cm^{-1}$  ( $\sim 3,3$  мкм).

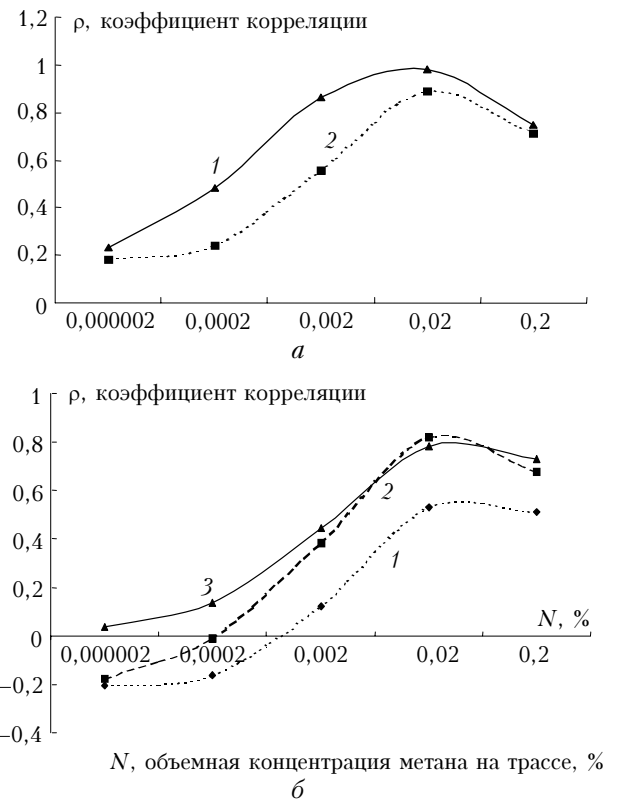


Рис. 1. Зависимость коэффициента корреляции от концентрации метана: а –  $k = 1250$ – $1260$   $cm^{-1}$ ,  $r = 0,3$  (кривая 1), 3% (кривая 2); б –  $k = 1250$ – $1350$   $cm^{-1}$ ,  $r = 0,3$  (кривая 2), 3% (1);  $k = 2900$ – $3100$   $cm^{-1}$ ;  $r = 3\%$  (кривая 3)

Видно, что коэффициент корреляции зависит от влажности воздуха, особенно при выборе ширины анализируемого участка спектра, равного основной полосе поглощения метана ( $1250$ – $1350$   $cm^{-1}$ ).

Таблица 2

$\lambda$ , мкм	$\Delta\lambda$ , мкм	$T$ , К	$P$ , Вт/м <sup>2</sup>	$K_{отр}$	$S_{изл}$ , см <sup>2</sup>
3,3	0,03	300	0,014	0,05	0,77
		2000	3657,82		
		4000	14536,55		
7,7	0,03	300	0,82	0,05	611
		2000	268,55		
		4000	696,98		

Данная зависимость проявляется в появлении отрицательных значений коэффициента корреляции при малом содержании метана на трассе. Регистрируемый на измерительной трассе сигнал становится равным нулю при значениях концентраций метана  $N = 2,5 \div 3N_{\phi}$ , где  $N_{\phi}$  – фоновая концентрация метана в атмосфере ( $N_{\phi} = 1,6$  ppm), что снижает порог минимально обнаружимой концентрации. С целью устранения этого недостатка и, соответственно, повышения порога чувствительности к анализируемому газу нами был проведен анализ спектров паров воды и метана и выделен участок в области  $1250–1260$  см<sup>-1</sup>, в котором наблюдается минимальное взаимное перекрытие линий паров воды и метана. Проведенные расчеты показали, что в данном участке спектра, независимо от влажности воздуха, всегда наблюдается положительная корреляция и порог обнаружения может быть повышен до  $0,5N_{\phi}$ .

Вследствие того что произведение среднеквадратических отклонений  $\sigma_{T_c}$  и  $\sigma_{T_a}$  функций  $T_c(v)$  и  $T_a(v)$  в данном спектральном диапазоне составляет тысячные доли, то и разностный сигнал  $\delta\Phi$  (3) составляет около  $10^{-3}$  от уровня сигналов в каждом канале.

Таким образом, минимально информационный уровень сигналов в каждом канале должен превышать уровень шумов фотоприемной системы на 3 порядка. Это условие определяет минимальный уровень мощности излучения, поступающей на фотоприемники каждого канала радиометра.

В корреляционном радиометре регистрируется одновременно участок спектра, содержащий десятки спектральных линий исследуемых газов, следовательно, источник анализируемого излучения должен обеспечивать необходимую яркость свечения в полосах поглощения этих газов. Этому требованию соответствуют искусственные тепловые источники светового излучения (лампы накаливания, штифт Нернста, глобар, угольная дуга, газоразрядные лампы и т.д.), которые обычно имеют площадь излучающей поверхности не более 1 см<sup>2</sup>. В средней ИК-области спектра излучения (7,5–12 мкм) тепловое излучение любых поверхностей при температуре окружающей среды имеет максимум. При лидарном (прожекторном) зондировании, основанном на регистрации рассеянного излучения удаленной поверхностью, необходимо, чтобы мощность рассеянного зондирующего излучения значительно превышала мощность теплового излучения данной поверхности. При расходимости излучения прожектора  $10^{-2}$  рад площадь сечения светового луча составляет 1 м<sup>2</sup> на расстоянии от источника ~ 25 м.

В табл. 2 приведены значения плотности мощности излучения абсолютно черного тела  $P$  в области 3,3 и 7,7 мкм с шириной спектрального диапазона  $\Delta\lambda = 0,03$  мкм при температуре 300, 2000, 4000 К, а также оценка необходимой площади  $S_{изл}$  источника излучения при температурах 2000, 4000 К, мощности излучения которого в данных спектральных диапазонах, при отражении от поверхности (коэффициент отражения поверхности  $K_{отр} = 0,05$ ), равна мощности теплового излучения черного тела площадью 1 м<sup>2</sup> при температуре 300 К.

Видно, что при активном (лидарном) методе измерений содержания газа в исследуемой среде с помощью корреляционного радиометра необходим тепловой источник излучения со значительной площадью излучения и малой расходимостью луча (для обеспечения минимальной площади отражения от удаленных объектов). Выполнение данных требований затруднительно даже для спектрального диапазона 3,3 мкм, не говоря о более длинноволновом диапазоне.

В ИК-области спектра для газоанализа корреляционным радиометром приемлемыми являются трассовый и пассивный методы измерений. С учетом энергетических характеристик теплового излучения подстилающей поверхности Земли и источников ИК-излучения, а также на основе результатов проведенных расчетов, полагаем, что для трассового метода измерений метана в атмосфере более оптимальной является полоса поглощения метана 3,3 мкм, а для пассивного метода измерений 7,8 мкм. Влияние изменения удельной влажности воздуха в диапазоне 0–3% на регистрируемый сигнал в области  $1250–1350$  см<sup>-1</sup> согласно соотношению (5) не превышает 30%, а в области  $2900–3150$  см<sup>-1</sup> менее 5%. Выделение выбранного узкого спектрального диапазона  $1250–1260$  см<sup>-1</sup> приводит к снижению влияния влажности на регистрируемый сигнал и повышению минимального порога чувствительности измеряемого газа.

Проведенные исследования в области полосы поглощения этана  $790–860$  см<sup>-1</sup> (~ 12 мкм) показали, что влияние влажности воздуха на точность измерения данного газа не превышает 10%.

### 3. Схема ИК-радиометра

На основе полученных результатов теоретических исследований влияния влажности на пороговую чувствительность регистрации концентрации исследуемого газа в зависимости от выбора спектрального диапазона, предлагается схема пассивного ИК-радиометра (рис. 2) для измерений метана и этана на атмосферной трассе с повышенной пороговой чувствительностью.

В качестве источника излучения используется ИК-излучение подстилающей поверхности. Прием и селекция излучения осуществляются с помощью узкополосного селективного фильтра и специальной газовой кюветы с исследуемым газом. Производится одновременно прием по трем каналам: 1-й канал – опорное излучение без газового фильтра; 2-й канал – излучение с газовым фильтром для CH<sub>4</sub>; 3-й канал – излучение с газовым фильтром C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>-этана.

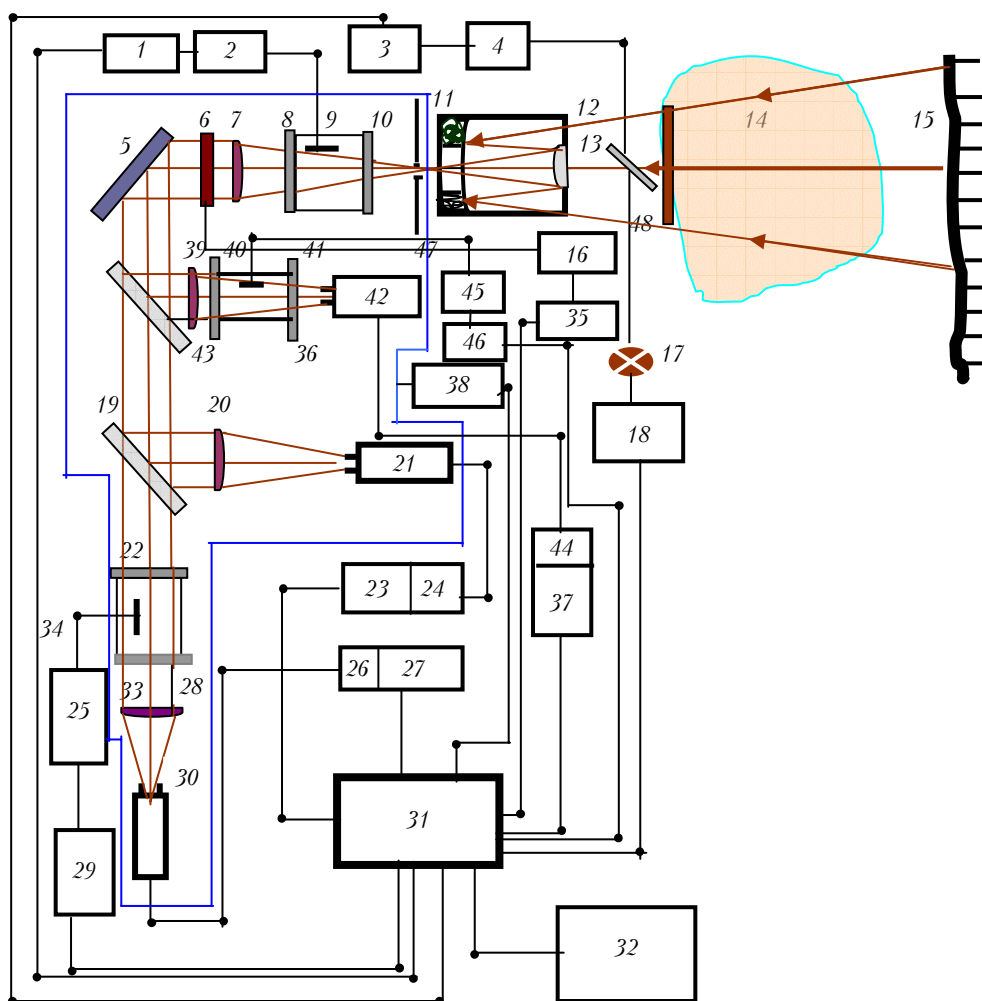


Рис. 2. Принципиальная схема корреляционного ИК-спектроанализатора: 1, 3, 29, 35, 46 – источники питания шаговых электродвигателей; 2, 4, 16, 25, 45 – шаговые электродвигатели; 5, 13 – ИК-зеркала примерно с ~100%-м отражением; 6 – барабан с полосовыми интерференционными фильтрами; 7, 20, 28, 39 – ИК-линзы; 8, 10, 22, 33, 40, 41 – ИК-окна кварцевых кювет; 9 – барабан с калибровочными кварцевыми кюветами с метаном (3 шт.) и этаном (3 шт.); 11 – диафрагма; 12 – ИК-телескоп Кассегрена; 14 – исследуемая среда; 15 – поверхностный источник ИК-излучения (Земля); 17 – калибровочный источник ИК-излучения; 18 – источник питания калибровочного источника; 19, 43 – полупрозрачные ИК-пластины; 21, 30, 42 – ИК-фотоприемники; 24, 26, 44 – усилители; 23, 27, 37 – АЦП; 34, 36 – барабаны с эталонными кюветами этана и метана; 31 – компьютер; 32 – источник питания компьютера; 48 – ИК-окно; 47 – термостат; 38 – источник питания термостата

Использование 3-го канала для этана позволяет однозначно интерпретировать получаемую информацию и оценить долю содержания в воздухе метана биологического происхождения. В отличие от схемы [5], где используется один фотоприемник и производятся последовательные измерения метана и этана, в нашем варианте время измерений может быть доведено до  $10^{-3}$ – $10^{-4}$  с, что повышает оперативность измерений.

Методика измерений состоит в следующем. Регистрируется тепловое излучение земли в ИК-участках спектра, совпадающих с полосами поглощения газов метана (7,8 мкм) и этана (12 мкм). Излучение, сформированное телескопом Кассегрена 12 и ИК-линзами 7, 20, 28, 39, поступает на три различных охлаждаемых ИК-фотоприемника – 21, 30, 42, где производится их регистрация. По двум ка-

налам излучение проходит эталонные кюветы, содержащие метан и этан. Предварительно производятся настройка и калибровка всех каналов на атмосферной трассе.

В отсутствие исследуемых газов на трассе, независимо от условий освещенности земной поверхности, показания прибора нулевые. При утечке газа из трубопровода (или из других источников метана) образуется облако метана с неоднородным распределением концентрации метана. Дополнительное измерение этана, который является одним из компонентов природного газа, позволяет дифференцировать метан природного и биохимического происхождения [5]. Калибровка каналов при измерениях концентрации газов производится с помощью набора калибровочных кювет, находящихся во вращающемся барабане 9, с использованием калибровочного

ИК-источника излучения 17. Калибровочные кривые позволяют определить среднюю по трассе концентрацию измеряемых газов.

Основные технические параметры разработанной нами схемы приведены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3

Параметры корреляционного радиометра	Метан	Этан
$\lambda - \lambda + \Delta\lambda, \text{ см}^{-1}$	1250–1260	790–860
Коэффициент поглощения, $\text{см}^{-1} \cdot \text{МПа}^{-1}$	1,0	1,7
Угловое поле зрения, град	8	8
Оптическая толщина газа эталонных кювет	0,3	0,2
Объемное содержание измеряемого газа в корреляционной кювете, %	20	20
Длина кюветы, см	5	5
Фотоприемник ( $T = 77 \text{ К}$ )	Hg Cd Te	Hg Cd Te
Обнаружительная способность фотоприемника $D, 10^{10} \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{Вт}^{-1}$	1	1
Порог чувствительности газоанализатора, $\text{ppm} \cdot \text{м}$	50	500
Диапазон измеряемых концентраций $\text{CH}_4$ , $\text{ppm}$	0,5–20	5–200
Погрешность измерений, %	15	20

Таким образом, в средней ИК-области спектра для газоанализа корреляционным радиометром приемлемыми являются трассовый и пассивный режимы измерений. Влияние изменения абсолютной влажности воздуха на пороговую чувствительность прибора существенно понижается за счет выбора оптимального спектрального диапазона.

#### 4. Область применения корреляционного радиометра

Разработанная схема корреляционного спектроанализатора с повышенной помехозащищенностью от влаги при освоении серийного выпуска аппаратуры данного типа может найти самое широкое применение в народном хозяйстве и прикладных научных исследованиях: 1) диагностика газопроводов высокого и низкого давления; 2) диагностика газохранилищ, резервуаров, крановых узлов и газораспределительных станций; 3) дистанционный контроль концентрации метана вблизи утечек газа; 4) экологи-

ческий мониторинг в окрестности заводов, газозаправочных станций и др. объектов; 5) экологический мониторинг природных и сельскохозяйственных источников метана.

1. *Дмитриев М.Т., Казина Н.И., Пинигина И.А.* Санитарно-химический анализ загрязняющих веществ в окружающей среде: Справочник. М.: Химия, 1989. 368 с.
2. *Катитанов В.А., Тырышкин И.С., Кривоуццкий Н.П., Пономарев Ю.Н.* Пространственное распределение метана над водной поверхностью оз. Байкал // Оптика атмосфер. и океана. 2004. Т. 17. № 8. С. 617–620.
3. *Карпузииков А.И., Пташник И.В., Романовский О.А., Харченко О.В., Шерстов И.В.* Возможности применения вертолетного лидара на основе излучения перестраиваемого ТЕА  $\text{CO}_2$ -лазера для обнаружения утечек метана // Оптика атмосфер. и океана. 1999. Т. 12. № 4. С. 364–371.
4. *Андреев Ю.М., Гейко П.П., Кабанов М.В.* Лазерный дистанционный измеритель техногенной эмиссии метана // Матер. Юбилейной научно-практ. конф.: «Проблемы и пути эффективного освоения минерально-сырьевых ресурсов Сибири и Дальнего Востока». Томск, 2000. С. 279–282.
5. *Ли (H.S. Lee), Цвик (H.H. Zwick).* Прибор для дистанционного обнаружения течей в газопроводах, основанный на применении газовых светофильтров // Приборы для научных исследований. 1985. № 9. С. 132–149.
6. *Richard R.M.* Cross-Correlating Spectrometer // J. Opt. Soc. Amer. 1968. V. 58. N 7. P. 900–908.
7. *Ward T.V., Zwick H.H.* Gas cell correlation spectrometer: GASPES // Appl. Opt. 1975. V. 14. N 12. P. 2896–2904.
8. *Balandin S.F., Shishigin S.A.* High-sensitive remote detector of hydrocarbon leakages from oil-and-gas pipelines // Intern. Conf. on Opt. Technol. for Atmosph., Ocean and Enviom. Studies (ICOT). Beijing, China. 2004. P. 71–72.
9. *Зуев В.Е.* Распространение видимых и инфракрасных волн в атмосфере. М.: Сов. радио, 1970. 496 с.
10. *Tolton B.T.* A Concept For a Gas-Filter Correlation Radiometer to Remotely Sense the Atmospheric Carbon Dioxide Column from Space // J. Atmosph. and Ocean. Technol. Notes and correspondence. 2004. V. 21. P. 837–852.
11. *Баландин С.Ф.* Исследование распределения относительной погонной концентрации  $\text{NO}_2$  вблизи крупного промышленного центра // Оптика атмосфер. и океана. 2005. Т. 18. № 11. С. 999–1006.
12. *Катитанов В.А., Пономарев Ю.Н.* Измерения эмиссии метана растениями в аэробных условиях лазерным метанометром // Оптика атмосфер. и океана. 2006. Т. 19. № 5. С. 399–403.

*S.F. Balandin, S.A. Shishigin. Humidity dependence of methane and ethane correlation gas-analyzer.*

The present-day gas-analytic remote complexes for detection of local methane anomalies in air are under analysis. An IR correlation methane gas-analyzer is designed; its specifications are presented; correlation coefficients at various air humidities are calculated.