

На правах рукописи

**КАВЕРИН АНДРЕЙ АЛЕКСЕЕВИЧ**

**СНИЖЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ  
АБСОРБЦИОННЫХ ИНФРАКРАСНЫХ ГАЗОАНАЛИЗАТОРОВ**

Специальность 05.11.13 – приборы и методы контроля природной  
среды, веществ, материалов и изделий

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Томск – 2002

Работа выполнена на кафедре экологии и безопасности жизнедеятельности  
Томского политехнического университета

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор В.Ф. Панин

Научный консультант:

кандидат технических наук, доцент М.Э. Гусельников

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор В.Э. Борзых

кандидат технических наук, доцент А.Ф. Пустовойт

Ведущая организация:

Институт Оптики атмосферы Сибирского отделения академии наук  
Российской Федерации (г. Томск)

Защита диссертации состоится « 23 » сентября 2002 г. в 15<sup>00</sup> часов на заседании  
диссертационного совета Д 212.269.09 в Томском политехническом  
университете по адресу: Томск-28, ул. Савиных, 3, корп.18, ауд.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского политехнического  
университета

Автореферат разослан

22.08.2002 г.

Ученый секретарь диссертационного  
Совета, к.т.н., доцент

Б.Б. Винокуров

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность проблемы:

Развитие современной техники и технологий часто требует наличия измерительной техники для контроля состава газовых сред. Анализируемые газовые среды часто имеют широкий температурный диапазон, а имеющийся парк приборов не в состоянии обеспечить требуемую точность измерения в этом интервале. Поэтому актуальной становится проблема нахождения способов снижения температурных погрешностей.

Одним из вариантов решения может быть использование описанных ниже газоанализаторов, предназначенных для контроля содержания газов в сложных смесях.

В работе основное внимание уделено разрабатываемому в ТПУ прибору, позволяющему измерять концентрацию одного компонента в газовых смесях. Принцип действия прибора основан на зависимости коэффициента поглощения инфракрасного (ИК) излучения газами от длины волны этого излучения.

Особенности конструкции газоанализатора позволяют существенно снизить зависимость результатов измерения от содержания в анализируемой смеси неизмеряемых газов. В Томском политехническом университете изготовлены такие приборы для измерений концентраций метана, аммиака, окислов углерода и азота в промышленных выбросах. Однако их широкое внедрение было затруднено зависимостью результата измерения от температуры окружающей среды.

Решение этой проблемы на теоретическом уровне и подтверждение экспериментом позволит повысить качество контроля загрязнения воздушной среды, что является актуальной проблемой.

Также в работе обоснованы способы снижения температурных погрешностей для ИК - газоанализаторов других типов.

### **Цель работы и задачи исследования:**

Цель диссертационной работы состоит в разработке инфракрасного газоанализатора со сниженной чувствительностью к температуре анализируемого объекта.

Для достижения поставленной цели решены следующие основные задачи:

1. Проведена классификация температурных погрешностей отечественных и зарубежных ИК-газоанализаторов;
2. Построена математическая модель влияния температурных погрешностей на результат измерения газоанализатора;
3. Проведен анализ математической модели и выработаны мероприятия для уменьшения влияния температуры анализируемых газов и окружающей среды на результат измерений;
4. Эффективность разработанных мероприятий по снижению температурных погрешностей ИК-газоанализаторов экспериментально проверена с помощью макетного образца. По результатам проведен сравнительный анализ экспериментальных данных и результатов расчетов по математической модели.

### **Методы исследования:**

Проведенные в работе теоретические исследования основаны на использовании основных положений и законов теории измерений, теории информации и теплотехники, методов математической статистики, основ теории матриц, теории спектроскопии и численных методов решения систем уравнений. Для аналитических преобразований полученных математических моделей применялся пакет компьютерных программ Mathematica 4.1 (с) Wolfram Research.

Экспериментальные исследования проводились в лабораториях кафедры экологии и безопасности жизнедеятельности ТПУ и Томской Электронной Компании, выпускающей оборудование газового контроля.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

Разработаны математические модели, описывающие:

- влияние температурных параметров среды на результаты измерений функции поглощения излучения газами,
- зависимость функции поглощения излучения газами с линейными молекулами от их температуры.

Полученные математические модели дали возможность разработать новые технические решения, позволяющие снизить влияние температурных параметров среды на результаты измерений концентраций газов. На данные технические решения подана заявка на выдачу патента РФ.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Математические модели аддитивной и мультипликативной составляющих аппаратных погрешностей ИК-газоанализаторов при изменении температурных параметров среды.

2. Разработанная математическая модель, адекватно описывающая зависимость функции пропускания излучения газами от температуры.

3. Рекомендации по снижению температурных погрешностей абсорбционных газоанализаторов на стадии разработки их оптических схем.

4. Результаты экспериментальных исследований образца разработанного газоанализатора.

**Практическая ценность работы** определяется следующим:

1 Разработаны рекомендации по построению газоанализаторов, позволяющие снизить влияние температуры окружающей среды на результаты измерения функции поглощения излучения газовой смесью, в том числе для газоанализаторов со сканированием по оптической частоте.

2 Разработана математическая модель зависимости поглощения анализируемых газов от температуры, на основании которой предложены технические способы снижения методических погрешностей абсорбционных газоанализаторов.

Предложены и внедрены технические способы снижения аппаратных и методических погрешностей сканирующих по частоте ИК-

3 газоанализаторов. По сравнению с прототипом для диапазона рабочих температур данный прибор имеет в 20 раз меньший порог чувствительности и в 2,7 раза сниженную основную приведенную погрешность измерений.

#### **Реализация результатов работы:**

Материалы проведенного при написании диссертации обзора газоаналитической техники переданы для использования в отдел автоматизации технологических процессов ОАО "ТомскНИПИнефть ВНК", где используются при анализе оборудования газового контроля.

Основные результаты диссертационной работы использованы при создании ИК-газоанализатора со сканированием частоты зондирующего излучения. Использование этих результатов и образца прибора в промышленности отражено в следующих документах:

1. Справка об использовании материалов диссертационной работы в проекте реконструкции нефтебазы "Центральная" ОАО "Красноярскнефтепродукт"
2. Справка об использовании материалов диссертационной работы при анализе оборудования для контроля загазованности
3. Акт о внедрении опытного образца инфракрасного газоанализатора

#### **Апробация работы:**

Материалы исследований и основные результаты работы были доложены и обсуждены на следующих конференциях и симпозиумах:

- IV-я областная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Современные техника и технологии", 1998г.;
- II и III международные научные симпозиумы студентов, аспирантов и молодых ученых имени академика М.А. Усова "Проблемы геологии и освоения недр", 1998г., 1999г.;
- III и IV Всероссийские научно-технические семинары "Энергетика: Экология, Надежность, Безопасность", 1997г., 1998г.;

- V, VII Всероссийская научно-техническая конференция "Энергетика: Экология, Надежность, Безопасность", 1999, 2001г.;

- на научных семинарах кафедры экологии и безопасности жизнедеятельности инженерно-экономического факультета Томского политехнического университета.

По результатам докладов получены диплом и сертификат III международного научного симпозиума студентов, аспирантов и молодых ученых имени академика М.А. Усова в рамках российской научно-социальной программы для молодежи "Шаг в будущее".

#### **Публикации:**

По результатам проведенных исследований опубликовано девять печатных работ.

#### **Структура и объем диссертации:**

Работа состоит из введения, четырех глав и заключения, изложенных на 142 страницах машинописного текста, содержит 21 рисунок, 5 таблиц. Библиографический список содержит 95 наименований. Приложение содержит 2 справки об использовании материалов работы и акт о внедрении.

### КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, отмечены научная новизна, практическая ценность и результаты реализации работы.

**В первой главе** дан обзор газоанализаторов. Отмечена актуальность абсорбционных спектральных методов анализа, основанных на зависимости поглощения излучения газовой смесью от ее состава. Рассмотрены классические спектральные устройства и методы анализа газообразных веществ. Проанализирована обработка входных сигналов фотоприемников в газоанализаторах, а также оптимизация способов обработки промодулированных сигналов в газоанализаторах непосредственного отсчета.

Типовая схема абсорбционного газоанализатора с механическим модулятором зондирующего излучения, основным и дополнительным опорным измерительными каналами приведена на рис.1.

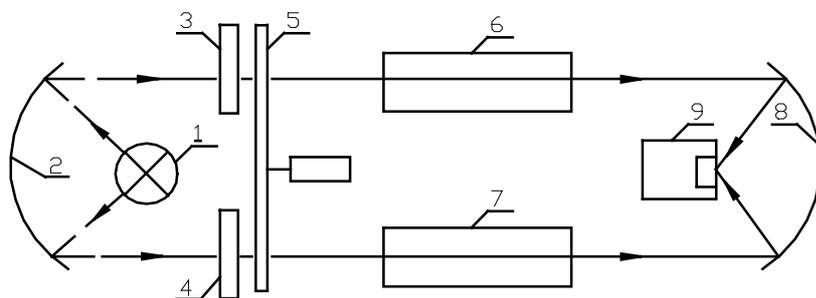


Рис.1. Дифференциальная симметричная схема фильтрового газоанализатора:

1 – источник излучения; 2 – отражатель; 3,4 – оптические фильтры; 5 – модулятор; 6 – рабочая кювета; 7 – опорная кювета; 8 – фокусирующая система; 9 – приемник излучения.

В результате проведенного поиска выявлены следующие известные способы снижения температурных погрешностей при абсорбционном анализе:

1. Термостатирование прибора и анализируемой газовой смеси. Этот способ увеличивает габариты, массу, энергопотребление измерительных приборов, снижает их быстродействие из-за увеличения времени пробоподготовки.
2. Использование в схемах операции отношения аналитического сигнала к сигналу опорного канала позволяет устранить аппаратные составляющие температурных погрешностей, однако зависимость функции поглощения излучения газами от их температуры в данных схемах не учитывается. В схемах существуют проблемы создания основного и рабочего измерительных каналов с идентичными температурными зависимостями параметров. Например, при изготовлении газоанализаторов ГИАМ-6 производится подбор элементов каналов в пары по специальной методике, что усложняет процесс производства

3. Экспериментальное определение зависимости выходного сигнала прибора от температуры окружающей среды с последующей компенсацией погрешности измерения при помощи встроенного компьютерного устройства. Так как зависимости поглощения излучения газами от температуры чрезвычайно разнообразны, имеют явно нелинейный характер, могут быть как убывающими, так и для "горячих полос" возрастающими функциями, теоретическое обоснование данного способа снижения температурных погрешностей отсутствует. Вид функции зависимости выходного сигнала от температуры не определен, что приводит к необходимости проведения большого числа экспериментов на стадиях разработки газоанализаторов, вынуждает изготовителей приборов, часто не всегда оправданно, проводить большое число измерений на стадии настройки и калибровки приборов.

Выше изложенное позволяет сделать вывод об актуальности выбранной темы исследования и разделить всю работу на следующие части:

1. Исследование аппаратурных составляющих температурной погрешности результатов измерений методами абсорбционного контроля. Составление математических моделей аппаратурных составляющих погрешности, их анализ и выработка предложений по их снижению.

2. Исследование зависимости функций пропускания излучения газами от их температуры. Составление математической модели температурной зависимости функций пропускания, ее исследование и выработка технических решений по компенсации влияния температуры газов на результаты измерения их концентраций абсорбционными методами.

3. Экспериментальные исследования эффективности предложенных технических решений.

Во второй главе приведена классификация температурных погрешностей инфракрасных газоанализаторов, как аппаратурных:

изменение потока излучения от излучателя к приемнику при изменении температуры окружающей среды, изменение коэффициента пропускания излучений элементами оптического блока (влияние пропускания окон, зависимость пропускания светофильтра от температуры), изменение коэффициента отражения деталей оптического блока, зависимость излучения "стенки кюветы - приемник" от температуры, температурные погрешности приемника излучения, изменение угла сканирования ИК - фильтра; так и методических: влияние температуры на пропускание газом ИК - излучения.

В качестве модели для численной оценки влияния температурных параметров окружающей среды на детали оптического блока использовалась схема, представленная на рис.2.

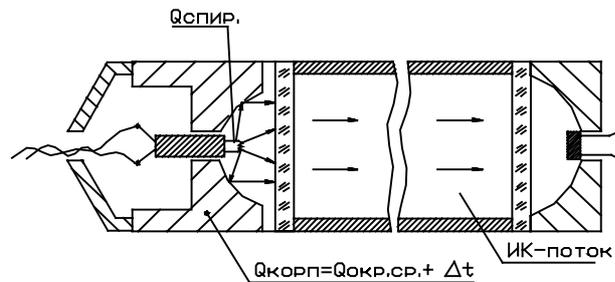


Рис. 2. Модель для составления уравнения теплового баланса.

Уравнение теплового баланса схемы рис.2 для спирали излучателя имеет вид:

$$q_{эл.} = q'_{тп.} + q_{тп.} + q_{конв.} + q_{ли.}, \quad (1)$$

где:  $q_{эл.}$  - подводимая к источнику излучения энергия, которая идет на создание ИК излучения  $q_{ли.}$ , на нагрев корпуса прибора теплопроводностью через воздух  $q_{тп.}$ , теплопроводностью через токоподводящие контакты  $q'_{тп.}$  и конвективным теплообменом  $q_{конв.}$ .

Анализ выражения (1) позволяет сделать вывод о существенной зависимости мощности зондирующего излучения от температуры деталей схемы рис.1.

По результатам анализа схем абсорбционных газоанализаторов с использованием интерференционных фильтров для выделения требуемых частот зондирующего излучения, исследования их математической модели и с учетом теоретических основ расчета тепловых преобразователей сделаны следующие выводы:

1. С увеличением температуры окружающей среды мощность потока ИК-излучения также увеличивается. При этом значение приращения составляет примерно  $(0,3 - 0,4) * 10^{-3} \text{ ВтК}^{-1}$ , или в процентах от диапазона  $\Delta t = 50^{\circ}$  равняется 31%. Степень отклонения этого отклонения от линейной зависимости до 4,6%.
2. С повышением температуры интерференционного фильтра его параметры изменяются: происходит сдвиг длины волны  $\lambda_0$  (максимальное пропускание) в длинноволновую область спектра, а с понижением – в коротковолновую.
3. Полуширина и максимальное пропускание интерференционного фильтра практически постоянны при изменении температуры.
4. Функция пропускания излучения газовой смесью и ее температура в диапазоне от  $-50$  до  $+50^{\circ}\text{C}$  при давлении 760 мм.рт.ст. для линейных молекул связаны зависимостью, близкой к обратно пропорциональной.

**В третьей главе** приведены общие сведения о спектроскопии, описан спектр линии поглощения излучения молекулами газов, зависимость интенсивности линии поглощения от температуры, а также освещены вопросы природы колебательно-вращательных полос поглощения излучения, в том числе: колебательные движения молекул, вращательные движения молекул, интенсивности колебательно-вращательных полос поглощения излучения газами. По результатам анализа спектроскопических теорий разработана математическая модель зависимости функции поглощения излучения газами от их температуры. Математический анализ основывался на методе моделей спектров поглощения.

Суть методов моделей спектров поглощения состоит в моделировании спектров атмосферных газов набором линий поглощения одинаковой ширины при предположении об определенном законе их расположения и интенсивности.

По результатам литературного обзора и анализа математических выражений, описывающих процессы поглощения излучений ИК-диапазона газами, можно сделать следующие выводы о зависимости спектров поглощения газов от их температуры:

1. Спектры поглощения ИК-излучения газами состоят из групп близко расположенных линий. Группу таких линий называют полосой поглощения излучения.

2. Ширина линии поглощения излучения газом пропорциональна корню квадратному его температуры.

3. На зависимость интенсивности линии поглощения излучения газом от его температуры влияет тип газа и длина волны центра линии. С ростом температуры интенсивность линии чаще всего снижается, но возможен и ее рост. Для простейшего случая линейных молекул зависимость интенсивности  $S_m$  линий поглощения от длины волны  $\nu$  и температуры  $T$  описывается выражением

$$\frac{S_m}{S_0} \approx (\nu - \omega_0) \frac{hC}{2kT} \exp\left[-\frac{hC}{4kTB}(\nu - \omega_0)^2\right], \quad (2)$$

где:  $\nu = 2Bm + \omega_0$ ;  $m$  - величина, принимающая только целочисленные значения;  $B$  - вращательная постоянная молекулы.

4. Интенсивность полосы поглощения излучения газами в ИК-диапазоне в большинстве случаев снижается при росте температуры газа. Для наиболее интенсивных полос эта зависимость описывается выражением:

$$N_0 = \frac{NPT_0}{TP_0[1 + \exp\{hC\omega_e(1 - 2\chi_e)/(kT)\}]}, \quad (3)$$

где  $P_0$  и  $T_0$  - давление и температура, при которых число основных населенных уровней молекул газа равно  $N$ . Для "горячих полос" ( $\Delta\varepsilon = \varepsilon_{\nu=2} - \varepsilon_{\nu=1} = \omega_e(1 - 4\chi_e)$ ,  $\text{см}^{-1}$ ) возможно увеличение интенсивности полосы с ростом температуры анализируемого газа.

5. Место положения на оси частот центра полосы поглощения ИК-излучения газами для инженерных расчетов можно считать неизменным для диапазона температур от  $-50^{\circ}\text{C}$  до  $+50^{\circ}\text{C}$ .

6. Интенсивность линий поглощения излучения в полосе ИК - спектра зависит от удаленности линий от центра полосы и от температуры анализируемого газа. Зависимость выражается формулой (2).

7. Для инженерных расчетов в простейшем случае линейных молекул для наиболее интенсивной полосы поглощения, соответствующей 1 обертону, зависимость функции поглощения излучения от температуры анализируемой газовой смеси и от концентрации компонента смеси описывается системой выражений (4) и (5).

$$A(\nu, T) = 1 - \exp\left[-\frac{-S_m(\nu, T)}{2B\sqrt{1 + \frac{S_m(\nu, T) * C_{\Gamma} l}{\pi\delta(T)}}}\right], \quad (4)$$

где:  $C_{\Gamma}$  - концентрация определяемого газа;  $l$  - длина хода лучей в газе;

$\delta(T) = \delta_0 \sqrt{\frac{T}{T_0}}$ ;  $S_m(\nu, T)$  из выражений (3) и (4) можно определить как

$$S_m = \frac{S_0 P T_0 (\nu - \omega_0) h C}{2kT^2 P_0 \left\{1 + \exp\left[\frac{hC\omega_e(1 - 2\chi_e)}{kT}\right]\right\}} \exp\left[-\frac{hC}{4kTB}(\nu - \omega_0)^2\right], \quad (5)$$

где  $S_0$  - интегральная интенсивность полосы при температуре  $T_0$  и давлении  $P_0$ .

Эта система выражений не имеет аналитического решения относительно исконой концентрации  $C_{\Gamma}$ . Ее нахождение по измеренным значениям функции поглощения  $A(\nu, t)$  и температуры  $T$  возможно лишь численными методами.

**В четвертой главе** разработаны способы снижения температурных погрешностей абсорбционных инфракрасных газоанализаторов, в том числе: мультипликативной составляющей аппаратных тепловых погрешностей, аддитивной составляющей аппаратных тепловых погрешностей, методических погрешностей абсорбционных газоанализаторов.

Исследования позволили сформулировать следующие правила повышения точности измерений функции поглощения излучения газовой смесью:

1. Изменения температурных параметров среды вызывают значительные погрешности результатов измерений абсорбционных газоанализаторов. Все эти погрешности относительно измеряемой концентрации газов разделяются на мультипликативные и аддитивные.
2. Аддитивная составляющая аппаратурной погрешности при измерении значений функции поглощения излучения газовой смесью вызывается изменением параметров основного и дополнительного измерительных каналов. Она снижается при вычислении разности сигналов этих каналов. Обязательным условием такого снижения погрешности является идентичность изменения характеристик каналов при изменениях температуры среды.
3. В ГА со сканированием оптической частоты зондирующего излучения аддитивная составляющая погрешности, вызываемая изменениями параметров измерительного тракта, ничтожно мала по сравнению с составляющей, вызываемой проецированием на приемник зеркальной поверхностью качающегося интерференционного фильтра участков оптического блока с изменяющейся в пространстве и времени температурой. Установка перед приемником бленды в виде жалюзи позволяет снизить данную погрешность более чем в 10 раз.
4. Для снижения аппаратурной части мультипликативной составляющей, вызываемых изменениями среды, погрешностей при синтезе оптических схем абсорбционных газоанализаторов необходимо вводить дополнительные (опорные) измерительные каналы, отвечающие следующим требованиям:
  - 4.1. Основной и дополнительный измерительные каналы должны иметь возможно большее число общих элементов.
  - 4.2. Спектральные коэффициенты поглощения излучения анализируемым газом в основном и дополнительном измерительных каналах должны существенно различаться.

4.3. Изменения оптических характеристик основного и дополнительного измерительных каналов в основном и дополнительном спектральных интервалах при изменениях температуры окружающей среды должны быть идентичны.

Инвариантность результатов измерений к мультипликативным составляющим погрешностей достигается вычислением отношения сигнала основного измерительного канала к сигналу опорного канала.

Для газоанализаторов с интерференционными фильтрами, которые не способны выделить одну линию спектра, требования п.п. 4.2 и 4.3 противоречивы. Усиление требований п.4.2 приводит к схеме ГА, описанного в работах М.Э. Гусельникова, а усиление требований п.4.3 - к схеме ГА со сканированием оптической частоты зондирующего излучения, которая обладает более простой конструкцией и повышенной информационной способностью. Схема которого представлена не заштрихованной частью рис.3.

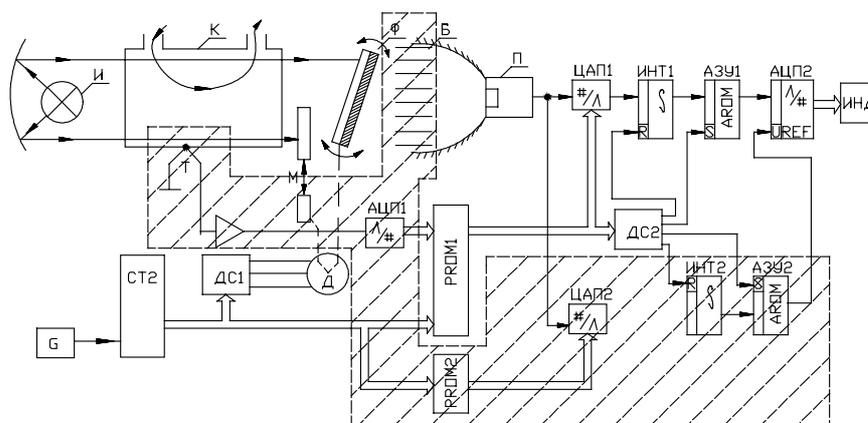


Рис. 3. Функциональная схема газоанализатора ФГА-1М.

Дальнейшая часть четвертой главы посвящена разработке экспериментального образца инфракрасного газоанализатора, максимально отвечающего выше изложенным требованиям. Функциональная схема образца представлена на рис.3. Она разработана на основе газоанализатора ФГА 1. Добавленные в схему элементы заштрихованы. Для

снижения аддитивной составляющей погрешности средств измерения в схему добавлена бланда Б. Мультипликативная составляющая данной погрешности снижается путем введения дополнительного опорного канала, состоящего из: модулятора М; синхронного детектора, выполненного из постоянного запоминающего устройства PROM2, умножающего цифро – аналогового преобразователя ЦАП2, интегрирующего устройства ИНТ2, аналогового запоминающего устройства АЗУ2. Деление сигнала основного измерительного канала на сигнал опорного канала осуществляется при помощи аналого – цифрового преобразователя АЦП2. Результат выводится на цифровой индикатор ИНД.

Для снижения методической составляющей температурной погрешности возможно использование полученных в 3 главе выражений (4) и (5). Однако это приведет к существенному усложнению ГА. Поэтому в предлагаемом простом недорогом приборе проще использовать табличный процессор, выполненный на базе датчика температуры Т, АЦП1 и постоянного запоминающего устройства PROM1. Этот процессор устанавливает коэффициенты преобразования измеренного значения функции поглощения излучения газом в зависимости от ее величины и от температуры анализируемой газовой смеси.

Проведенные испытания представленного на рис.3 инфракрасного абсорбционного газоанализатора позволили сделать следующие выводы:

1. Проверка полученной в работе математической модели зависимости функции поглощения излучения оксидом углерода от его концентрации и температуры показала адекватность выражений (4, 5);
2. В результате применения результатов выполненных в работе исследований удалось улучшить следующие метрологические характеристики ранее разработанного в ТПУ ГА ФГА-1 со сканированием оптической частоты зондирующего излучения:
  - 2.1. Порог чувствительности в диапазоне температур от  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+40^{\circ}\text{C}$  от 0,1 %об. до 0,005 %об. (в 20 раз);
  - 2.2. Основная приведенная погрешность измерения для температур от  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+40^{\circ}\text{C}$  от 26 % до 9,5 % (в 2,7 раза)

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из результатов проведенных теоретических и экспериментальных исследований, позволивших развить методы расчета и проектирования абсорбционных инфракрасных газоанализаторов с интерференционными фильтрами, вытекают следующие наиболее важные выводы:

1. Наиболее весомый вклад при измерениях концентрации газа абсорбционными методами вносят следующие погрешности:

Аппаратурная аддитивная составляющая погрешности, вызываемая дрейфами температурных параметров среды;

Аппаратурная мультипликативная составляющая температурных погрешностей;

Методическая погрешность, вызываемая нелинейной зависимостью функции поглощения излучения газовой смесью не только от ее состава, но и от ее температуры.

2. Аппаратурная аддитивная составляющая температурной погрешности абсорбционных газоанализаторов для многоканальных схем преимущественно обусловлена неидентичностью вызываемых дрейфом температуры изменений оптических параметров основного и дополнительного измерительных трактов. В схеме газоанализатора со сканированием частоты зондирующего излучения данная погрешность преимущественно обусловлена проецированием на приемник зеркальной поверхностью качающегося интерференционного фильтра излучений от участков оптического блока с изменяющейся в пространстве и времени температурой.

3. Аппаратурная мультипликативная составляющая температурных погрешностей инфракрасных газоанализаторов снижается путем вычисления отношения сигналов основного и дополнительного измерительных каналов, в том числе вызываемой измерениями в различающихся спектральных интервалах. При реализации данного метода газоанализаторы со сканированием частоты зондирующего излучения имеют преимущество,

обусловленное идентичностью всех элементов и спектрального интервала основного и дополнительного измерительных каналов.

4. Для анализа методических погрешностей абсорбционных газоанализаторов была разработана математическая модель зависимости функции поглощения излучения газами от их концентрации и температуры. Для случая газов с линейными молекулами (оксида углерода) проведено экспериментальное подтверждение адекватности разработанной модели. Анализ полученной модели показал невозможность ее аналитического разрешения относительно измеряемой концентрации газа. Поэтому показана возможность применения табличных процессов для снижения температурных составляющих методических погрешностей. Этот процессор должен устанавливать коэффициент преобразования основного измерительного тракта в зависимости от измеренных значений функции поглощения излучения газовой смесью и от ее температуры.

5. Абсорбционный инфракрасный газоанализатор со сканированием частоты зондирующего излучения имеет большую информационную способность, более прост и дешевле по сравнению с многоканальными схемами. Поэтому его совершенствование более перспективно. Для снижения аппаратных составляющих температурных погрешностей результатов измерения предложено дополнить данную схему специальной блендой в виде жалюзи и механическим модулятором мощности зондирующего излучения. Предложено и проанализировано несколько вариантов бленд и способов модуляции, оценена их эффективность.

6. Проверка эффективности разработанных средств снижения температурных погрешностей абсорбционных газоанализаторов проведена путем модернизации образца газоанализатора со сканированием частоты зондирующего излучения в соответствии с выработанными предложениями. Испытания модернизированного газоанализатора показали, что внедрение предложений позволили снизить аппаратную составляющую температурной погрешности в 20 раз, а ее методическую составляющую в 2,7 раза.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Гусельников М.Э., Извеков В.Н., Каверин А.А. Дегазатор буровых растворов на нефтяной основе // Энергетика: Экология, Надежность, Безопасность: Материалы третьего Всероссийского научно-технического семинара. - Томск: Изд-во ТПУ, 1997, с. 94-95
2. Иванова М.М., Каверин А.А. Доработка ИК газоанализатора ФГА-1 для измерения концентрации окислов азота в выбросах котельных // Безопасность - 98: Материалы конференции молодых ученых и студентов. - Иркутск: Изд-во ИГТУ, - 1998, с. 48-50
3. Каверин А.А., . Газоанализатор метана // Проблемы геологии и освоения недр: Материалы докладов Второй Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых им. академика М.А. Усова. - Томск: Изд-во НТЛ, 1998, с. 144-145
4. Каверин А.А., Гусельников М.Э. Сканирующий по частоте инфракрасный газоанализатор с малыми тепловыми дрейфами показаний // Современные техника и технологии: Материалы IV-й областной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых - Томск: Изд-во ТПУ, 1998, с.101-103
5. Каверин А.А., Гусельников М.Э. Способы снижения температурных погрешностей при спектральном анализе чистоты атмосферы и промышленных выбросов // Энергетика: Экология, Надежность, Безопасность: Материалы четвертого Всероссийского научно-технического семинара. - Томск: Изд-во ТПУ, 1997, с. 239-240
6. Коркин А.М., Каверин А.А. Дегазатор буровых растворов на нефтяной основе // Проблемы геологии и освоения недр: Материалы докладов Второй Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых им. академика М.А. Усова. - Томск: Изд-во НТЛ, 1998, с. 146
7. Каверин А.А., Гусельников М.Э. Газоанализатор для очистки выбросов от окислов азота // Энергетика: Экология, Надежность, Безопасность: Материалы пятой Всероссийской научно-технической конференции. - Томск: Изд-во ТПУ, 1999, с. 239-240

8. Каверин А.А., Гусельников М.Э. Оценка аппаратурных температурных погрешностей при спектральном анализе выбросов ТЭС // Энергетика: Экология, Надежность, Безопасность: Материалы пятой Всероссийской научно-технической конференции. - Томск: Изд-во ТПУ, 1999, с. 242-244
9. Каверин А.А., Гусельников М.Э. Инфракрасный газоанализатор для контроля загазованности рабочей зоны // Автоматизация и информационное обеспечение технологических процессов в нефтяной промышленности. - Сб. трудов НПФ "Геофит" ВНК. - Томск: Изд-во Том. Ун-та, 2000, с. 260-264