

На правах рукописи
УДК 621.373.826; 535.34; 543.4

Городничев Виктор Александрович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ
ЛАЗЕРНОГО ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ
ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ СОСТАВЛЯЮЩИХ РАКЕТНЫХ ТОПЛИВ И
ДРУГИХ ТОКСИЧНЫХ ВЕЩЕСТВ**

05.11.07 - Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук



Москва - 2009

21

Работа выполнена в Научно-исследовательском институте радиоэлектроники и лазерной техники Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана.

Официальные оппоненты: Доктор физико-математических наук, профессор
Самохвалов И.В.
Доктор технических наук, профессор
Юдин В.И.
Доктор технических наук, профессор
Пахомов И.И.

Веду: **У1882703** Городничев В.А. мониторинга климатических и
Разработка методов и оптико истем (ИМКЭС СО РАН), г. Томск
-электронных средств
лазерного оперативного
контроля многокомпонентн...
2009 0-00
4» июня 2009 г. в 10:00 часов на
Д212.141.19 в Московском
гос. техн. ун-те им. Н.Э. Баумана по адресу:

засед
подпис

У 1882703

ВОЗВРАТИТЕ КНИГУ НЕ ПОЗЖЕ
обозначенного здесь срока

енный гербовой
005, г. Москва,
ному секретарю

Н.Э. Баум



1882703
Городничев В.А. Разработка

Е.В. Бурый

1623

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В настоящее время актуальна проблема контроля загрязнения атмосферы компонентами ракетных топлив (КРТ) и другими токсичными веществами, опасными не только для здоровья человека, но и для всего окружающего животного и растительного мира. При проведении пусков ракетно-космических носителей (РКН) на испытательных полигонах и космодромах, в районах падения ступеней РКН и местах аварий в атмосфере выбрасываются высокотоксичные газообразные компоненты ракетных топлив и сопутствующие газы. В связи с этим актуальной становится проблема обеспечения безопасности инженерно-технического, обслуживающего персонала и населения в местах пуска РКН и прилегающих районах, а также на территориях, расположенных вблизи предприятий химического машиностроения.

Для успешного решения данной проблемы необходим постоянный оперативный контроль уровня содержания КРТ, сопутствующих газов и других токсичных газовых загрязнителей в атмосфере в местах разработки, создания и проведения испытаний объектов ракетной техники, пуска РКН и прилегающих районах и других зонах риска.

Газовые выбросы КРТ, сопутствующих газов и других токсичных газовых загрязнителей эффективно обнаруживаются в атмосфере лазерными методами, вследствие высокой информативности эффектов взаимодействия оптических волн с молекулами загрязняющих газов. Состав выбросов КРТ и сопутствующих газов является многокомпонентным, к тому же в атмосфере всегда присутствуют фоновые газы, мешающее воздействие которых необходимо учитывать при проведении измерений.

Использование перестраиваемых лазеров дает возможность, применяя многоспектральные измерения и метод дифференциального поглощения (ДП), определять при дистанционных измерениях (с отражением зондирующего лазерного излучения от расположенного на фиксированном расстоянии отражателя либо от атмосферных аэрозолей) или при локальных измерениях (использующих отбор проб воздуха и их дальнейший анализ методами лазерной спектроскопии) концентрации газовых компонент даже в случае, когда их спектры поглощения перекрываются.

Существенные изменения в составе и содержании атмосферных газовых примесей, иногда превосходящие их естественные вариации, вносит хозяйственная деятельность человека. Более того, в атмосферу поступает большое количество газов, которые в природе не встречаются. Для их обнаружения необходим постоянный оперативный контроль за экологическим состоянием атмосферы в крупных промышленных регионах и других зонах риска.

Традиционные химические методы измерений не позволяют проводить оперативный мониторинг газовых загрязнителей в атмосфере над большими пространственными площадями. Кроме того, время измерения и обработки

данных составляет от десятков минут до нескольких часов, что не удовлетворяет практическим требованиям по оперативности измерений.

Задача оперативного контроля многокомпонентных газовых загрязнений атмосферы может быть решена только с помощью лазерных методов, обеспечивающих получение необходимой информации с высокой точностью и оперативностью и позволяющих отслеживать динамику распространения газовых компонент (в том числе и над большими пространственными площадями).

В течение последних десятилетий работы в области экологического мониторинга атмосферы проводились во многих научных организациях в России и за рубежом. В частности в России данной проблемой занимались (в некоторых организациях продолжают заниматься и в настоящее время) в Институте оптики атмосферы СО РАН (г. Томск), в Военной академии радиационной, химической и биологической защиты им. С.К. Тимошенко (ВА РХБЗ, г. Москва), в Институте оптического мониторинга СО РАН (г. Томск), в Институте общей физики им. А.М. Прохорова (ИОФ) РАН (г. Москва), в НПО «ЗЕНИТ» (г. Зеленоград), в Московском инженерно-физическом институте (государственном университете) (МИФИ, г. Москва), НИИ РЛ МГТУ им. Н.Э. Баумана (г. Москва) и других.

К настоящему времени разработаны лазерные методы и приборы для контроля газовых загрязнений атмосферы. Однако они позволяют проводить, как правило, газоанализ либо отдельных компонент, либо малокомпонентных смесей (с числом компонент не более 5). К тому же задача количественного анализа многокомпонентных (с числом компонент 6 и более) газовых смесей до конца не решена, многие теоретические и технические вопросы остаются не ясными. Основной проблемой многокомпонентного лазерного газоанализа является сложность решения обратной задачи и, как следствие, отсутствие апробированных методов определения концентраций газов в многокомпонентных смесях.

Таким образом, проблема разработки и создания методов и средств лазерного оперативного контроля многокомпонентных газовых загрязнений атмосферы составляющими ракетных топлив и другими токсичными веществами является актуальной.

Цель работы и задачи исследований

Цель работы - разработка методов оперативного количественного анализа многокомпонентных газовых смесей по данным многоспектральных лазерных измерений и создание на их основе лазерной аппаратуры для локального и дистанционного контроля концентраций загрязнений атмосферы составляющими ракетных топлив и другими токсичными веществами.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Разработан метод поиска набора спектральных каналов измерения (НСКИ) для оперативного определения количественного состава многокомпонентных газовых смесей.

2. Разработан метод определения количественного состава многокомпонентных газовых смесей по результатам многоспектральных лазерных измерений, основанный на процедуре подбора квази решений для некорректных математических задач и использовании генетического алгоритма поиска.

3. Разработан метод определения количественного состава многокомпонентных газовых смесей по результатам многоспектральных лазерных измерений, основанный на процедуре регуляризации Тихонова и использовании различных способов выбора параметра регуляризации.

4. Разработан макетный образец малогабаритного автоматизированного измерительного комплекса на основе лазерного оптико-акустического газоанализатора (ЛОАГ) и исследованы его возможности для локального экспресс-контроля многокомпонентных газовых смесей, в том числе загрязнений атмосферы составляющими ракетных топлив и другими токсичными веществами.

5. Разработан экспериментальный образец инфракрасного (ИК) лидара ДП на основе параметрического генератора света (ПГС) на кристалле селенистого кадмия (CdSe) со спектральными диапазонами плавной перестройки 3,8...4,6 мкм и 8...13 мкм и исследованы его возможности для дистанционного контроля концентраций многокомпонентных смесей составляющих ракетных топлив и других токсичных веществ в атмосфере.

6. Проведены экспериментальные исследования с целью апробации разработанных методов оперативного поиска НСКИ и определения количественного состава многокомпонентных газовых смесей по результатам многоспектральных локальных и дистанционных лазерных измерений.

Методы исследований

При решении поставленных задач использовались теория лазерного газоанализа, методы решения некорректных математических задач, методы теории вероятностей, аппарат генетического метода поиска экстремумов функции многих переменных, методы математического моделирования.

Научная новизна исследований

В процессе проведения исследований получены следующие новые научные результаты теоретического и прикладного характера:

1. Разработан новый метод определения НСКИ (на основе квазиоптимального критерия поиска) для оперативного лазерного анализа многокомпонентных газовых смесей, позволивший сократить время поиска НСКИ на 2...3 порядка по сравнению с известными методами.

2. Разработан новый метод определения концентраций газов в многокомпонентных смесях, основанный на процедуре подбора квази решений для некорректных математических задач и использовании генетического алгоритма поиска. Метод не нуждается в дополнительной информации и позволяет, как правило, с точностью от единиц процентов до

30...40 процентов находить концентрации компонент газовых смесей, однако требует большого объема вычислений.

3. Разработан новый метод определения концентраций газов в многокомпонентных смесях, основанный на процедуре регуляризации Тихонова и использовании различных способов выбора параметра регуляризации. Метод не требует большого объема вычислений, но нуждается в дополнительной информации и его точность несколько хуже (по экспериментальным данным примерно на 10 процентов) точности метода квази решений. Наименьшие погрешности обеспечивают выбор квазиоптимального параметра регуляризации, модифицированный метод невязки и метод невязки при использовании дополнительной независимой информации.

4. Результаты исследований экспериментального образца инфракрасного лидара дифференциального поглощения с излучателем на основе параметрического генератора света на кристалле селенистого кадмия со спектральными диапазонами плавной перестройки 3,8...4,6 мкм и 8...13 мкм, открывающие возможность разработки лазерной аппаратуры для дистанционного контроля концентраций широкой номенклатуры газов в многокомпонентных смесях составляющих ракетных топлив и других токсичных веществ в атмосфере.

5. Результаты экспериментальной апробации разработанных методов поиска НСКИ и определения количественного состава многокомпонентных газовых смесей (в том числе КРТ) по результатам многоспектральных локальных и дистанционных лазерных измерений.

Научные положения, выносимые на защиту

1. Метод определения спектральных каналов измерения для оперативного лазерного анализа многокомпонентных газовых смесей, позволяющий сократить время поиска спектральных каналов измерения на 2...3 порядка, по сравнению с известными методами.

2. Метод определения концентраций газов в многокомпонентных смесях, основанный на процедуре подбора квази решений для некорректных математических задач и использовании генетического алгоритма поиска, не нуждающийся в дополнительной информации и позволяющий с точностью от единиц процентов до 30...40 процентов находить концентрации компонент в газовых смесях.

3. Метод определения концентраций газов в многокомпонентных смесях, основанный на процедуре регуляризации Тихонова и использовании различных способов выбора параметра регуляризации, не требующий большого объема вычислений и позволяющий с точностью от единиц процентов до 40...50 процентов находить концентрации компонент в газовых смесях, причем наименьшие погрешности обеспечиваются при выборе квазиоптимального параметра регуляризации и выборе параметра регуляризации модифицированным методом невязки и методом невязки с использованием дополнительной независимой информации.

4. Применение в инфракрасном лидаре дифференциального поглощения параметрического генератора света, непрерывно перестраиваемого в спектральных диапазонах 3,8...4,6 мкм и 8...13 мкм, позволяет с использованием разработанных новых методов проводить измерения более широкой, по сравнению с известными лидарами, номенклатуры газов в многокомпонентных смесях составляющих ракетных топлив и других токсичных веществ в атмосфере.

5. Результаты экспериментальной апробации разработанных методов поиска спектральных каналов измерения и определения количественного состава многокомпонентных газовых смесей по результатам многоспектральных лазерных измерений измерительным комплексом на основе лазерного оптико-акустического газоанализатора и инфракрасным лидаром дифференциального поглощения.

Практическая значимость работы

Результаты диссертационной работы могут быть использованы при разработке и создании образцов приборов для экологического мониторинга атмосферы, в том числе:

1. Для локального оперативного контроля многокомпонентных газовых загрязнителей атмосферы (в том числе компонент ракетных топлив и других токсичных веществ) - лазерных оптико-акустических газоанализаторов.

2. Для дистанционного оперативного контроля многокомпонентных загрязнителей атмосферы (в том числе компонент ракетных топлив и других токсичных веществ) - ИК лидаров дифференциального поглощения.

Реализация и внедрение результатов исследований

Результаты диссертационной работы использованы при выполнении 16 научно-исследовательских работ, выполненных в НПО «Зенит» (г. Зеленоград) и в НИИ РЛ МГТУ им. Н.Э. Баумана по заказам МО СССР и МО РФ в 1983 - 2005 гг.

Экспериментальный образец ИК лидара и макетный образец измерительного комплекса на основе лазерного оптико-акустического газоанализатора созданы под руководством и при непосредственном участии автора диссертации. Лидар введен в эксплуатацию на предприятии НИИ ХИММАШ (г. Пересвет Сергиево-Посадского района Московской области) в качестве оперативного средства дистанционного контроля концентраций газовых компонент в атмосфере производственной зоны.

Материалы диссертационной работы используются в учебном процессе кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана в курсах «Проектирование лазерных систем экологического мониторинга» и «Лазерные приборы локального экомониторинга».

Апробация результатов работы

Основные результаты работы докладывались на 27 Всесоюзных, Российских и Международных симпозиумах и конференциях.

Публикации

Основные научные результаты диссертации опубликованы в 4 монографиях и 30 научных статьях в центральных научно-технических журналах и тематических сборниках, 24 из которых входят в Перечень, утвержденный ВАКом. На новую конструкцию параметрического генератора света получено авторское свидетельство.

Личный вклад автора.

В настоящей работе обобщены результаты теоретических и экспериментальных исследований, выполненных лично автором, при его непосредственном участии или под его руководством.

Автору диссертации принадлежит постановка и научная разработка проблемы в целом. Автором сформулированы конкретные исследовательские задачи, разработаны новые методы газоанализа, проведены разработка и экспериментальные исследования образцов лазерной аппаратуры. Соавторство, в основном, относится к практической реализации и выполнении части экспериментальных исследований.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, общих выводов и списка цитируемой литературы, включающего 171 наименование. Общий объем работы - 301 страница машинописного текста, включая 94 рисунка и 18 таблиц.

2. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы; сформулированы цель и задачи исследований, научная новизна, практическая значимость и научные положения, выносимые на защиту. Приведены структура диссертации, формы апробации и реализации результатов, личный вклад автора.

В первой главе рассмотрена проблема мониторинга компонент ракетных топлив и других токсичных веществ в атмосфере.

Отмечено, что одними из актуальных проблем в настоящее время являются: обеспечение безопасности инженерно-технического, обслуживающего персонала и населения в местах пуска РКН и прилегающих районах, на территориях, расположенных вблизи предприятий химического машиностроения; охрана окружающей среды.

Для успешного решения этих проблем необходим постоянный оперативный контроль за состоянием окружающей среды в вышеперечисленных зонах риска.

Проведен анализ лазерных методов дистанционного контроля газовых загрязнений атмосферы, основанных на различных физических эффектах взаимодействия лазерного излучения с газами. Отмечено, что лидары, использующие метод дифференциального поглощения, являются наиболее

Проведен анализ лазерных методов локального контроля газовых загрязнений атмосферы. Отмечено, что лазерные методы локального газоанализа, использующие отбор пробы атмосферного воздуха и методы лазерной спектроскопии газовых сред успешно решают задачи локального контроля загрязняющих атмосферу веществ. Эти методы могут обеспечить получение необходимой информации с высокой оперативностью. Отмечено, что наибольшее применение среди лазерных спектроскопических методов получил оптико-акустический метод вследствие своей простоты и высокой чувствительности.

В случае, если ширина линий лазерного излучения ($\Delta\lambda_{\text{ген}}$) на длинах волн генерации λ_j много меньше ширины линий поглощения ($\Delta\nu_{\text{лин}}$) анализируемых газов ($\Delta\lambda_{\text{ген}} \ll \Delta\nu_{\text{лин}}$), то задача нахождения концентраций газов из результатов локальных (с помощью ЛОАГ) или дистанционных (с помощью лидара ДП) лазерных измерений сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений вида:

[illegible]

где y_j - измеренный приведенный сигнал на длине волны λ_j ; $K_{1j}, K_{2j} \dots K_{Mj}$; $\beta_1, \beta_2 \dots \beta_M$ - соответственно коэффициенты поглощения j -й газовой компоненты и показатели неселективного ослабления на длинах волн $\lambda_1, \lambda_2 \dots \lambda_M$; N_j - искомая концентрация j -ой газовой компоненты; K - число компонент в газовой смеси; M - число спектральных каналов измерения.

Неизвестными величинами в системе (1) являются концентрации газов N_j и показатели неселективного ослабления на длинах волн излучения лазера. Показатели неселективного ослабления слабо зависят от длины волны. Поэтому обычно считают, что если спектральные каналы измерений выбраны попарно (для каждой газовой компоненты) достаточно близко, то для каждой пары каналов показатели ослабления β_i можно положить равными константе. При этом предположении система линейных уравнений (1) разрешима. В этом случае из M спектральных каналов измерения,

необходимых для зондирования многокомпонентной газовой смеси, информация M/2 спектральных каналов требуется для определения концентрации компонент газовой смеси, а информация оставшихся M/2 спектральных каналов - для определения показателей неселективного ослабления β_1 .

Задача определения концентраций компонент газовой смеси из данных лазерных измерений относится к классу некорректных математических задач, решения которых неустойчивы к малым изменениям исходных данных. Отмечена необходимость разработки новых методов определения концентраций газов из результатов многоспектральных лазерных измерений.

Показано, что набор (состав) спектральных каналов измерения существенно влияет на точность работы газоанализатора. Для решения задачи определения спектральных каналов измерения необходимо разработать специальные вычислительные алгоритмы, позволяющие (для произвольного перекрытия полос поглощения газов в смеси и широкого диапазона числа газов в смеси) находить (на основе некоторого критерия) набор спектральных каналов измерения, при котором погрешности определения концентраций газов были бы минимальны или близки к минимальным.

Вторая глава посвящена проблеме определения набора спектральных каналов измерения для лазерного газоанализа многокомпонентных смесей.

При малом (≤ 5) числе компонент в анализируемой газовой смеси или в случаях, когда спектры поглощения газов в смеси достаточно просты и не пересекаются (или мало пересекаются) друг с другом, ширина линий излучения лазерного источника много меньше ширины спектральных линий (полос) поглощения газов и оперативного (секунды, минуты) определения НСКИ не требуется (по характеру решаемой задачи), спектральные каналы измерения могут быть выбраны путем визуального анализа спектров поглощения исследуемых газов.

В случае многокомпонентных газовых смесей при перекрытии спектров отдельных газовых компонент задача выбора спектральных каналов измерения становится сложной и порой неоднозначной. Возникает проблема поиска такого набора спектральных каналов измерения, при котором погрешности определения концентраций газов были бы минимальными или близки к минимальным. Причем, при оперативном газоанализе требуется принятие решения (о наборе спектральных каналов измерения) в ограниченное время (секунды, единицы минут). Для решения этой проблемы требуется создание специальных вычислительных алгоритмов, способных в автоматизированном режиме проводить оперативный поиск (на основе некоторого критерия) НСКИ.

Рассматриваются и сравниваются известные методы автоматизированного поиска наборов спектральных каналов измерения, основанные на: оптимизации таких характеристик газоанализаторов как чувствительность и селективность; анализе расчетной матрицы, формируемой в методе наименьших квадратов (D-критерий и F-критерий); анализе

вариационно-ковариационной матрицы; использовании коэффициента информативности; анализе косинусов углов между векторами в пространстве измеренных сигналов; использовании меры близости матрицы коэффициентов поглощения к диагональной матрице; использовании числа обусловленности системы линейных алгебраических уравнений лазерного газоанализа; использовании информационного расстояния в пространстве состояний исследуемого газового объекта.

Отмечается, что поиск оптимального набора длин волн с использованием большинства известных критериев требует полного перебора всех возможных вариантов наборов спектральных каналов измерения, и, как следствие, большого объема вычислений.

В диссертационной работе разработан новый метод, использующий квазиоптимальный критерий определения набора спектральных каналов измерения, для количественного анализа многокомпонентных газовых смесей в режиме дифференциального поглощения.

Данный метод включает следующие этапы:

1. Для каждой газовой компоненты анализируемой смеси проводится поиск (по всему набору длин волн излучения лазерного источника газоанализатора) всех возможных пар спектральных каналов измерения газоанализатора, работающего в режиме дифференциального поглощения.

При этом для каждого возможного спектрального канала измерения с номером j_{on} (принимаемого за канал с большим значением показателя поглощения анализируемой газовой компоненты), из некой ограниченной спектральной области (вблизи спектрального канала с номером j_{on}) выбирается второй спектральный канал с номером j_{off} (принимаемый за канал с малым значением показателя поглощения анализируемой газовой компоненты), максимизирующий параметр стоимости F следующего вида:

$$F(i, j_{on}, j_{off}) = (1 - b) \cdot \left[w_0^{j_{on}} \cdot \kappa_{j_{on}i} - \kappa_{j_{off}i} / w_0^{j_{off}} \right] - b \left\{ \sum_{l \neq i}^K [\kappa_{j_{on}l} + \kappa_{j_{off}l}] + \sum_{l \neq i}^K |\kappa_{j_{on}l} - \kappa_{j_{off}l}| \right\}, \quad (2)$$

где i - номер анализируемой газовой компоненты; K - число компонент в газовой смеси; w_0^j - относительная (нормированная на максимальную) мощность лазерного излучения для j - спектрального канала; j_{on}, j_{off} - номера длин волн пары спектральных каналов измерения, соответственно, с максимальным и минимальным значением коэффициента поглощения i -ой газовой компоненты в анализируемой смеси, κ_{ji} - коэффициент поглощения i -ой газовой компоненты в анализируемой смеси на j -ой длине волны; b - эмпирический коэффициент (определяемый по результатам предварительных тестовых испытаний), учитывающий влияние «помехи» от других газов, входящих в состав смеси (коэффициент b выбирается из диапазона 0 - 1,

причем $b=0$ соответствует случаю, когда влияние других газов полностью не учитывается, а $b=1$ - случаю, когда влияние других газов наиболее сильное).

2. Отобранные пары ранжируются отдельно для каждого газа в соответствии с параметром стоимости F .

3. Для анализируемой смеси выбирается такой набор пар длин волн, для которых параметр F максимален для каждой газовой компоненты, при условии, что длины волн в наборе спектральных каналов измерения используются по одному разу.

Для максимизации параметра F необходимо: максимизировать коэффициент поглощения анализируемого i -го газа на линии j_{on} и мощность излучения лазера на этой линии; минимизировать коэффициент поглощения анализируемого i -го газа на линии j_{off} и максимизировать мощность излучения лазера на этой линии; минимизировать коэффициенты поглощения и их разности для остальных газов на линиях j_{on}, j_{off} .

На рис.1 приведены результаты математического моделирования - средние (усредненные по 100 измерениям) относительные погрешности определения концентраций газовых компонент восьмикомпонентной смеси аммиак - хлоропропен - этилакрилат - этилен - гидразин - метанол - монометилгидразин - несимметричный диметилгидразин для четырех используемых критериев поиска спектральных каналов измерения. На рисунке: 1 - критерий, основанный на числе обусловленности; 2 - Φ -критерий; 3 - D - критерий; 4 - разработанный критерий. Шум измерения задавался нормальным с относительным значением среднеквадратичного отклонения равным 2,5 %. Относительная погрешность определения концентраций газов вычислялась как модуль разности заданного и найденного значения концентрации, деленный на заданное значение концентрации газовой компоненты. Определение концентраций газовых компонент в анализируемой смеси проводилось методом нахождения квазиразрешений с использованием генетического алгоритма поиска. Из рисунка видно, что погрешности определения, соответствующие различным критериям, не особенно сильно отличаются между собой.

В таблице 1 для D - и Φ - критериев, критерия, основанного на числе обусловленности, и разработанного квазиоптимального критерия приведены времена вычисления оптимального (для соответствующих критериев) набора спектральных каналов измерения. Таблица 1 позволяет дать сравнительную оценку оперативности работы используемых алгоритмов поиска спектральных каналов измерения. Видно, что время счета (для поиска НСКИ) для квазиоптимального критерия намного (как минимум на 2 порядка) меньше.

Таким образом, наилучшим представляется квазиоптимальный критерий определения спектральных каналов измерения, требующий гораздо меньшего (чем остальные критерии) времени вычисления.

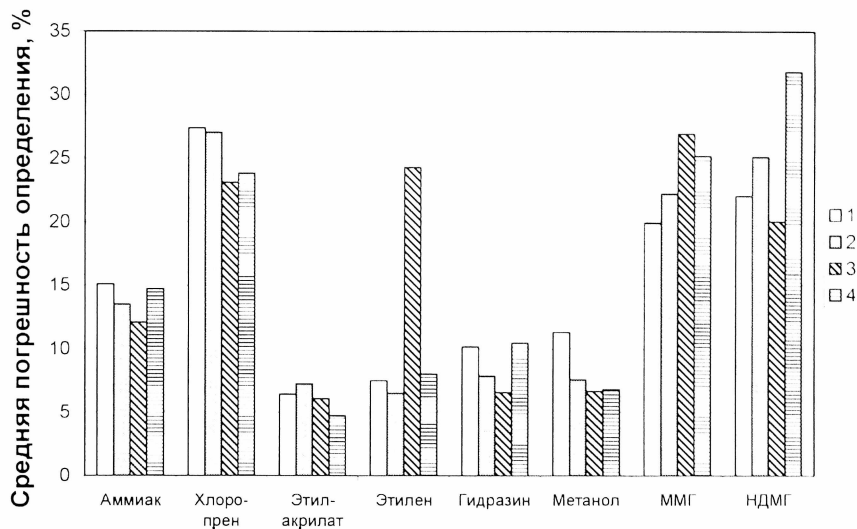


Рис. 1. Средняя относительная погрешность определения концентраций газовых компонент

Таблица 1.

Время вычисления оптимального (в смысле соответствующих критериев) набора спектральных каналов измерения

Критерии, на которых основаны методы поиска НСКИ	Время вычислений, сек
Критерий, основанный на числе обусловленности	122
Ф - критерий	112
D - критерий	106
Квазиоптимальный критерий поиска	<1

С помощью разработанного метода поиска было проведено определение квазиоптимального набора спектральных каналов измерения для семикомпонентной смеси (гидразин - монометилгидразин - несимметричный диметилгидразин - метанол - триметиламин - диметиламин - аммиак) компонент ракетных топлив и сопутствующих газов в реальной атмосфере в спектральном диапазоне 9,1...10,9 мкм. В состав анализируемой смеси были введены фоновые атмосферные газы (водяной пар, углекислый газ и озон), имеющие сильные линии поглощения в данном спектральном диапазоне и мешающее воздействие которых на процессы измерений наиболее велико.

На рис. 2 приведены спектры поглощения КРТ и сопутствующих газов и найденный набор спектральных каналов измерения.

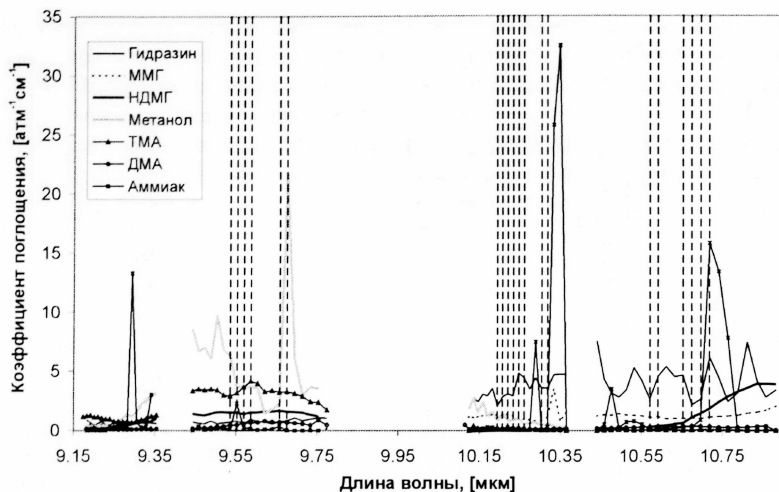


Рис. 2. Спектры поглощения КРТ и сопутствующих газов и найденный набор спектральных каналов измерения

В третьей главе приведены результаты разработки методов определения концентраций газов в многокомпонентных газовых смесях по данным многоспектральных лазерных измерений на основе решения системы линейных уравнений лазерного газоанализа, содержащей случайную погрешность измерения. Данная задача относится к классу некорректно поставленных задач.

Для решения системы уравнений лазерного газоанализа предложено использовать метод подбора квазирешений и метод регуляризации Тихонова с различными способами выбора параметра регуляризации.

Метод подбора квазирешений может быть эффективно использован для решения системы линейных алгебраических уравнений лазерного газоанализа в случае, когда вместо точного значения правой части уравнения известно только ее приближенное значение и (или) матрица коэффициентов поглощения задана неточно.

В матричной форме система линейных алгебраических уравнений лазерного газоанализа (1) имеет вид:

$$Wx = K\tilde{N} + \beta = y, \quad (3)$$

где W - матрица системы уравнений размерностью $M \times M$ ($M = 2K$, где K - количество газовых компонент в анализируемой смеси); x - M -мерный искомый вектор (K компонент этого вектора соответствуют искомым концентрациям газов, остальные компоненты - значениям показателей фонового ослабления); K - $M \times K$ матрица коэффициентов поглощения

компонент исследуемой газовой смеси; $\tilde{N}$ - $M/2$ -мерный вектор концентраций газов; $\tilde{\beta}$ - M -мерный вектор показателей неселективного ослабления; $\tilde{y}$ - M -мерный вектор правых частей системы уравнений (3).

Перейдя от системы (3) к системе разностных уравнений (вычитая попарно уравнения, для которых показатели β_i можно положить равными константе) имеем вместо (3):

$$\tilde{K}\tilde{N} = \tilde{y}, \quad (4)$$

где $\tilde{K}$ - матрица разностей коэффициентов поглощения компонент исследуемой газовой смеси размерностью $M/2 \times M/2$, $\tilde{y}$ - $M/2$ -мерный вектор правых частей системы уравнений (4).

Для системы уравнений лазерного газоанализа (4) квазиращение находится из условия:

$$\rho(\tilde{K}\tilde{N}, \tilde{y}) = \inf_{N \in D} \rho(\tilde{K}\tilde{N}, \tilde{y}),$$

где на множество D наложены следующие ограничения (обусловленные физической постановкой задачи газоанализа):

$$0 \leq N_i \leq 1; \quad \sum_{i=1}^K N_i \leq 1.$$

Возможно наложение более строгих ограничений, например, диапазона изменения концентраций компонент в анализируемой газовой смеси.

Для поиска квазиращения предложено использовать эффективные генетические алгоритмы (ГА). Разработан генетический алгоритм поиска квазиращений задачи количественного газоанализа. По сути ГА представляет собой метод параллельного поиска глобального экстремума, основанный на использовании на каждой итерации сразу нескольких кандидатов на решения (индивидов), которые образуют развивающуюся по случайным законам популяцию.

Численный эксперимент по определению концентраций газов из данных лазерных измерений показал, что при малом количестве компонент в анализируемой газовой смеси средняя погрешность определения концентраций газов при использовании поиска квазиращений приблизительно одного уровня со средней погрешностью стандартного метода решения системы линейных алгебраических уравнений.

Рисунки 3, 4 иллюстрируют зависимость относительной погрешности определения концентраций компонент в многокомпонентной газовой смеси от качественного состава анализируемой смеси (при неизменном количестве компонент смеси). На рисунках приведены результаты математического моделирования определения концентраций газов в двух разных шестикомпонентных смесях. Здесь 1 - стандартный метод решения системы линейных алгебраических уравнений; 2 - метод поиска квазиращений при использовании генетического алгоритма с остановкой поиска через 1000 поколений; 3 - метод поиска квазиращений при использовании генетического алгоритма с остановкой поиска через 200 поколений; 4 - метод регуляризации Тихонова (для выбора параметра регуляризации использовался метод

невязки). Относительное среднеквадратическое значение шума «измерения» задавалось равным 5 %. На рисунках представлена погрешность определения концентраций газов в анализируемой смеси, рассчитанная по серии из 10 одиночных «измерений».

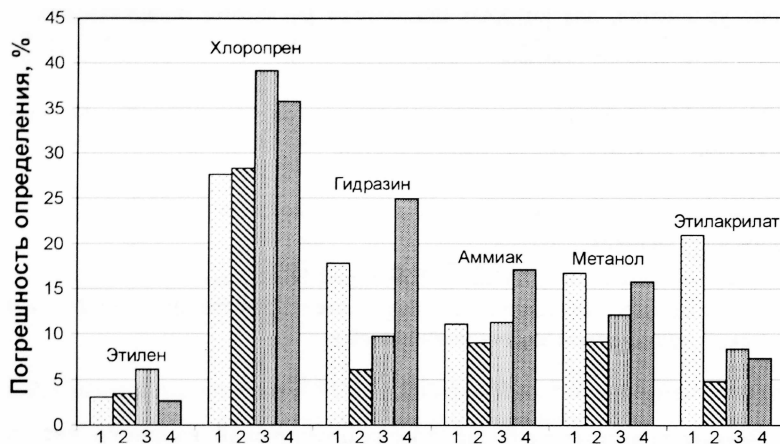


Рис. 3. Относительные погрешности определения концентраций газов в шестикомпонентной смеси этилен - хлоропрен - гидразин - аммиак - метанол - этилакрилат



Рис. 4. Относительные погрешности определения концентраций газов в шестикомпонентной смеси этилен - хлоропрен - гидразин - винилхлорид - акролеин - винилбромид

На рисунках 3, 4 хорошо видно, что погрешности определения концентраций компонент в газовых смесях очень сильно зависят от качественного состава анализируемой смеси.

Для анализируемой шестикомпонентной газовой смеси, представленной на рис.3, погрешности определения концентраций газов всеми рассматриваемыми методами не особенно большие и они сильно различаются для разных компонент смеси (например, стандартный метод решения системы линейных алгебраических уравнений оказывается одним из лучших для этилена и самым худшим для этилакрилата). Применение методов регуляризации и поиска квазирешений не дает особенно большого преимущества по сравнению с методом прямого решения (если оценивать это преимущество в среднем для всех компонент газовой смеси). Однако и здесь метод поиска квазирешений с генетическим алгоритмом с поиском по 1000 поколениям является предпочтительным по сравнению с прямым решением.

Для другой анализируемой газовой смеси, представленной на рис.4, две газовые компоненты (акролеин и винил-бромид) вообще не удастся найти стандартным методом решения системы линейных алгебраических уравнений (погрешности больше 100 %) и здесь для большинства газов заметно существенное снижение уровня средней погрешности определения при применении метода регуляризации и метода поиска квазирешений (погрешности для этих методов одного порядка). Увеличение погрешности определения смеси для генетического алгоритма при уменьшении числа поколений (до которого ведется поиск) с 1000 до 200 (при этом время вычислений уменьшалось в 5 раз) не очень значительное, что связано с неравномерной скоростью сходимости этого алгоритма.

Таким образом, разработанный метод решения системы уравнений лазерного газоанализа (на основе поиска квазирешений и использовании генетического алгоритма подбора решений) позволяет эффективно решать задачу определения концентраций газов при лазерном газоанализе как для малокомпонентных, так и для многокомпонентных газовых смесей. Этот метод не требует обязательной дополнительной информации об уровне шума в спектральных измерительных каналах, и позволяет, как правило, с точностью от единиц процентов до 30...40 процентов находить концентрации компонент газовых смесей, однако требует большого объема вычислений.

Другим эффективным методом решения некорректных математических задач является метод регуляризации Тихонова. Он используется в диссертации для решения системы линейных алгебраических уравнений лазерного газоанализа при различных способах выбора параметра регуляризации (ранее он использовался в задачах газоанализа только с выбором параметра регуляризации на основе принципа невязки).

При использовании детерминированных методов регуляризации для системы уравнений (3) регуляризованное решение определяется выражением:

$$\bar{X}_{\alpha} = (W^T W + \alpha E)^{-1} W^T y \quad (5)$$

где α - параметр регуляризации; $\bar{X}_{\alpha}$ - регуляризованное решение уравнения (3); E - единичная матрица.

Основная сложность при практическом построении регуляризованных решений заключается в выборе параметра регуляризации α . Для получения решения использовалось несколько способов выбора параметра регуляризации:

- на основе принципа невязки и модификации метода невязки;
- два метода выбора квазиоптимального параметра регуляризации;
- метод отношений;
- по минимуму невязки при использовании дополнительной независимой информации;
- два статистических метода выбора параметра регуляризации из критерия оптимальности регуляризованного решения.

Математическое моделирование работы алгоритмов определения концентраций газов на основе метода регуляризации Тихонова проводилось для смесей с числом компонент 3-10. Результаты математического моделирования показали, что для многокомпонентных смесей (с числом компонент больше 5) процедуры обработки, основанные на построении регуляризованного решения, обеспечивали не только оперативность измерения, но и гораздо более низкий уровень погрешностей определения концентраций газов.

На рисунках 5, 6 приведены результаты численного эксперимента по определению концентраций газовых компонент в многокомпонентных смесях из данных лазерных измерений при использовании газоанализатора на основе дискретно перестраиваемого CO₂ лазера.

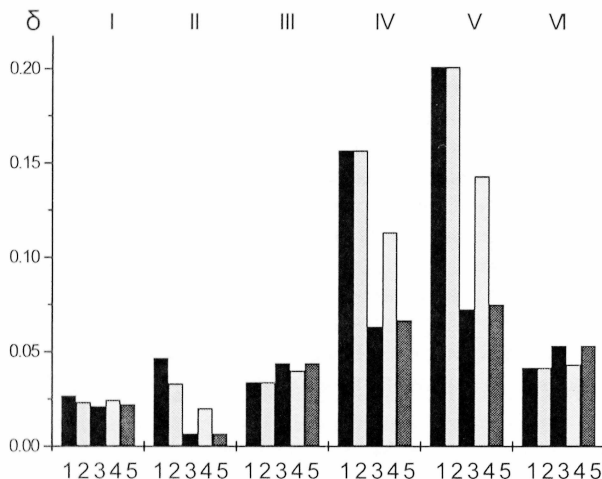


Рис. 5. Относительные погрешности определения концентраций газовых компонент в шестикомпонентной смеси

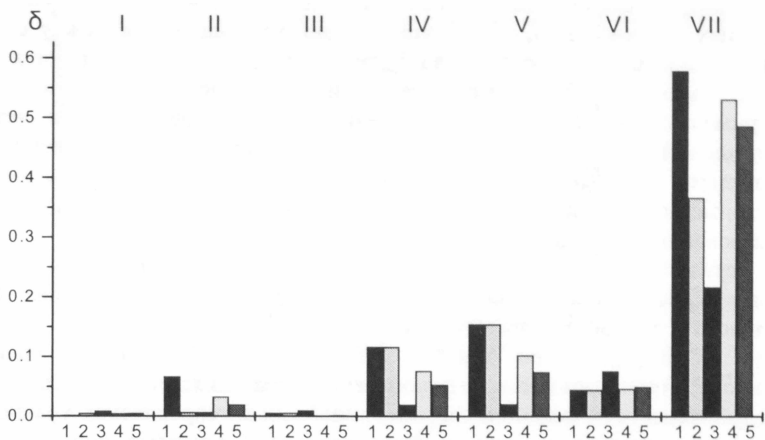


Рис. 6. Относительные погрешности определения концентраций газовых компонент в восьмикомпонентной смеси

На рис. 5, 6 показаны относительные погрешности (δ) определения концентраций газовых компонент в анализируемой смеси: на рис. 5 для шестикомпонентной смеси: аммиака (I), хлоропрена (II), этилена (III), трихлорэтилена (IV), изопропанола (V), винилхлорида (VI) и на рис. 6 для восьмикомпонентной смеси: аммиака (I), хлоропрена (II), этилена (III), трихлорэтилена (IV), изопропанола (V), винилхлорида (VI), этилмеркаптана (VII). Относительные среднеквадратические значения шума измерения задавались в разных спектральных каналах разными в диапазоне 2...4 %. Не найдено (и на рис. 6 не показано) только значение концентрации 1,2 дихлорэтана ($\delta \approx 5$). Для обработки «измеренных» данных в численном эксперименте использовался алгоритм на основе метода регуляризации Тихонова. Выбор параметра регуляризации осуществлялся несколькими способами: на основе принципа невязки (столбцы 1), модифицированного принципа невязки (столбцы 2), выбора квазиоптимального параметра регуляризации (столбцы 3 и 4), метода отношений (столбцы 5). Результаты определения концентраций газов стандартным методом решения системы линейных алгебраических уравнений не показаны, так как погрешности здесь гораздо больше. На рисунках видно, что для всех газовых компонент шестикомпонентной анализируемой смеси метод регуляризации обеспечивает достаточно низкий уровень ($\delta \leq 0,2$) погрешностей определения концентраций газовых компонент. Для большинства газовых компонент восьмикомпонентной смеси погрешности определения также небольшие ($\delta \leq 0,2$). Для этилмеркаптана погрешности больше (0,2 - 0,6), и, тем не менее, мы уверенно определяем порядок значений концентраций этого газа.

Из рисунков видно, что различные способы выбора параметра регуляризации для разных газов могут давать как близкие значения найденных концентраций, так и существенно различающиеся между собой. Точность определения концентраций также существенно различается для разных газовых компонент смеси и она несколько хуже (по экспериментальным данным примерно на 10 процентов) точности метода квазиразрешений. В большинстве случаев наименьшие погрешности определения обеспечивают выбор квазиоптимального параметра регуляризации, модифицированный метод невязки и метод невязки при использовании дополнительной независимой информации.

Результаты математического моделирования показывают, что использование методов квазиразрешения и регуляризации Тихонова (для локального и дистанционного газоанализа) для многокомпонентных газовых смесей обеспечивает не только значительно более низкий уровень погрешностей, но и позволяет находить концентрации газов в случаях, когда стандартные методы решения системы линейных алгебраических уравнений дают физически бессмысленные (отрицательные) значения концентраций газов. Значительное преимущество (перед стандартными методами решения системы линейных алгебраических уравнений) методов, основанных на построении регуляризованных решений, проявляется как при одиночных измерениях, так и при использовании предварительно усредненных значений сигналов.

Проведено математическое моделирование определения концентраций компонент ракетных топлив и сопутствующих газов в атмосфере. На рис. 7 приведены результаты численного эксперимента по определению концентраций КРТ из данных лазерных измерений с использованием дискретно перестраиваемого CO_2 лазера. На рисунке: 1 - метод подбора квазиразрешения, 2 - метод прямого решения. Результаты по определению концентрации диметиламина (ДМА) на рисунке 7 не представлены, так как в данном спектральном интервале (9-11 мкм) у ДМА отсутствуют сильные линии поглощения, т. е. он имеет достаточно гладкий спектр и поэтому его концентрация определяется с очень большой погрешностью. Также на рисунке 7 не представлены результаты по определению концентраций паров воды, углекислого газа и озона, как не представляющие интереса.

На рис. 7 средняя погрешность рассчитывалась по серии из 100 измерений. Как видно из рисунка при использовании прямого решения концентрации 3-х компонент (ММГ, НДМГ, ТМА) вообще не удается определить (погрешности их определения $>100\%$). Для всех КРТ, входящих в данную смесь, заметно существенное снижение ($\sim$ в 3...6 раз) уровня средней погрешности определения при применении метода подбора квазиразрешения по сравнению с методом прямого решения (за исключением метанола, для которого погрешности одного порядка).

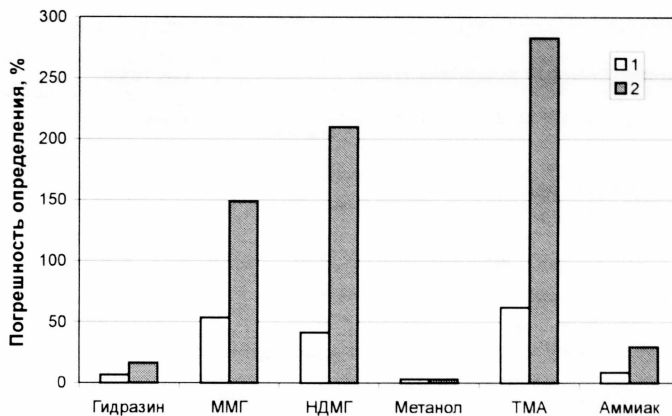


Рис. 7. Относительные погрешности определения концентраций КРТ в десятикомпонентной смеси гидразин - монометилгидразин - несимметричный диметилгидразин - метанол - триметиламин - диметиламин - аммиак - пары воды - углекислый газ - озон

На рис. 7 хорошо видно, что определение концентраций компонент ракетных топлив в атмосфере возможно только при использовании методов решения некорректных математических задач. Из рис. 7 также следует, что хотя погрешности определения ММГ, НДМГ, ТМА велики, при использовании методов решения некорректных математических задач можно определить порядок величины их концентраций.

В четвертой главе приведены результаты разработки, создания и экспериментальных исследований макетного образца автоматизированного измерительного комплекса для локального оперативного контроля многокомпонентных смесей составляющих ракетных топлив и других токсичных веществ в атмосфере.

Основной особенностью измерительного комплекса на основе лазерного оптико-акустического газоанализатора является сопряжение ЛОАГ, содержащего отдельную микропроцессорную систему управления, с персональным компьютером (ПК), оснащенным специальным программным обеспечением. Использование ПК и отдельного микропроцессорного блока управления обеспечивает возможность проведения оперативного газоанализа многокомпонентных смесей с высокой степенью автоматизации процесса измерения.

Структурная схема разработанного измерительного комплекса на основе ЛОАГ и общий вид макетного образца ЛОАГ приведены на рис. 8, 9.

В качестве источника излучения использован непрерывный дискретно перестраиваемый CO_2 лазер с высокочастотной накачкой, имеющий около 70 линий генерации в диапазоне 9,15...10,83 мкм (в этом спектральном диапазоне лежат молекулярные линии поглощения многих загрязняющих веществ в том числе компонент ракетных топлив и сопутствующих газов).

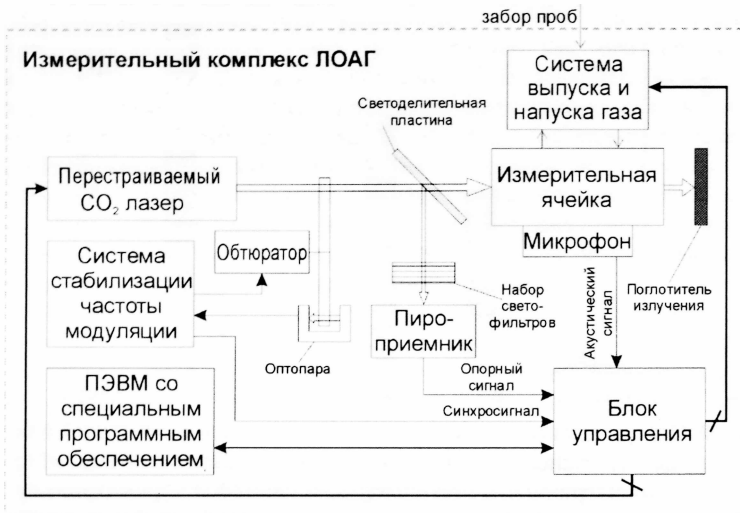


Рис. 8. Структурная схема разработанного измерительного комплекса на основе ЛОАГ

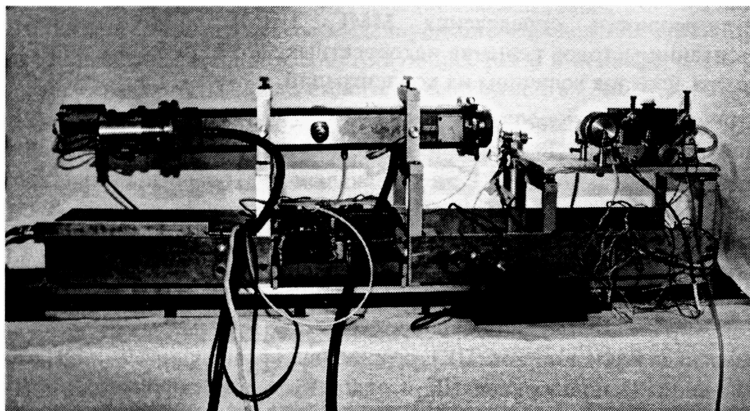


Рис. 9. Общий вид макетного образца ЛОАГ

Для газоанализатора выбрана оптико-акустическая ячейка нерезонансного типа, что, хотя и снижает чувствительность газоанализатора, однако позволяет уменьшить объем и внутреннюю площадь ячейки (а значит уменьшить влияние адсорбции и десорбции и, как следствие, сократить время необходимое на продувку ячейки между двумя заборами газовых проб). Малые размеры нерезонансной ячейки делают ее привлекательной для использования в мобильной системе экологического мониторинга.

Разработано программное обеспечение измерительного комплекса для измерения концентраций газов в многокомпонентных смесях.

Программное обеспечение позволяет проводить количественный газоанализ многокомпонентной смеси, который можно подразделить на несколько этапов:

- 1) поиск набора спектральных каналов измерения;
- 2) определение концентраций компонент анализируемой газовой смеси по результатам измерений.

Необходимой входной информацией для комплекса является качественный состав смеси (задаваемый, например, на основе некой априорной информации).

Программное обеспечение измерительного комплекса включает в себя также базу данных, содержащую необходимую информацию для работы измерительного комплекса (определения набора спектральных каналов измерения, нахождения концентраций газов по данным измерений). В базе данных, содержится информация о длинах волн генерации лазера - спектральных каналах измерения, о мощности излучения на этих длинах волн, а также информация, необходимая для перестройки лазера на эти линии, о значениях коэффициентов поглощения газов во всех возможных спектральных каналах, о значениях предельно допустимых концентраций газов (содержащихся в базе данных).

В процессе работы измерительного комплекса возможно редактирование и дополнение базы данных, как из внешних источников, так и в процессе измерения спектров газов самим измерительным комплексом.

Взаимодействие оператора с измерительным комплексом осуществляется посредством пользовательского интерфейса, входящего в состав программного обеспечения.

Время измерения количественного состава многокомпонентной газовой смеси на всех линиях генерации составляет единицы минут, и определяется в большей степени временем, необходимым на перестройку CO_2 лазера. Высокая оперативность и автоматизация процесса газоанализа, простота управления делают данный прибор перспективным для контроля чистоты атмосферного воздуха.

На разработанном измерительном комплексе с целью проверки его работоспособности, апробации разработанных методов и алгоритмов проведены измерения и анализ сигналов (измерительного комплекса), экспериментальное определение концентраций компонент в многокомпонентных газовых смесях.

Обработка результатов экспериментальных измерений лазерного газоанализатора проводилась для газовых смесей с числом компонент от 3 до 6. Результаты обработки показали, что для трех- и четырехкомпонентных смесей погрешности определения концентраций газов небольшие и использование регуляризирующих процедур обработки не дает повышения точности. При количественном анализе пятикомпонентной смеси наблюдалось повышение точности определения концентраций газов при

использовании метода поиска квазирешения по сравнению с методом прямого решения.

На рисунке 10 приведены результаты обработки экспериментальных данных измерительного комплекса. Здесь приведены относительные погрешности определения концентраций газов в шестикомпонентной смеси: этилен - углекислый газ - аммиак - метанол - этанол - изопропанол. Результаты определения углекислого газа на рисунках не показаны, так как его концентрацию не удалось найти во всех случаях.

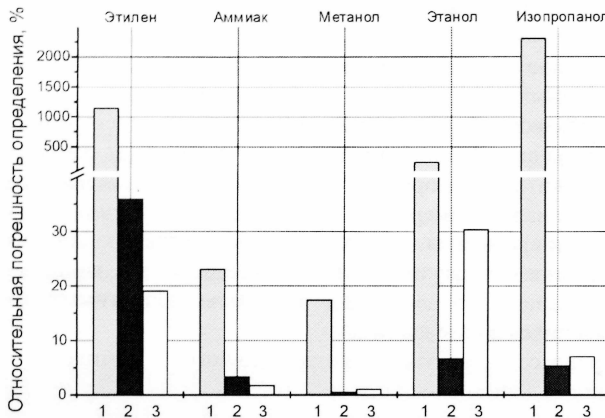


Рис. 10. Относительные погрешности определения концентраций газов в шестикомпонентной смеси этилен - углекислый газ - аммиак - метанол - этанол - изопропанол с использованием искаженной матрицы коэффициентов поглощения газов

На рисунке 10: 1 - стандартный метод решения системы линейных алгебраических уравнений (использовался метод Гаусса с постолбцовым выбором главного элемента), 2 - метод поиска квазирешений с использованием эволюционно-генетического метода с поиском по 1000 поколениям, 3 - метод регуляризации Тихонова (для выбора параметра регуляризации использовался метод невязки). На рисунке видно, что метод прямого решения приводит для большинства газов к очень большим погрешностям - сотням и тысячам процентов (при этом найденные концентрации могут не только на несколько порядков отличаться от действительных, но и принимать физически бессмысленные отрицательные значения). Уровень погрешностей определения концентрации сильно отличается для разных компонент анализируемой смеси.

На рис. 11 приведены результаты определения концентрации изопропанола в шестикомпонентной смеси с помощью данного измерительного комплекса. Определение проводилось по результатам одиночных измерений. На рисунке 11: 1 - найденное значение концентрации

изопропанола при использовании стандартного метода решения системы линейных алгебраических уравнений, 2 - найденное значение концентрации методом поиска квазирешений с использованием генетического алгоритма, 3-методом регуляризации Тихонова, 4 - истинное значение концентрации. На рисунке 11 видно существенное преимущество использования методов решения некорректных математических задач (метода поиска квазирешения, метода регуляризации Тихонова) при определении концентраций газов в многокомпонентных смесях, по сравнению с применением метода прямого решения.

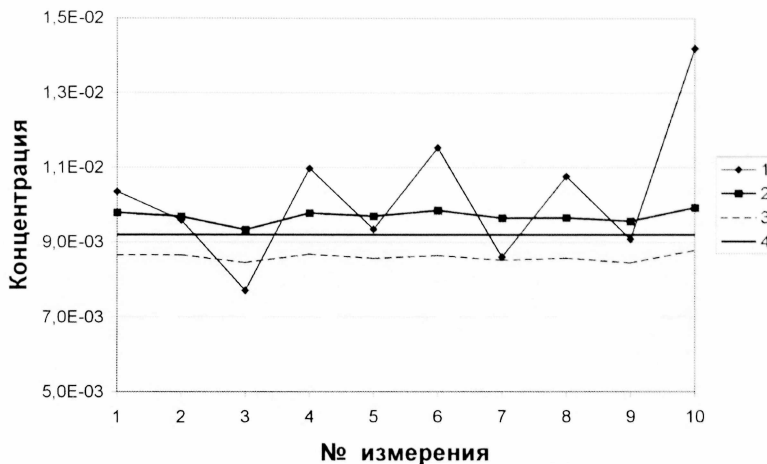


Рис. 11. Результаты определения концентрации изопропанола в шестикомпонентной смеси этилен - углекислый газ - аммиак - метанол - этанол - изопропанол по результатам одиночных измерений

Показана возможность использования разработанного измерительного комплекса на основе ЛОАГ для оперативного локального контроля концентраций компонент ракетных топлив и сопутствующих газов в многокомпонентных выбросах в атмосфере. Рассчитаны минимально определяемые с помощью измерительного комплекса концентрации несимметричного диметилгидразина и гидразина: $N_{\min} = 1,7 \times 10^{-2} \text{ мг/м}^3$ (для несимметричного диметилгидразина); $N_{\min} = 6,5 \times 10^{-3} \text{ мг/м}^3$ (для гидразина). Предельно допустимые концентрации в воздухе рабочей зоны (ПДК_{р.з.}) данных компонент ракетных топлив следующие: для несимметричного диметилгидразина - ПДК_{р.з.} = 1 мг/м³, для гидразина - ПДК_{р.з.} = 0,1 мг/м³. Таким образом, с помощью измерительного комплекса на основе ЛОАГ возможно измерение концентраций несимметричного диметилгидразина и гидразина на уровне ниже ПДК_{р.з.} примерно на 1-2 порядка.

Результаты проведенных исследований показали: 1. С использованием разработанного измерительного комплекса возможно проведение количественного анализа многокомпонентных газовых смесей с точностью от единиц процентов до 30...40 процентов; 2. Разработанные методы на основе поиска квазиразрешений (с использованием генетического алгоритма подбора решений) и регуляризации Тихонова (при различных методах выбора параметра регуляризации) позволяют эффективно решать задачу определения концентраций газов (в том числе КРТ) при лазерном оптико-акустическом газоанализе как для малокомпонентных, так и для многокомпонентных газовых смесей.

В пятой главе приведены результаты разработки, создания и экспериментальных исследований образца лидара дифференциального поглощения на основе параметрического генератора света на кристалле селенистого кадмия.

Автором диссертации разработан и создан параметрический генератор света на кристалле селенистого кадмия со спектральными диапазонами плавной перестройки 3,8...4,6 мкм и 8...13 мкм. На основе ПГС на CdSe создан лидар дифференциального поглощения. На рис.12 приведена функциональная оптическая схема экспериментального образца лидара ДП.

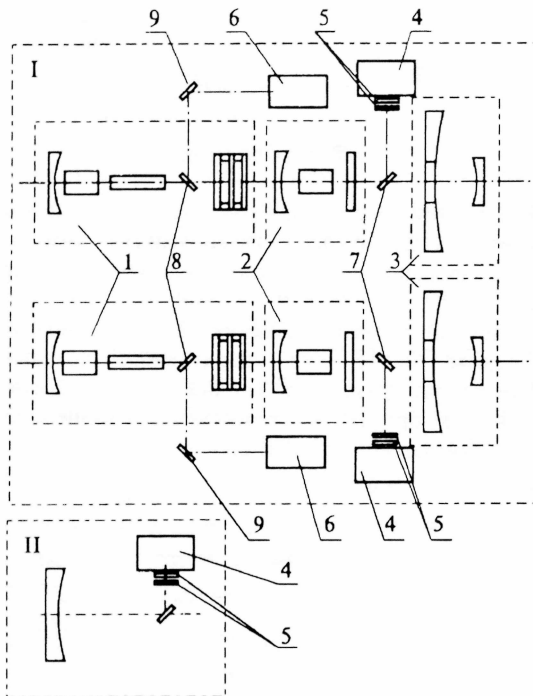


Рис. 12. Функциональная оптическая схема лидара

Здесь I - передатчик; II - приемная система; 1 - лазер на иттрий-эрбий-алюминиевом гранате (YAG:Er^{3+} , ИЭАГ); 2 - параметрический генератор света на кристалле CdSe ; 3 - корректирующий объектив; 4 - фотоприемник; 5- светофильтры; 6 - юстировочный гелий-неоновый лазер; 7 - полированные светоделительные пластинки из BaF_2 (или ZnSe); 8 - полированные пластины из кварца КИ; 9 - отражающие алюминиевые зеркала.

Передатчик лидара включает два плавно перестраиваемых в диапазоне 8...13 мкм ПГС на кристалле селенида кадмия, накачиваемых лазером на ИЭАГ. Общий вид излучателя лазера накачки приведен на рис. 13. На выходе каждого из каналов лазерного передатчика используется корректирующий объектив, изготовленный по схеме Грегори и состоящий из двух сферических отражающих зеркал с алюминиевым покрытием. С помощью таких оптических систем расходимость лазерного излучения каждого из каналов была уменьшена с 3 до 0,3 мрад.

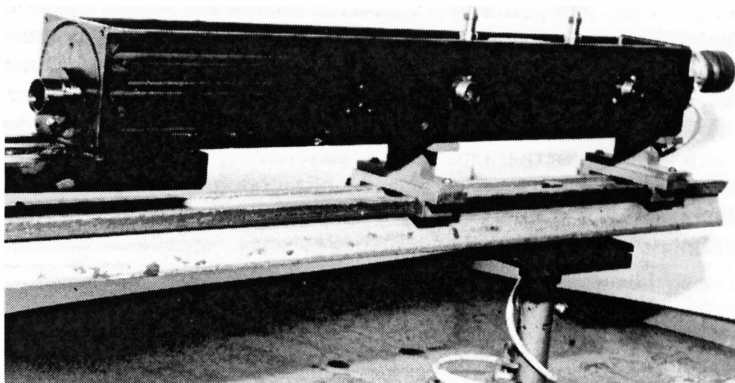


Рис. 13. Общий вид излучателя лазера на ИЭАГ

Оптическая схема приемной системы лидара представляет собой Ньютоновский объектив. Общий вид приемной системы лидара представлен на рис. 14. В качестве приемника ИК излучения используется фоторезистор на основе германия, легированного золотом (Ge:Au) (или приемник на основе тройного соединения кадмий-ртуть-теллур ($\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$)).

Блок управления лидара осуществляет связь по последовательному интерфейсу с персональным компьютером; выдает сигналы, управляющие перестройкой параметрического генератора света. В блоке управления решается еще одна важная задача - осуществляется предварительная обработка информативных сигналов, включающая в себя аналоговую фильтрацию, аналого-цифровое преобразование сигналов, измерение амплитуд оцифрованных сигналов, накопление значений сигналов и отбраковку аномальных значений.

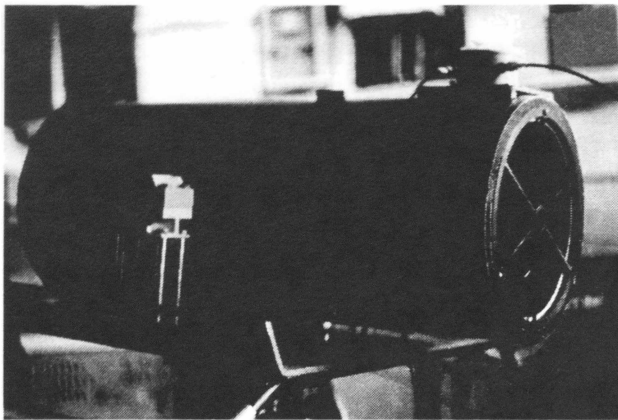


Рис. 14. Общий вид приемной системы лидара

Разработано программное обеспечение лидара для задачи оперативного дистанционного контроля концентраций КРТ. Программное обеспечение лидара по структуре совпадает с программным обеспечением, разработанным для измерительного комплекса на основе ЛОАГ.

Измерены спектры пропускания и показатели поглощения гидразина несимметричного диметилгидразина, тетраметилтетразена, аммиака и метана на лазерных линиях излучателя лидара в областях информативных участков из диапазона 8...13 мкм. На рис. 15 приведены измеренные спектры пропускания А, Г и Т (кривые 1, 2, 3), и для сравнения показано их пропускание по литературным данным (кривые 1', 2', 3').

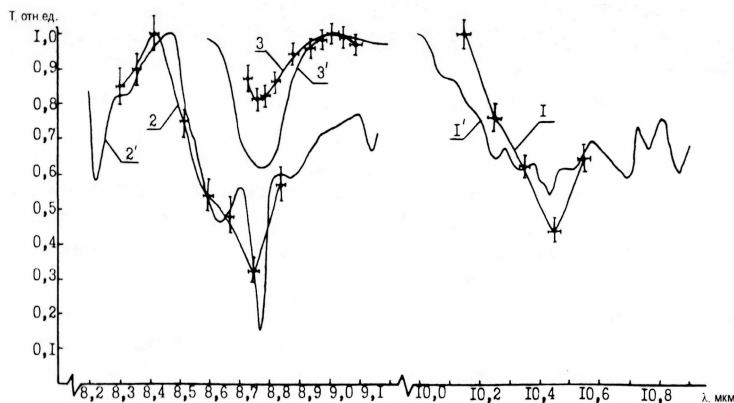


Рис. 15. Спектры пропускания А (1, 1'), Г (2, 2'), Т (3, 3') на лазерных линиях лидара (1, 2, 3) и снятые с помощью спектрофотометра (1', 2', 3') "Perkin Elmer Model 21".

Особенностью ПГС на кристалле CdSe является то, что его спектральная ширина линии генерации может быть сравнима (и даже больше) спектральной ширины линий поглощения газовых загрязнителей. Показано, что при использовании в качестве излучателя лидара параметрического генератора света на кристалле селенистого кадмия с шириной линии излучения 0.3 см^{-1} система уравнений лазерного газоанализа состоит из интегральных уравнений сложного вида. Предложено для практических задач при оперативном определении количественного состава многокомпонентной газовой смеси вместо этих интегральных уравнений использовать систему линейных алгебраических уравнений. При математическом моделировании определения количественного состава шестикомпонентной смеси были найдены условия, при которых такая замена дает приемлемые значения погрешности определения концентраций компонент смеси.

Проведены экспериментальные исследования по определению концентраций гидразина, несимметричного диметилгидразина, тетраметилтетразена, аммиака и метана в кювете, размещенной на трассе зондирования, с помощью лидара относительно фоновое уровня данных компонент на трассе. В таблице 2 приведены полученные результаты определения концентраций газов в кювете, расположенной на трассе зондирования, с помощью лидара и стандартными химическими методами.

Таблица 2.

Концентрации (N) амидола, гептила, тетраметилтетразена, аммиака и метана в кювете, определенные лидаром и стандартными химическими методами

Газ	N Лидарный метод, мг/м ³	N* Химический метод, мг/м ³	$\frac{ N - N^* }{N} \cdot 100$ %
Амидол	1350 ± 350	1100 ± 200	18,5
Гептил	1950 ± 450	1800 ± 350	7,7
Тетраметилтетразен	3400 ± 800	3100 ± 600	8,8
Аммиак	2200 ± 500	1900 ± 400	13,6
Метан	4700 ± 1200	5000 ± 1000	6,4

Показана возможность применения лидара дифференциального поглощения для дистанционного оперативного контроля концентраций компонент ракетных топлив и сопутствующих газов в атмосфере. Рассчитаны минимально определяемые с помощью созданного лидара концентрации несимметричного диметилгидразина и гидразина в атмосфере. Их значения приведены в таблице 3 для трассовых измерений при использовании зеркального отражателя. Видно, что с помощью ИК лидара ДП возможно измерение концентраций несимметричного диметилгидразина и гидразина на уровне примерно ПДК_{р.з.}.

Таблица 3.

Минимально определяемые средние концентрации несимметричного диметилгидразина и гидразина на трассе длиной 1000 м

Компонента ракетных топлив	$N_{\text{мин}}, \text{мг/м}^3$	
	Фоторезистор на основе соединения кадмий-ртуть-теллур ($\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$)	Фоторезистор на основе германия, легированного золотом (Ge:Au)
Несимметричный диметилгидразин	0,13	0,13
Гидразин	0,05	0,05

В общих выводах приведены основные достигнутые результаты.

3. ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Основные научные и практические результаты работы заключаются в следующем.

1. Разработан новый метод определения спектральных каналов измерения (на основе квазиоптимального критерия поиска) для оперативного лазерного анализа многокомпонентных газовых смесей, позволивший сократить время поиска спектральных каналов измерения на 2...3 порядка по сравнению с известными методами.

2. Разработан новый метод определения концентраций газов многокомпонентных смесей, основанный на процедуре подбора квазирешений для некорректных математических задач и использовании генетического алгоритма поиска. Метод не нуждается в дополнительной информации и позволяет, как правило, с точностью от единиц процентов до 30...40 процентов находить количественный состав газовых смесей, однако требует большого объема вычислений.

3. Разработан новый метод определения концентраций газов многокомпонентных смесей, основанный на процедуре регуляризации Тихонова и использовании различных способов выбора параметра регуляризации. Метод не требует большого объема вычислений, но нуждается в дополнительной информации и его точность несколько хуже (по экспериментальным данным примерно на 10 процентов) точности метода квазирешений, причем наименьшие погрешности обеспечиваются при выборе квазиоптимального параметра регуляризации и выборе параметра регуляризации модифицированным методом невязки и методом невязки с использованием дополнительной независимой информации.

4. Для локального контроля многокомпонентных газовых смесей, в том числе составляющих ракетных топлив и других токсичных веществ в атмосфере разработан макетный образец малогабаритного

автоматизированного измерительного комплекса на основе лазерного оптико-акустического газоанализатора и исследованы его возможности.

5. Для дистанционного контроля концентраций многокомпонентных смесей составляющих ракетных топлив и других токсичных веществ в атмосфере разработан экспериментальный образец инфракрасного лидара дифференциального поглощения на основе параметрического генератора света и исследованы его возможности. Разработан и создан параметрический генератор света на кристалле селенистого кадмия. Получена непрерывно перестраиваемая параметрическая генерация в спектральных диапазонах 3,8...4,6 мкм и 8...13 мкм. Диапазон перестройки излучения экспериментального образца лидара ДП расширен более чем в два раза по сравнению с известными лидарами, что позволяет с его помощью проводить измерения для более широкой номенклатуры газовых компонент смесей составляющих ракетных топлив и других токсичных веществ в атмосфере.

Проведены экспериментальные исследования возможностей созданного лидара в качестве оперативного средства дистанционного контроля концентраций газовых компонент в атмосфере рабочей зоны.

6. Проведена экспериментальная апробация разработанных методов поиска набора спектральных каналов измерения и определения количественного состава многокомпонентных газовых смесей по результатам многоспектральных локальных и дистанционных лазерных измерений.

Результаты диссертации изложены в следующих основных научных работах:

1. О выходных характеристиках параметрического генератора света на кристалле селенида кадмия / В.А. Городничев, А.А. Давыдов, В.И. Жильцов и др. // Электронная техника. Сер. 11. Лазерная техника и оптоэлектроника. – 1984. – Вып. 3 (29). – С. 93-96.

2. Лидар дифференциального поглощения в ИК области спектра на основе параметрического генератора света / В.А. Городничев, М.Б. Богачев, В.И. Козинцев и др. // Журнал прикладной спектроскопии. – 1988. – Т. 49, вып. 6. – С. 978-982.

3. Городничев В.А., Козинцев В.И., Сильницкий А.Ф. Лидар на основе параметрического генератора света для определения атмосферных загрязнений // Оптика атмосферы. – 1988. – Т. 1, № 12. – С. 33-35.

4. Gorodnichev V.A., Kozintsev V.I. Infrared differential absorption lidar (DIAL) system for monitoring atmospheric pollution // SPIE. – 1993. – V.2107. – P. 400-419.

5. Городничев В.А., Козинцев И.В., Козинцев В.И. Лидар дифференциального поглощения в инфракрасной области спектра // Вестник МГТУ, сер. Приборостроение. – 1994. – № 3. – С. 49-63.

6. Городничев В.А., Козинцев В.И. Мониторинг загрязнений атмосферы с помощью лидара дифференциального поглощения в инфракрасной области спектра // Оптика атмосферы и океана. – 1994. – Т. 7, № 10. – С. 1410-1414.

7. Радиофизический мониторинг загрязнений природной среды / М.Л. Белов, В.А. Городничев, В.И. Козинцев и др.-М: Аргус, 1994. – 107 с.
8. Обработка лидарного сигнала при многокомпонентном газоанализе атмосферы / М.Л. Белов, В.А. Городничев, В.И. Козинцев и др. // Вестник МГТУ. Приборостроение. – 1996. – № 3. – С. 117-125.
9. Мониторинг многокомпонентных газовых смесей с помощью лазерного оптико-акустического полигазоанализатора / М.Л. Белов, В.А. Городничев, В.И. Козинцев и др. // Журнал Прикладной спектроскопии. – 1996. – Т. 65, № 5. – С. 755-759.
10. Сравнение методов обработки сигналов лазерного оптико-акустического анализатора для многокомпонентного анализа газовых смесей / М.Л. Белов, В.А. Городничев, В.И. Козинцев и др. // Вестник МГТУ. Приборостроение. – 1998 – № 3. – С. 30-38.
11. Обработка сигналов в задачах лазерного газоанализа состава атмосферы и многокомпонентных газовых смесей / М.Л. Белов, Д.Б. Добрица, В.А. Городничев и др. // Вестник МГТУ. Приборостроение. – 1998. – Спец. выпуск «Лазерные оптико-электронные приборы и системы». – С. 83-88.
12. Сравнительный анализ методов восстановления концентраций газов в многокомпонентных смесях из данных измерений лазерного оптико-акустического газоанализатора / М.Л. Белов, Д.Б. Добрица, В.А. Городничев и др. // Оптика атмосферы и океана. – 2000. – Т. 13, № 2. – С. 146-150.
13. Восстановление концентраций газов в многокомпонентных газовых смесях эволюционно-генетическим методом из данных измерений лазерного оптико-акустического / М.Л. Белов, В.А. Городничев, В.И. Козинцев и др. // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2000. – № 9. – С. 55-59.
14. Восстановление концентраций компонент газовых смесей из многоспектральных лазерных измерений методом статистической регуляризации / М.Л. Белов, В.А. Городничев, В.И. Козинцев и др. // Вестник МГТУ. Приборостроение. – 2001 – № 3. – С. 36-43.
15. Автоматизированный измерительный комплекс на основе лазерного оптико-акустического газоанализатора для контроля чистоты воздуха / М.Л. Белов, В.А. Городничев, В.И. Козинцев и др. // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2001. – № 9. – С. 38-42.
16. Обработка сигналов в задачах лазерного газоанализа атмосферы / М.Л. Белов, В.А. Городничев, В.И. Козинцев и др. // Вестник МГТУ. Приборостроение. – 2001 – № 4. – С. 51-57.
17. Городничев В.А. Сравнительный анализ схем лазерного зондирования для задачи контроля концентраций токсичных веществ в атмосфере // Вестник МГТУ. Приборостроение. – 2001 – № 4. – С. 24-32.
18. Городничев В.А. Анализ методов поиска спектральных каналов измерения для задачи оперативного лазерного газоанализа // Конверсия в машиностроении. – 2002 – № 1. – С. 70-76.
19. Городничев В.А. Использование метода поиска квазиразрешений для определения концентраций газов при многокомпонентном лазерном

газоанализе атмосферы // Вестник МГТУ. Приборостроение. – 2002 – № 2. – С. 46-52.

20. Метод поиска квазиreshений в задаче лазерного оптико-акустического газоанализа / М.Л. Белов, В.А. Городничев, В.И. Козинцев и др. // Оптика атмосферы и океана. – 2002. – Т. 15, № 4. – С. 388-392.

21. Сравнительный анализ методов поиска спектральных каналов измерения для лазерного оптико-акустического газоанализатора / М.Л. Белов, В.А. Городничев, В.И. Козинцев и др. // Оптика атмосферы и океана. – 2002. – Т. 15, № 8. – С. 665-671.

22. Оптико-электронные системы экологического мониторинга природной среды: Учебное пособие / В.И. Козинцев, В.М. Орлов, М.Л. Белов и др. Под ред. В.Н. Рождествина. - М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 528 с.

23. Городничев В.А. Методика выбора длин волн зондирования для лидарного контроля газовых загрязнений атмосферы // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2002. – № 2. – С. 21-24.

24. Городничев В.А. Анализ схемы зондирования с использованием углового отражателя для задачи контроля газовых загрязнений атмосферы // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2002. – № 9. – С. 64-67.

25. Городничев В.А. Методы восстановления концентраций газов для задачи лидарного контроля газовых загрязнителей атмосферы // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2003. – № 9. – С. 52-56.

26. Городничев В.А. Выбор метода обработки результатов измерений для решения задачи количественного лазерного газоанализа // Вестник МГТУ. Приборостроение. – 2003 – № 4. – С. 26-35.

27. Лазерный оптико-акустический анализ многокомпонентных газовых смесей / В.И. Козинцев, М.Л. Белов, В.А. Городничев и др. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 352 с.

28. Обработка данных измерений для задачи количественного лазерного оптико-акустического газоанализа / М.Л. Белов, В.И. Козинцев, В.А. Городничев и др. // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. – 2004. – № 1-2. – С. 55-59.

29. Городничев В.А. Разработка алгоритмов оперативного поиска набора спектральных каналов измерения для лидара дифференциального поглощения на ПГС // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2005, Т. 3, № 4-5. – С. 44-49.

30. Основы количественного лазерного анализа: Учебное пособие / В.И. Козинцев, М.Л. Белов, В.А. Городничев, Ю.В. Федотов; Под ред. В.Н. Рождествина. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 464 с.

Подписано к печати 22.04.09. Заказ № 296
Объем 2,0 печ.л. Тираж 100 экз.
Типография МГТУ им. Н.Э. Баумана
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5
263-62-01