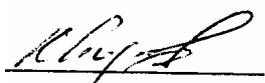


*На правах рукописи*



**БИРЮКОВ ВЛАДИМИР ГЕОРГИЕВИЧ**

**ЭКСПРЕСС-МЕТОДЫ И СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ  
ПРИРОДНЫХ СРЕД И ВЕЩЕСТВ  
НА ОСНОВЕ КОМБИНИРОВАННЫХ ОПТИЧЕСКИХ  
И ЛЕНГМЮРОВСКИХ ЭФФЕКТОВ**

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

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Тамбов 2004  
Работа выполнена в Институте экспериментальной метеорологии  
ГУ НПО «Тайфун» Росгидромета (г. Обнинск).

**Научный руководитель** кандидат физико-математических наук,  
доцент  
*Иванов Владимир Николаевич*

**Официальные оппоненты:** доктор технических наук, профессор  
*Мордасов Михаил Михайлович*

кандидат технических наук, профессор  
**Соловьев Виктор Александрович**

**Ведущая организация**                    Институт оптического мониторинга  
СО РАН (г. Томск)

Защита диссертации состоится 27 декабря 2004 г. в 13 часов на заседании диссертационного совета Д 212.260.01 Тамбовского государственного технического университета по адресу: 392000, г. Тамбов, Советская, 106, ТГТУ, конференц-зал.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, скрепленные гербовой печатью, просим направлять по адресу: 392000, г. Тамбов, Советская, 106, ТГТУ, секретарю диссертационного совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ТГТУ.

Автореферат разослан 25 декабря 2004 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор технических наук, профессор

А.А. Чуриков

---

Подписано к печати 24.11.2004  
Гарнитура Times New Roman. Формат 60 × 84/16. Бумага офсетная.  
Печать офсетная. Объем: 0,93 усл. печ. л.; 1,0 уч.-изд. л.  
Тираж 100 экз. С. 820<sup>М</sup>

Издательско-полиграфический центр ТГТУ  
329000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность.** Проблема загрязнений окружающей среды (атмосферы, водоемов, сельхозугодий, лесов, почв и др.), обострившаяся в последние два-три десятилетия, требует поиска путей создания сравнительно дешевых и мобильных средств экспресс-анализа сред, их охраны и реабилитации. Эта чрезвычайно тревожная проблема, к сожалению, находит понимание лишь у небольшой части населения Земли и России в частности. Активные благородные намерения «зеленых» остановить разрушающее воздействие человека на природную среду, пропаганда знаний приводят к изменению отношений человечества к природе, в школах введены предметы по изучению экологии, создаются кафедры во многих учебных заведениях.

Изучение природной среды осложнено слабым развитием методов исследования и экспериментальной базы по созданию средств контроля и анализа, что отягощает решение научных и производственных задач на предприятиях химической, пищевой, энергетической, нефтяной и других отраслей промышленности, которые связаны с большими потребностями исходных продуктов для обеспечения технологических процессов, влияющих на геофизическое и экологическое состояние Земли как планеты. Иногда эти процессы сопровождаются непреднамеренными выбросами отходов производств и сопутствующих загрязнителей в атмосферу, почву, на растительные покровы, в отстойные сооружения, природные водоемы, реки, вызывают нежелательные и даже опасные ситуации с жизнеобеспечением работающего персонала и проживающего вблизи предприятий населения. Случается, что производственные процессы сопровождаются чрезвычайно сильным негативным воздействием на экологическое состояние природных сред и окрестных территорий, реабилитация которых требует больших затрат или она вообще на современном уровне не удается.

Недостаточно развиты и методы оперативного контроля жидких сред, замутненных минеральными и органическими веществами, при производстве и сжигании углеводородного топлива, при производстве кислот, спиртов, сахаров и др. Неблагоприятная ситуация сложилась при контроле состава жидких сред, бард, сброженных продуктов, являющихся кормами для животных. Существующие высокоточные резонансные и хроматографические методы контроля в промышленности часто не пригодны из-за сложности в эксплуатации, большой стоимости и медлительности проведения контрольных операций, поэтому их не всегда можно применить для управленческих функций, когда требуется мгновенная корректировка и исправление технологического процесса. Необходимы «быстрые» методы, которые разработаны и апробированы для решения этих задач, и предполагаем в дальнейшем их более широко использовать в экологических и гидрометеорологических исследованиях и производственных технологиях.

**Цель работы.** Диссертационная работа направлена на разработку комбинированных (оптических и ленгмюровских) методов исследования состояния атмосферы и жидких, в том числе мутных сред, на основе современных научно-технических достижений оптико-электроники, физики атмосферы и гидросферы, технологии получения моно- и мультимолекулярных ленгмюровских слоев, которые в совокупности позволили найти новые приемлемые решения по созданию высокочувствительных, надежных, мобильных и сравнительно дешевых средств измерений и получить результаты исследований в виде различных характеристик состояния атмосферы, жидких сред и веществ.

Для достижения этой цели были поставлены и выполнены следующие работы:

- 1) проведен обзор и проанализированы возможности физико-химических, оптико-физических, ленгмюровских (поверхностного натяжения) и других методов исследования в задачах обнаружения, распознавания и контроля природных сред и продуктов; 2) выявлена наиболее информативная тонкая спектральная структура поглощения излучения веществами в интервале 1,4 ... 12 мкм, содержащих радикалы С–Н и О–Н; 3) разработаны научно-методические основы построения быстродействующих систем обнаружения примесей веществ в атмосфере и жидких средах; 4) на основе разработанных образцов двухвходных приемников излучения из JnSb и CdHgTe (77 К) и клиновых интерференционных циркулярных светофильтров разработан быстродействующий спектроанализатор; 5) получены данные о пропускании атмосферы при различных концентрациях паров спиртов в помещениях; 6) создан сканирующий радиометр – сигнализатор – для контроля загазованности атмосферы вредными газами в помещениях и дистанционного контроля температуры замкнутых объемов; 7) разработан дистанционный экспресс-метод и устройство распознавания загрязнений водоемов нефтепродуктами; 8) модернизирована уста-

новка для контроля веществ, в том числе и замутненных, на основе ленгмюровских моно- и мультимолекулярных слоев.

**Научная новизна.** Диссертационная работа представляет законченное научное исследование, содержащее комплексное решение задачи разработки и построения систем обнаружения, распознавания и исследования состояния атмосферы, жидких, в том числе, мутных сред, продуктов и примесей в них на основе новых оптико-электронных и ленгмюровских методов и экспресс-средств измерений, имеющей важное народно-хозяйственное значение в измерительной технике, прикладной физике атмосферы и гидросферы и экологии.

Научная новизна заключается в следующем.

1 Разработан новый метод обнаружения примесей в атмосфере и жидких средах, основанный на одновременной регистрации одинаковых по спектральному составу излучений, прошедших через среду с известным эталонным веществом и среду (среды) с веществами, загрязненными посторонними примесями, зарегистрированных также одновременно. Для реализации этого метода разработана неизвестная ранее оптико-электронная система (ОЭС) – спектроанализатор для обнаружения примесей в веществах, для которой специально разработан высокочувствительный быстродействующий двухвходовый приемник излучения на основе соединений  $\text{JnSb}$  и  $\text{CdHgTe}$ , охлаждаемый жидким азотом.

Применение двухвходового приемника в ОЭС позволяет создать двухлучевую дифференциальную схему с одноканальным выходом, что дает возможность существенно повысить точность измерений, увеличить быстродействие, упростить систему и повысить ее надежность в эксплуатации. Такая система имеет идентичные элементы в опорном и исследуемом каналах и влияние на приемник посторонних излучений одинаково сказывается на характеристики обоих каналов, таким образом отношение сигналов в исследуемом и опорном (эталонном) каналах остается постоянным.

В двухвходовом приемнике излучения установлены охлаждаемые жидким азотом диафрагмы, вы-

полненные в виде цилиндров с отверстиями, представляющие бленды, ограничивающие влияние по-

стороннего немодулированного излучения (засветки) на пороговую и вольтовую чувствительность

оптико-электронной системы, что приводит также к повышению точности измерений излучающих

(поглощающих) объектов и позволяет использовать измерительную систему в нетермостабилизиро-

ванной среде.

В оптико-электронной системе измерений характеристик природных сред используется излучатель – модель абсолютно-черного тела – выполненный в виде глобара, излучение от которого селективируется специально разработанным клиновым циркулярным высококонтрастным интерференционным светофильтром в диапазоне 1,4 ... 12 мкм или турелью со сверх-узкополосными интерференционными светофильтрами, что приводит к повышению функциональных возможностей оптико-электронной системы измерений: увеличению рабочего спектрального диапазона, использование которого позволяет обнаруживать присутствие посторонних примесей в веществах, уменьшить время экспресс-анализа.

На оптико-электронную систему (спектроанализатор МПК-7 G01 J 3/28) по заявке № 2003104964/28(005317) от 20.02.2003 г. получен патент России на изобретение № 2230229 от 10 июля 2004 г.

2 Для определения степени взрывобезопасности загазованной атмосферы рабочих помеще-

ний и спиртохранилищ проведены оценки опасных уровней концентраций паров спиртов, впервые

определены их коэффициенты пропускания в интервале 8 ... 11,5 мкм. По результатам исследования

спектрального поглощения (пропускания) загазованной атмосферы разработана система сигнализа-

ции (предупреждения и оповещения работающего персонала) на основе малогабаритного сканирующего радиометра.

3 Разработан новый комбинированный корреляционный метод и система обнаружения нефтепродуктов и других веществ на поверхности водоемов, содержащая многоканальный – четырехканальный радиометр с каналами на интервалы длин волн: 1) 1,2 ... 1,4; 2) 1,5 ... 1,7; 3), 4) 8 ... 13 мкм с пороговой чувствительностью не хуже  $10^{-7}$  Вт·см<sup>-2</sup>·ср<sup>-1</sup>·мкм<sup>-1</sup> в первом и втором интервалах и  $10^{-5}$  Вт·см<sup>-2</sup>·ср<sup>-1</sup>·мкм<sup>-1</sup> – в третьем и четвертом интервалах (спектральная яркость пленки из нефтепродуктов на воде толщиной 20 ... 50 мкм при солнечном освещении колеблется в пределах от  $10^{-6}$  Вт·см<sup>-2</sup>·ср<sup>-1</sup>·мкм<sup>-1</sup> до  $4 \cdot 10^{-4}$  Вт·см<sup>-2</sup>·ср<sup>-1</sup>·мкм<sup>-1</sup>, а ночью в диапазоне 8 ... 13 мкм достигает яркости  $\sim 4 \cdot 10^{-4}$  Вт·см<sup>-2</sup>·ср<sup>-1</sup>·мкм<sup>-1</sup>), и устройство для определения концентраций нефтепродуктов на поверхности воды и других примесей на основе метода поверхностного натяжения.

Создана установка для распознавания примесей в жидких, в том числе и мутных средах, на основе моно- и мультимолекулярных ленгмюровских слоев, позволяющий в более короткие сроки, по сравнению с другими средствами измерений, определять наличие примесей в средах и продуктах.

Получены результаты исследований загрязнений водных поверхностей нефтепродуктами при помощи ленгмюровского экспресс-метода по зависимости поверхностного давления от площади, занимаемой молекулярным слоем, определены предельные концентрации загрязнений поверхности воды площадью  $\approx 200$  см<sup>2</sup> до  $10^{-5}$  ml, что по чувствительности сравнимо с весьма сложными резонансными и хроматографическими методами.

**Практическая значимость.** Диссертация выполнена на основе работ, проводившихся по планам Росгидромета, и внутренним планам НПО «Тайфун» и ОАО «Талвис» в 1992 – 2002 гг. Она была стимулирована повышающимися требованиями заказчиков и потребителей к контролю качества продукции, к созданию новых современных технологий производства, к модернизации существующих технологий создания средств измерений характеристик атмосферы и жидких веществ, улучшения экологического состояния окружающей природной среды района производства продукции и производственных помещений.

Работы, выполненные автором самостоятельно и в соавторстве, используются во многих разработках НПО «Тайфун», ОАО «Талвис», Военном университете войсковой ПВО ВС РФ, Всероссийском научно-исследовательском институте сельскохозяйственной метеорологии (подтверждено актами внедрения) и могут использоваться в учреждениях Росгидромета, Министерства природных ресурсов, Министерства сельского хозяйства, в предприятиях оптического, гидрометеорологического, геофизического и экологического профиля.

**Достоверность результатов.** Полученные в диссертации результаты имеют всестороннее научное обоснование и аргументацию, основанных на статистически обеспеченных данных измерений, анализе современных методов и научно-технических достижений, разработанных макетов узлов, блоков и элементов аппаратуры, многие из которых являются новыми, высококачественными, имеют высокие технические и эксплуатационные параметры и успешно работают в макетах.

**Апробация работы и публикации.** Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на:

- Пятом совещании по распространению лазерного излучения в дисперсной среде (г. Обнинск, 1992 г.);
- XII Межреспубликанском симпозиуме по распространению излучения в атмосфере и водных средах (г. Томск, 1993 г.);
- I Международном симпозиуме «Оптика атмосферы и океана» (г. Томск, 1994 г.);
- Всероссийской конференции (с международным участием) «Микроклимат ландшафтов» (С.-Петербург, 1995 г.);
- II Межреспубликанском симпозиуме «Оптика атмосферы и океана» (г. Томск, 1995 г.);
- Научной конференции по результатам исследований в области гидрометеорологии и мониторинга загрязнения природной среды (Москва, 1996 г.);

- Всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы (г. Нальчик, 1997 г.);
- Международной конференции «Прикладная оптика-98» (С.-Петербург, 1998 г.);
- VIII Международном симпозиуме «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» (г. Иркутск, 2001);
- Всероссийской научной конференции «Дистанционное зондирование земных покровов и атмосферы аэрокосмическими средствами» (г. Муром, 2001 г.);
- Всероссийской конференции по «Физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы» (г. Нальчик, 2001 г.);
- Научной конференции по результатам исследования в области гидрометеорологии и мониторинга загрязнения природной среды (С.-Петербург, апрель 2002 г.);
- Международном симпозиуме стран СНГ по атмосферной радиации (С.-Петербург, июнь 2002 г.);
- XIV Международном симпозиуме по молекулярной спектроскопии высокого разрешения (г. Красноярск, июль 2003 г.);
- 12-ой Военно-научной конференции Военного университета войсковой ПВО ВС РФ (г. Смоленск, апрель 2004 г.);
- Международной конференции стран СНГ по атмосферной радиации (МСАР-4) (С.-Петербург, июнь 2004 г.).

Результаты диссертации опубликованы в шести научных статьях, опубликованных в реферируемых источниках, одиннадцати расширенных тезисах докладов и докладах, в описании изобретения.

**Личный вклад** диссертанта заключается в непосредственном участии в работах на всех этапах исследований, включая постановку задачи, разработку конструкций элементов и узлов оптико-электронной аппаратуры, проведение лабораторных и натурных исследований атмосферы, жидких сред и анализ результатов, написание текстов статей и докладов на конференции и симпозиумы, разработку изобретения.

**Структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, содержит 115 страниц, включая 30 рисунков и фотографий, 8 таблиц, 123 наименования литературных источников и приложение – акты о внедрении.

## СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

**В первой главе** кратко описаны основные физико-химические, оптико-физические, лэнгмюровские и другие методы исследований природных сред, веществ и примесей в них, широко применяемые в научных и производственных лабораториях, освещены их возможности, достоинства и недостатки с учетом их использования в экспресс-анализе, стоимостной оценки и применения в разнообразных условиях: климатических, географических, метеорологических и производственных.

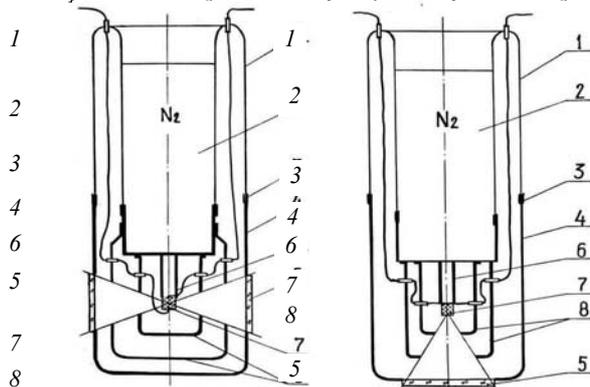
**Во второй главе** весьма подробно освещен метод создания и исследования лэнгмюровских моно- и мультимолекулярных слоев веществ как наиболее перспективный, высокочувствительный, сравнительно дешевый и «быстрый». Приводятся сведения о применении этого метода в различных научно-технических направлениях, он привлекателен для контроля примесей в жидких средах, в том числе и замутненных, по коэффициенту поверхностного натяжения веществ. Приводится историческая справка развития метода, технологические аспекты высадки моно- и мультимолекулярных слоев веществ на твердые подложки для последующего оптического (спектрального) электрофизического и других анализов примесей в веществах в различных научных и практических задачах.

**В третьей главе** рассмотрены научно-методические вопросы разработки высокочувствительных быстродействующих оптико-электронных средств обнаружения и распознавания состояния сред (атмосферы, водных сред и веществ) по их излучению (пропусканию, поглощению).

Приводятся описания однолучевых, двухлучевых, одноканальных и двухканальных оптико-электронных систем, созданных на одноэлементных приемниках излучения. Показаны преимущества системы анализа, специально разработанной на основе приемника излучения с двумя входами из JnSb и

GdHgTe (рис. 1), охлаждаемого жидким азотом, приводятся алгоритмы расчетов погрешностей измерений спектрорадиометрической аппаратурой.

Возможные погрешности измерений излучений сред, которые могут проявиться из-за:



**Рис. 1 Приемники излучения:**

1 – корпус приемника, стекло; 2 – жидкий или твердый азот; 3 – спай стекло-ковар; 4 – медный корпус; 5 – окно из германия, сапфира или из  $BaF_2$ ; 6 – держатель кристалла; 7 – кристалл: InSb, CdHgTe; 8 – охлаждаемая диафрагма

- влияния немодулированного постороннего излучения на параметры приемника излучения:

$$S/S_0 = 1 - a(E/E_0 - 1)^{1/4}; \quad (1)$$

$$P/P_0 = 1 + b(E/E_0 - 1)^{1/2}, \quad (2)$$

где  $S/S_0$  и  $P/P_0$  – относительная вольтовая и пороговая чувствительности приемников CdHgTe(77K);

$$E_0 = \sin^2(\beta/2) \int_0^\infty r(\lambda, T_0) S(\lambda) d\lambda, E = \frac{g_{a.ч.т.}}{\pi\alpha^2} \int_0^\infty r(\lambda, T_n) S(\lambda) d\lambda, \quad (3)$$

где  $E_0$  и  $E$  – начальная и изменяющаяся фоновые засветки, действующие на приемник излучения в его апертурном угле  $\beta$  при температуре окружающей среды  $T_0$ ,  $T_n$  – температура, при которой градуирована система, при изменении температуры среды;  $r(\lambda, T_0)$  и  $r(\lambda, T_n)$  – функции Планка для температуры  $T$  и  $T_n$  абсолютно черного тела (а.ч.т.) соответственно;  $a$  и  $b$  – коэффициенты;  $g_{a.ч.т.}$  – площадь диафрагмы а.ч.т.;

- несовершенства изготовления модулирующих устройств, искажающих фронт импульса излучающей энергии от источника:

$$U_c/U_{ш} \cong 8\sqrt{\pi}/(\sigma^2 n), \quad (4)$$

где  $\sigma^2$  – дисперсия отклонения лопасти модулятора от заданного размера;

- изменения коэффициента отражения оптических элементов;
- фоновых характеристик фильтров электромагнитного излучения:

$$\sigma(\lambda, \lambda_0, \Delta\lambda) = \frac{\int_0^\infty [r(\lambda, T) - r(\lambda, T_m)] S(\lambda) \tau_\phi(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty [r(\lambda, T) - r(\lambda, T_m)] S(\lambda) d\lambda}, \quad (5)$$

где  $\lambda_0$  – длина волны в максимуме пропускания фильтра;  $\Delta\lambda$  – полуширина фильтра;  $S(\lambda)$ ,  $\tau_\phi(\lambda)$  – спектральные характеристики приемной системы и интерференционного фильтра соответственно;

- нестабильности температуры  $T$  источника излучения  $\Phi_0(\lambda, T)$ , применяемого при метрологической аттестации:

$$\sigma(\lambda, T \pm \Delta T) = \Phi(\lambda, T + \Delta T) / \Phi_0(\lambda, T); \quad (6)$$

- нестабильности частоты модуляции.

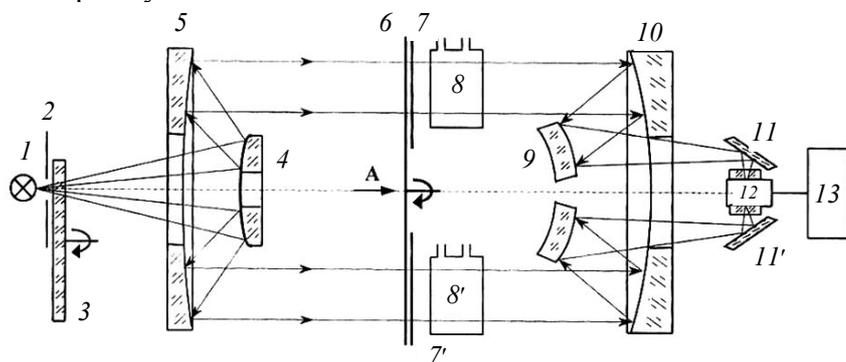
В главе приводятся измеренные спектры поглощения различных и сходных между собой веществ с различными примесями, оцениваются возможности наиболее точного определения примесей в различных спектральных интервалах.

Наиболее информативной областью для выявления колебательных спектров молекул групп C–H, O–H является область от 1,0 до 12 мкм.

В этой области особенно интересны полосы поглощения этанола, метанола, сивушного масла, альдегида, которые относятся к интервалу 7 ... 12 мкм. Приводится анализ спектров поглощения этих веществ и в интервалах 2,3 ... 2,6 мкм и 3 ... 6 мкм, которые также могут быть использованы в оптико-электронных системах распознавания веществ, рекомендации по оценке концентраций воды в различных растворах по полосам поглощения воды в интервалах 1,41 ... 1,61 мкм и 1,86 ... 1,96 мкм. Описаны метод и алгоритмы, применяемые при корреляционном анализе веществ по полосам поглощения длин волн, «завуалированных» влиянием других посторонних веществ.

**В четвертой главе** приведена двухлучевая двухканальная (одноканальная) оптико-электронная система обнаружения примесей (рис. 2). Особенность этой схемы заключается в том, что в ней используются специально разработанные двухвходовые охлаждаемые приемники излучения на основе  $\text{InSb}$  (77 К) и  $\text{CdHgTe}$  (77 К) (рис. 1).

Двухвходовый приемник от обычных широко распространенных приемников отличается наличием двух окон (их может быть и больше), через которые проходят излучения в различных каналах и регистрируются одним чувствительным элементом, помещенным в интегрирующую камеру, увеличивающую квантовую эффективность кристалла, что повышает его чувствительность. Как известно, двухлучевые двухканальные системы анализа при всех их преимуществах не всегда являются стабильными по параметрам из-за применения двух приемников излучения. Приведенная оптическая система имеет основные преимущества.



**Рис. 2** Схема спектроанализатора:

1 – источник излучения; 2 – диафрагма; 3 – циркулярный клиновидный интерференционный светофильтр; 4, 5 – зеркала объектива; 6 – частотный растр;

7, 7' – маски эталонного и исследуемого каналов; 8, 8' – кюветы с эталонным и исследуемым веществами; 9, 10 – зеркала приемного объектива;

11, 11' – отражающие зеркала эталонного и исследуемого каналов; 12 – приемник излучения с двумя входами; 13 – система регистрации и обработки информации

1 Система обеспечивает постоянство отношений сигналов в исследуемом и опорном каналах, если даже чувствительность приемника по каким-либо причинам изменялась за время измерений, например при эксплуатации в натуральных условиях; для этого в большинстве классических систем используется термостабилизация приемника, а иногда и всего прибора. В нашем случае термостабилизацию проводить не обязательно, так как собственное излучение оптических элементов и модулятора равны как в исследуемом, так и в опорном каналах.

2 Поскольку оптические каналы независимы друг от друга, модуляция спектров поглощения веществ может осуществляться с различными частотами при использовании частотного растра, причем каждому анализируемому веществу соответствует определенная частота. Разночастотная модуляция сигналов в опорном и исследуемом каналах позволяет применять различные фильтры частот, инвертировать сигналы и проводить с ними различные операции. Схема может использоваться для анализа нескольких веществ одновременно.

Система может работать при одночастотной модуляции излучений, проходящих через кюветы. В этом случае маски в опорном или исследуемом каналах смещаются на одну лопасть модулятора, при этом размеры щелей и лопастей должны быть одинаковыми и на частотном растре и маске. При смещении модуляция в каналах осуществляется в противофазе, т.е. в исследуемом канале кювета открыта, в опорном – закрыта, и наоборот.

Фотография приемного оптико-электронного блока анализатора приведена на рис. 3.

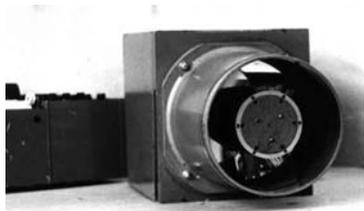


Рис. 3 Общий вид приемного оптико-электронного блока макета анализатора веществ

Уравнение двухлучевой двухканальной (одноканальной) системы может быть записано в виде

$$G(\lambda) = V[F_{\lambda}(V)W(\lambda) - F'_{\lambda}(V)W'(\lambda)], \quad (7)$$

где  $G(\lambda)$  – выходная величина;  $V$  – входная величина, например концентрация измеряемого компонента в исследуемом и опорном каналах;  $W(\lambda)$  и  $W'(\lambda)$  – передаточные функции исследуемого и опорного каналов;  $F_{\lambda}(V)$  и  $F'_{\lambda}(V)$  – коэффициенты преобразования в исследуемом и опорном каналах:

$$F_{\lambda}(V) = \frac{1}{V} \int_{\lambda_i}^{\lambda_j} \Phi_0(\lambda) (1 - e^{-k(\lambda)d}) d\lambda; \quad (8)$$

$$F'_{\lambda}(V) = \frac{1}{V} \int_{\lambda_i}^{\lambda_j} \Phi_0(\lambda) (1 - e^{-k_0(\lambda)d}) d\lambda, \quad (9)$$

где  $\lambda_i, \lambda_j$  – длины волн спектра поглощения веществ;  $\Phi_0(\lambda)$  – начальный световой поток;  $k(\lambda), k_0(\lambda)$  – коэффициенты поглощения вещества в исследуемом и опорном каналах;  $d$  – толщина поглощающего слоя.

При использовании приемников излучения на основе JnSb (77 К) и CdHgTe (77 К) система может измерять спектры поглощения в диапазоне 1,4 ... 12 мкм. Показан метод анализа пропускания  $\tau(\lambda)$  жидких сред, (растворов) спирта C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH ГОСТ 5962–67, загрязненного водой в соотношениях по объему: на 100 частей спирта 2, 4, и 6 частей дистиллированной воды; сивушным маслом в соотношениях: на 100 частей спирта 0,5 и 1 часть соответственно. Определены наиболее информативные длины волн для оценки концентраций воды в спирте (6,1, 6,4 и 6,5 мкм) и сивушного масла (9,9, 10,0 и 10,3 мкм), на которых пропускание  $\tau(\lambda)$  растворов заметно изменяется (ухудшается). Результаты приведены в таблицах.

Даны описание сканирующего радиометра для измерений излучений низкотемпературных источников (замкнутых объемов) и атмосферы в диапазоне 8 ... 13 мкм и его фотография (рис. 4) и схема радиометра (рис. 5).

Приведены также известные в практике методика и алгоритмы градуировочных работ с использованием многосотовой модели абсолютно черного тела, паспортизованного по вторичному государственному эталону.

В этой главе приведено описание системы контроля загазованности парами спирта помещений, хранилищ и производственных предприятий. Варианты системы контроля спиртохранилища.

Пропускание загазованной формуле

$$\tau(\lambda) = \exp - [K(\nu)\omega\alpha],$$

где  $K(\nu)$  – коэффициент поглощения паров спирта в атмосфере на частоте  $\nu$  в см<sup>-1</sup>;  $\omega$  – концентрация паров спирта этанола – C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH ГОСТ 5962–67;  $\alpha$  – длина трассы.

Спектральное пропускание при различных концентрациях паров спирта определялось при помощи спектрометра ИКС-29. Спектры пропускания приведены для интервала 8 ... 13 мкм.

Предельный уровень концентраций паров, с точки зрения взрывобезопасности и пожаробезопасности, был определен по ГОСТ 5964–93 и равен  $0,15 \cdot 10^{-3} \text{ г} \cdot \text{м}^{-3}$ .

В эксперименте использован сканирующий радиометр, в котором установлен интерференционный светофильтр на интервал 9,2 ... 9,56 мкм, разработанный в НПО «Тайфун» специально для этой задачи. В качестве источника излучения был изготовлен излучатель – модель абсолютно черного тела с диафрагмой диаметром 20 мм, находящийся при температуре 313 К.

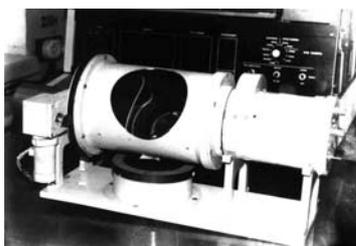
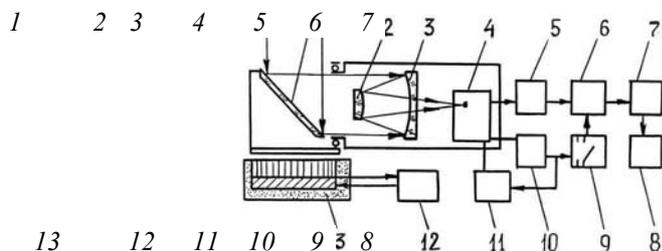


Рис. 4 Сканирующий абсолютный радиометр

описание системы контроля атмосферы производственных окрестных территорий В качестве одного из предложенных опробован в помещении

атмосферы  $\tau(\lambda)$  определялось по



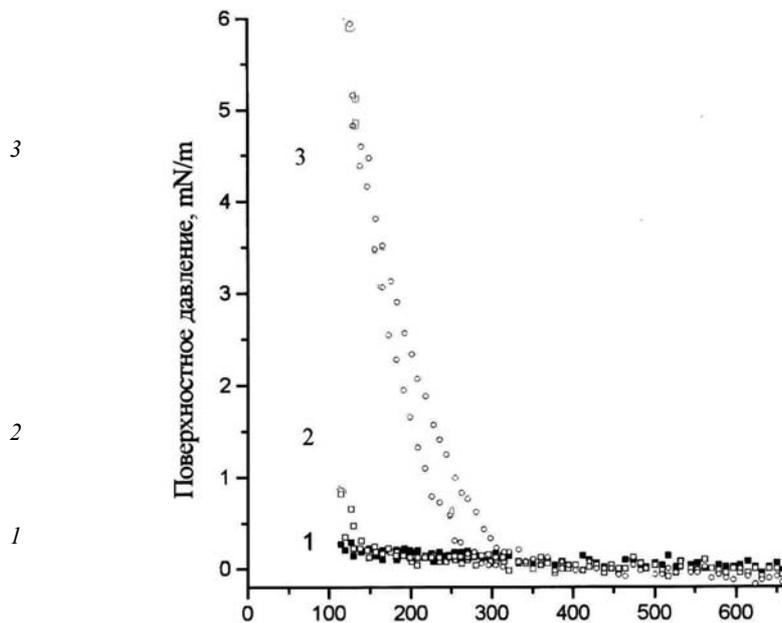
**Рис. 5 Оптико-электронная блок-схема сканирующего абсолютного радиометра:**

1 – регистрирующее устройство, плоское сканирующее зеркало; 2, 3 – объектив Кассегрена; 4 – блок регистрации и сравнения излучения; 5 – селективный усилитель; 6 – синхронный детектор; 7 – фильтр нижних частот; 8 – 9 – ключи на полевых транзисторах; 10 – усилитель фотодиода; 11 – блок стабилизации частоты модуляции; 12 – термостат; 13 – модель абсолютно черного тел

Приведен расчет пороговой чувствительности по освещенности, которая оказалась равной  $1,9 \cdot 10^{-9}$  Вт · см<sup>-2</sup>, что в 30 раз ниже регистрируемого потока от источника излучения. Предполагается аналогичную систему сигнализации установить для контроля аммиака и метана в других производственных помещениях.

В этой же главе приведены система и технология экспресс-анализа на основе моно- и мультимолекулярных структур слоев веществ. Описана процедура подготовки монослоя и высадки его на твердую подложку для проведения анализа. Приведена схема установки и полученные результаты анализа воды, загрязненной нефтепродуктами, на основе коэффициента поверхностного натяжения «чистой» воды и загрязненной нефтепродуктами (рис. 6).

Приводятся рекомендации по использованию метода оценки поверхностного натяжения для анализа жидких сред, в том числе и замутненных, в научных и производственных лабораториях как наиболее чувствительный, надежный в эксплуатации, мобильный и сравнительно «быстрый» – экспресс-метод.



Площадь молекулярного слоя нефтепродуктов, см<sup>2</sup>

**Рис. 6 Зависимость поверхностного давления слоя керосина от площади молекулярного слоя:**

1 – чистая поверхность воды; 2 – с керосином объемом 0,00005 ml;  
3 – объемом 0,0004 ml

В четвертой главе предложен авиационный корреляционный метод определения загрязнений водных поверхностей нефтепродуктами при помощи многоканального четырехканального радиометра на по-

лосы повышенного отражения нефтепродуктов в интервалах: 1,2 ... 1,3 мкм (первый канал), 1,5 ... 1,7 мкм (второй канал) и 8 ... 13 мкм (третий и четвертый каналы). Все четыре канала радиометра объединены в одном корпусе и сопряжены по оптическим осям с погрешностью не более двух минут дуги (угол поля зрения радиометра составляет 24 минуты дуги), что позволяет использовать метод для определения загрязнений водной поверхности в условиях волнения, так как пространственная структура элемента поверхности, соответствующего пространственному разрешению каналов, практически одинаковая.

Первые два канала могут использоваться при солнечном излучении днем, два длинноволновых — ночью по отраженному собственному излучению неба.

При наличии пленки на воде будут всегда существовать корреляционные связи, что может быть принято как сигнальная информация. Количественная оценка концентраций нефтепродуктов может быть определена методом поверхностного натяжения на наблюдательном посту. Новый метод апробирован в лабораторных условиях и предлагается применить его в районах повышенного риска загрязнений: в прибрежных зонах нефтеналивных станций, курортных зон, при контроле нефтепроводов, проложенных под водой, для контроля состояния воды в водохранилищах.

В конце диссертации приведено заключение, список использованных источников и приложение о внедрении результатов.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

- Проведен краткий обзор и анализ физико-химических, оптико-физических, резонансных и других методов, применяемых при исследованиях атмосферы, воды и других жидких сред и продуктов и примесей в них, оценены их достоинства и недостатки при использовании их в натуральных условиях, научных и производственных лабораториях.

- Подробно освещен лэнгмюровский метод исследования моно- и мультимолекулярных слоев веществ, показано, что по своей чувствительности он не уступает хроматографическим, масс-спектрометрическим и резонансным методам, является весьма дешевым, доступным для широкого применения, как экспресс-метод и в совокупности со спектральными (оптическими) методами может использоваться как наиболее предпочтительный в технологических процессах при измерениях физических свойств жидких, в том числе загрязненных (мутных) сред минеральными частицами и жидкими примесями. Особенно перспективен в натуральных условиях для контроля загрязненных жидких сред, растворов, содержащих спирты, кислоты и другие примеси.

- Разработаны научно-методические основы создания быстродействующей оптико-электронной аппаратуры контроля состояния атмосферы, жидких сред, технических (кислот, водных растворов, спиртов и др.) продуктов на основе специально разработанных: двухходовых приемников излучения из JnSb и CdHgTe (77 К); широкодиапазонного (по спектру длин волн) излучателя, содержащего модель абсолютно черного тела в виде глобара и циркулярных клиновых интерференционных фильтров электромагнитного излучения; сверхузкополосных (до единиц ангстрем) интерференционных светофильтров; многочастотного раstra-модулятора и других элементов аппаратуры.

- С целью повышения точности измерений оценены основные погрешности, которые могут возникнуть при измерениях физических параметров атмосферы, жидких сред и веществ спектрорадиометрическими средствами.

- Создан макет спектроанализатора на диапазон 1,4 ... 12 мкм. Определены значения концентраций примесей в веществах по их пропусканию (поглощению). Показана возможность его широкого использования для контроля газообразных и жидких сред. На спектроанализатор получен патент Российской Федерации на изобретение № 2230229 от 10 июня 2004 г.

- Впервые получены результаты исследований поглощения излучения парами спирта этанола в диапазоне 8 ... 13 мкм, определено их пропускание на различных длинах трасс при различных концентрациях.

- Для определения степени взрывобезопасности загазованной атмосферы рабочих помещений и спиртохранилищ проведены оценки опасных уровней концентраций паров спиртов. По результатам исследования спектрального поглощения (пропускания) загазованной атмосферы создан макет скани-

рующего спектро радиометра для дистанционного контроля: состояния атмосферы в производственных помещениях и в районе расположения производственных предприятий.

- Разработан дистанционный корреляционный метод оценки загрязнений водоемов нефтепродуктами, позволяющего обнаруживать отраженное солнечное и собственное излучение неба от пленки из нефтепродуктов как в «спокойных» условиях, так и в условиях взволнованной водной поверхности.

- Модернизирован макет установки по определению примесей в жидких, в том числе и мутных, средах.

- Получены результаты исследований загрязнений воды нефтепродуктами (до  $10^{-5}$  мℓ на поверхности  $\approx 200$  см<sup>2</sup>), спиртов, их растворов и других жидких продуктов.

### СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1 Бирюков В.Г. Сканирующий абсолютный радиометр для измерения низкотемпературных излучений / В.Г. Бирюков, Н.Д. Третьяков // Труды ИЭМ. С.-Пб., 1995. Вып. 25(160). С. 132 – 137.

2 Алленов М.И. Методические вопросы разработки быстродействующей системы обнаружения примесей в продуктах и природных средах / М.И. Алленов, А.М. Ашихмин, В.Г. Бирюков // Труды ИЭМ. С.-Пб., 1995. Вып. 25(160). С. 94 – 102.

3 Алленов М.И. Метод определения качества продуктов и состояния природных сред на основе ленгмюровских пленок / М.И. Алленов, В.Г. Бирюков, С.Г. Юдин // Труды ИЭМ. С.-Пб., 1995. Вып. 26(161).

С. 106 – 112.

4 Комбинированный метод определения оптико-физических свойств жидких сред / М.И. Алленов, В.Г. Бирюков, А.Д. Доброзраков, Г.А. Савин, С.Г. Юдин // Всерос. конф. «Микроклимат ландшафтов»: Тез. докл. С.-Пб., 1995. С. 12.

5 Алленов М.И. Оптический метод исследования веществ в продуктах и природных средах в ИК диапазоне спектра / М.И. Алленов, В.Г. Бирюков // Труды ИЭМ. С.-Пб., 1996. Вып. 26(161). С. 113 – 119.

6 Быстродействующая система обнаружения малых примесей в продуктах и природных средах / М.И. Алленов, А.М. Ашихмин, В.Г. Бирюков, В.Г. Булгаков, Н.Д. Третьяков // Пятое совещание по распространению лазерного излучения в дисперсной среде: Тез. докл. Обнинск, 1992. С. 71.

7 Алленов М.И. Оптическая система обнаружения примесей в продуктах и природных средах / М.И. Алленов, А.М. Ашихмин, В.Г. Бирюков // Материалы XII Межреспубл. симпоз. по распространению излучения в атмосфере и водных средах. Томск, 1993.

8 Алленов М.И. Спектро радиометрическая аппаратура для оперативного контроля состояния атмосферы и определения примесей в продуктах / М.И. Алленов, В.Г. Бирюков, Н.Д. Третьяков // Материалы I Межреспубл. симпоз. «Оптика атмосферы и океана». Томск, 1994. С. 200.

9 Ленгмюровские методы исследований веществ и примесей в них на основе моно- и мультимолекулярных слоев / М.И. Алленов, В.Г. Бирюков, В.И. Гусев, С.Г. Юдин // Труды ИЭМ. С.-Пб., 1997. Вып. 28(163).

С. 132 – 160.

10 Оптическая система анализа веществ на основе разночастотной модуляции / М.И. Алленов, В.Г. Бирюков, В.И. Гусев, В.В. Овчинников // Труды ИЭМ. С.-Пб., 1997. Вып. 28(163). С. 127 – 131.

11 Алленов М.И. Методы контроля веществ и примесей в них на основе ленгмюровских пленок / М.И. Алленов, В.Г. Бирюков, С.Г. Юдин // Науч. конф. по результатам исследований в области гидрометеорологии и мониторинга загрязнения природной среды: Тез. докл. М., 1996. С. 36 – 37.

12 О методе и результатах дистанционного распознавания жидких сред, загрязненных минеральными частицами и нефтепродуктами / М.И. Алленов, В.Г. Бирюков, Е.В. Караваева, Н.Д. Третьяков, С.Г. Юдин // Всерос. науч. конф. «Дистанционное зондирование земных покровов и атмосферы аэрокосмическими средствами»: Сб. докл. Муром, 2001. С. 326 – 328.

13 Бирюков В.Г. Метод и устройство для определения примесей в осадках и других жидких средах / В.Г. Бирюков, С.Г. Юдин, М.И. Алленов // Всерос. конф. по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы: Тез. докл. Нальчик, 2001. С. 48 – 51.

14 A Combined (Spectral and Langmuir) Method for Detection of Water Basins Contaminated by Oil Products / M.I. Allenov, V.G. Biryukov, N.D. Tretiakov and S.G. Yudin // VIII Joint International Symposium "Atmospheric and Ocean Optics/ atmospheric Physics": Irkutsk, 2001. P. 178.

15 Экспресс-метод для оценки загрязнений жидких сред и осадков / В.Г. Бирюков, М.И. Алленов, Н.Д. Третьяков, С.Г. Юдин // Науч. конф. по результатам исследований в области гидрометеорологии и мониторинга загрязнения природной среды в государствах – участниках СНГ, посвященной 10-летию образования МСГ: Тез. докл. С.-Пб., 2002. С. 152 – 155.

16 Патент 2230299 Россия, 7 G 01 J3/28 Спектроанализатор / М.И. Алленов, В.Г. Бирюков, В.Н. Иванов (Россия). Бюлл. изобр. 2004. № 16.

17 *Allenov M.I. A Fast-Response Spectrum Analyzer / M.I. Allenov, V.G. Biryukov, V.N. Ivanov // XIVth Symposium on High Resolution Molecular Spectroscopy HighEus-2003: Abstract of Reports. Tomsk, 2003. P. 72.*

18 Методы и аппаратура для дистанционного контроля загрязнений природных сред и веществ / В.Г. Бирюков, М.И. Алленов, В.Н. Иванов, Н.Д. Третьяков, С.Г. Юдин // Междунар. конф. стран СНГ по атмосферной радиации (МСАР-4): Тез. докл. С.-Пб., 2004. С. 152.