

ФАНО России
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
«Институт мониторинга климатических и экологических систем»
Сибирского отделения Российской академии наук

На правах рукописи

Корольков Владимир Александрович

**АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ АКУСТИЧЕСКИЕ И
ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ
ДЛЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО И МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО
МОНИТОРИНГА АТМОСФЕРЫ**

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

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук

Научный консультант:

Тихомиров Александр Алексеевич,
доктор технических наук, профессор

Томск-2016

Содержание

Введение.....	9
1 Современное состояние проблемы инструментального обеспечения экологического и метеорологического мониторинга атмосферы	28
1.1 Автоматизированные информационно-измерительные системы мезомасштабного ЭММ АПС	28
1.1.1 АИИС метеорологического мониторинга.....	28
1.1.2 АИИС авиационного обеспечения	31
1.1.3 АИИС для метеорологического обеспечения автомобильных дорог	37
1.1.4 Агрометеорологические АИИС.....	39
1.1.5 АИИС экологического мониторинга	41
1.2 Технические средства контроля метеорологических характеристик и газового состава приземной атмосферы и возможность их применения в составе АИИС ЭММ АПС	45
1.2.1 Технические средства для метеорологического мониторинга приземного слоя атмосферы.....	45
1.2.2 Технические средства измерения атмосферных осадков.....	57
1.2.3 Приборы контроля газового состава приземной атмосферы.....	61
1.3 Технические средства дистанционного контроля метеорологических параметров АПС и возможность их применения в составе АИИС ЭММ АПС	66
1.3.1 Локационные и аэрологические методы определения метеорологических параметров АПС.....	66
1.3.2 Дистанционные контактные методы контроля метеорологических параметров АПС с использованием беспилотных летательных аппаратов.....	69

1.4 Концепция измерительно-вычислительной системы для исследований новых алгоритмов, методов и технологий контроля АПС.....	73
1.5 Выводы по главе 1	77
2 Акустические и оптические приборы и комплексы для контроля метеорологических характеристик приземной атмосферы	78
2.1 Метод акустической термоанемометрии и его использование в задачах контроля АПС	78
2.1.1 Физические основы метода акустической термоанемометрии	78
2.1.2 Технические аспекты реализации метода акустической термоанемометрии в задачах контроля метеорологических и турбулентных характеристик приземной атмосферы	81
2.1.3 Программное обеспечение УАМС	94
2.2 Оптический метод измерения осадков и его использование в задачах контроля АПС	105
2.2.1 Физические основы оптического метода измерения осадков	105
2.2.2 Технические аспекты реализации теневого метода измерения осадков в задачах контроля АПС	112
2.2.3 Оптические измерители осадков ОДИО и ОПТИОС	118
2.2.4 Метрологическое обеспечение и результаты испытаний оптических измерителей осадков	123
2.3 Ультразвуковые автоматические метеорологические станции нового поколения.....	136
2.3.1 Стационарные ультразвуковые автоматические метеорологические станции	136
2.3.2 Переносные метеорологические комплексы специального назначения	145
2.3.3 Бортовые метеорологические комплексы специального назначения	152

2.3.4 Метрологическое обеспечение и результаты испытаний УАМС...	156
2.4 Технические средства для диагностики и повышения метрологической надежности УАМС АМК-03	167
2.4.1 Портативный комплекс контроля ультразвукового термоанемометра ПККУТ	167
2.4.2 Автоматическая система контроля и калибровки технологических параметров УАМС	177
2.5 Выводы по главе 2	180
2 Акустические и оптические комплексы для дистанционных измерений характеристик АПС	184
3.1 Дистанционный контактный метод контроля характеристик АПС на основе использования портативных автоматических метеостанций и беспилотных летательных аппаратов	184
3.1.1 Методологические основы технологий дистанционного контактного измерения метеорологических и турбулентных характеристик АПС	184
3.1.2 Техническая реализация метода дистанционного контактного измерения метеорологических и турбулентных характеристик АПС ...	194
3.1.3 Портативные автоматические метеостанции на платформе БПЛА	203
3.2 Дистанционный оптический пробой и его использование в задачах контроля АПС	212
3.2.1 Физические основы метода контроля АПС на основе эффекта дистанционного оптического пробоя	212
3.2.2 Реализация метода контроля экологического и метеорологического состояния АПС на основе эффекта дистанционного оптического пробоя	225
3.2.3 Спектрохимический лидар	230
3.3. Выводы по главе 3	236

4 Оптические газоанализаторы для контроля загрязнений приземной атмосферы	238
4.1 Оптические газоанализаторы на основе метода дифференциальной спектроскопии	238
4.1.1 Физические основы метода дифференциальной спектроскопии ...	238
4.1.2 Оптические газоанализаторы ДОГ-1М	241
4.1.3 Оптические газоанализаторы ДОГ-4	244
4.1.4 Метрологическое обеспечение и результаты испытаний газоанализаторов ДОГ-1 и ДОГ-4	247
4.2 Оптические газоанализаторы на основе эффекта Зеемана	256
4.2.1 Физические основы применения эффекта Зеемана в методе ДААС.....	256
4.2.2 Технические аспекты реализации метода ДААС для определения содержания паров ртути в воздухе	261
4.2.3 Ртутный газоанализатор РГА-15	267
4.2.4 Метрологическое обеспечение и способы диагностики газоанализатора РГА-15 в процессе эксплуатации	271
4.3 Оптический газоанализатор на основе метода ультразвуковой термометрии	280
4.3.1 Физические основы применения ультразвуковой термометрии в методе дифференциальной спектроскопии	280
4.3.2 Термоакустический фотоприемник	287
4.3.3 Оптический газоанализатор на основе термоакустического фотоприемника	290
4.4 Оптические газоанализаторы на основе эффекта спонтанного комбинационного рассеяния света	295
4.4.1 Физические основы применения эффекта СКР в задачах контроля состава многокомпонентных газовых сред	294
4.4.2 Технические аспекты реализации метода СКР в	

газоанализаторах для контроля загрязнения приземной атмосферы ...	299
4.4.3 Экспериментальный образец СКР-газоанализатора	307
4.4.4 Метрологическое обеспечение и результаты испытаний СКР-газоанализатора	311
4.5 Выводы по главе 4	321
5 Автоматизированные системы для мезомасштабного экологического и метеорологического мониторинга атмосферного пограничного слоя	323
5.1 Методическое обеспечение системы мезомасштабного экологического и метеорологического мониторинга АПС	323
5.1.1 Метод статистической пространственно-временной экстраполяции метеорологических данных и его апробация на сети УАМС АМК-03	323
5.1.2 Корреляционные свойства приземных метеорологических данных измерений сети УАМС АМК-03	330
5.1.3 Методы определения типа стратификации в приземном слое атмосферы на основе данных УАМС АМК-03/3у	337
5.1.4 Методы восстановления высотных профилей метеорологических величин в приземном слое атмосферы с использованием трехуровневой УАМС АМК-03/3У	345
5.2 Технические аспекты реализации системы мезомасштабного экологического и метеорологического мониторинга АПС	348
5.2.1 Измерительно-вычислительная система ИМС-МЕТЕО-3	348
5.2.2 Программное обеспечение системы ИМС-МЕТЕО	351
5.3 Автоматизированная система ЭО ИВС для реализации технологии мезомасштабного экологического и метеорологического мониторинга состояния АПС	356
5.3.1 Архитектура и состав автоматизированной системы ЭО ИВС	356
5.3.2 Программное обеспечение системы ЭО ИВС	365

5.4 Выводы по главе 5	371
Заключение	374
Список сокращений и условных обозначений	377
Список литературы	379
Приложения	413
Приложение А1. Метрологическая документация изделия «Автоматическая метеорологическая станция АМК-03»: Свидетельство об утверждении типа средств измерений. Описание типа средств измерений	413
Приложение А2. Метрологическая документация изделия «Метеокомплект переносной автоматизированный 1Б65»: Свидетельство об утверждении типа средств измерений. Описание типа средств измерений	426
Приложение А3. Метрологическая документация изделия ГО.1.26.02: Свидетельство об утверждении типа средств измерений. Описание типа средств измерений	431
Приложение А4. Метрологическая документация изделия ДОГ-1: Свидетельство об утверждении типа средств измерений. Описание типа средств измерений	435
Приложение А5. Метрологическая документация изделия ДОГ-4: Свидетельство об утверждении типа средств измерений. Описание типа средств измерений	440
Приложение Б1. Акт внедрения автоматических метеорологических комплексов серии АМК-03	445
Приложение Б2. Акт внедрения ультразвуковых автоматических метеорологических станций АМК-03 и ее модификаций	448
Приложение Б3. Акт внедрения автоматических метеорологических комплексов серии АМК-03 и ее модификаций	462

Приложение Б4. Акт внедрения в эксплуатацию автоматических метеорологических комплексов серии АМК-03	464
Приложение В1. Приказ министра обороны РФ №173 от 03.05.2007 ..	465
Приложение В2. а) Письмо НПО «ЛЭМЗ» (Концерн ПЭО «АЛМАЗ-АНТЕЙ». б) Письмо ЦПП ВС Республики Казахстан	466
Приложение В3. Заключение ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»	468

Введение

Актуальность темы и состояние вопроса

Контроль за экологическим состоянием окружающей среды и сокращение ее загрязнения является на сегодня одной из важнейших задач человеческого общества, напрямую связанной с возможностью его дальнейшего технологического развития и безопасностью. В связи с особой актуальностью проблемы указом Президента 2017 год объявлен в России Годом экологии [1].

Одним из определяющих экологических факторов территории является состояние воздушной среды, которое определяется характеристиками атмосферного пограничного слоя (АПС), в особенности его приземной части. При этом мезомасштабная экологическая ситуация, формирующаяся на локальной территории в тот или иной период времени, определяется не только загрязнением АПС источниками выбросов, но и складывающейся метеорологической обстановкой. Существенную роль в этом играют метеорологические факторы - скорость и направление ветра, температура и влажность воздуха, параметры осадков, присутствие вертикальных ветровых потоков и потоков тепла, наличие особых состояний АПС (инверсии, конвекции), другие статистические и динамические метеорологические характеристики. Поэтому анализ и прогнозирование экологического состояния АПС требуют осуществления комплексного контроля его параметров, в том числе, не входящих в стандартный перечень величин, контролируемых гидрометеорологической службой.

Обеспечение контроля экологической и метеорологической ситуации в режиме мониторинга и реализация технологий мезомасштабного и краткосрочного прогнозирования состояния АПС требует применения новых инструментальных средств и использования созданных на их основе программно-аппаратных систем для определения метеорологических параметров атмосферы и контроля количественного состава поллютантов в атмосферном воздухе.

На 7-м Всероссийском метеорологическом съезде в дискуссиях «за круглым столом» было отмечено, что особую актуальность в задаче инструментального

обеспечения мониторинга приобретает использование в основе измерительных сетей полностью автоматизированных измерительных станций («станций-роботов»), способных работать в течение длительного времени без участия человека. К таким «станциям-роботам» предъявляются дополнительные эксплуатационные требования, основными из которых являются полная автоматизация процессов измерения, регистрации и передачи информации, а также длительность автономной работы без обслуживания человеком (не менее 0.5 – 1 года), повышенный межповерочный интервал и возможность дистанционного контроля работоспособности станции.

Автоматические метеорологические станции нового поколения, кроме работы в составе наблюдательной гидрометеорологической сети, могут быть использованы непосредственно в технологических системах для решения задач оптимизации метеорологически зависимых технологических процессов на предприятиях различных отраслей промышленности. К области специальных задач, выполнение которых решается с помощью автоматических метеорологических комплексов, относятся, в гражданской сфере, обеспечение метеорологической безопасности населения и объектов хозяйственной инфраструктуры посредством оперативного обнаружения возникновения и прогнозирования эволюции опасных метеорологических явлений, а в военной сфере – оперативное метеорологическое обеспечения театра военных действий с целью повышения эффективности выполнения боевых задач различными видами вооруженных сил.

Мониторинг газовых загрязнений АПС, контроль источников выбросов и технологических процессов осуществляется посредством газоанализаторов различных типов. Для анализа многокомпонентных газовых сред приходится использовать датчики, работа которых основана на различных физических и химических методах: оптическом, акустическом, электрохимическом, хемилюминесцентном, хроматографическом и др. Однако, несмотря на свое разнообразие, существующие газоаналитические приборы и комплексы в

настоящее время не обеспечивают, в полной мере, решения проблем экологического мониторинга и контроля технологических процессов.

Существующее отставание отечественного приборостроения в области метеорологического мониторинга, создания метеорологических комплексов специального назначения, газоаналитического оборудования для экологического контроля и контроля технологических процессов привело к вынужденному использованию преимущественно импортных приборов, что влечет за собой технологическую зависимость от зарубежных компаний, недопустимую в сфере деятельности, имеющей важное значение для экономики и обороноспособности страны. Актуальность создания новых приборов и комплексов, использующих новые способы измерений в области метеорологического мониторинга, анализа загрязнения атмосферного воздуха и контроля связанных с ними технологических процессов, определена в документе Министерства образования и науки РФ «Прогноз научно-технического развития Российской Федерации на период до 2030 года» [2], составленном при участии Российской академии наук и ведущих научно-исследовательских институтов различных министерств и ведомств, и являющимся одним из основополагающих документов системы стратегического планирования развития Российской Федерации. В нем определены наиболее перспективные направления научных исследований, в том числе:

- разработка новых технологий инструментального контроля выбросов загрязнений в атмосферу и создание систем раннего обнаружения и прогнозирования чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера, разработка технологий обеспечения безопасности производственных объектов;
- создание систем мониторинга, оценки и прогнозирования состояния окружающей среды, включая разработку автоматизированных систем контроля состояния атмосферы, а также разработка оборудования для мониторинга, контроля риска возникновения и уменьшения последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера и т.п.

Данная проблематика соответствует приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники Российской Федерации «Рациональное

природопользование» и «Перспективные виды вооружения, военной и специальной техники», а так же входит в перечень критических технологий Российской Федерации («Технологии мониторинга и прогнозирования состояния окружающей среды, предотвращения и ликвидации ее загрязнения», «Технологии предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера», «Базовые и критические военные и промышленные технологии для создания перспективных видов вооружения, военной и специальной техники»).

Настоящая работа выполнялась в рамках государственных заданий по программам:

1. ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 годы». Направление «Рациональное природопользование», мероприятие 1.3. Проект «Разработка и создание измерительно-вычислительной системы для реализации технологии мезомасштабного мониторинга и прогнозирования состояния атмосферного пограничного слоя» (шифр ПНИ «2014-14-579-0004-034», идентификатор RFMEFI60714X0030) (2014-2016 гг.);

2. Программы СО РАН и ФНИ ГАН:

а) Базовый проект СО РАН 28.2.3 Разработка новых методов, технологий и приборов на основе оптических, радиоволновых и акустических эффектов для контроля природных и техногенных систем, а также для решения спецзадач (2004-2006 гг.);

б) Базовый проект СО РАН 7.13.1.2 "Развитие методов и технических средств на основе оптических, радиоволновых и акустических эффектов для изучения природных и техногенных систем" (2007-2009 гг.);

в) Базовый проект СО РАН № VII.66.1.2 "Развитие физических методов и технических средств для мониторинга окружающей среды и обеспечения безопасности населения" (2010-2012 гг.);

г) Проект VIII.80.1.2 "Научные основы создания новых газоаналитических приборов и методик их использования для мониторинга окружающей среды и специального контроля" (2012-2016 гг.);

д) Проект VIII.80.2.2 "Научные основы создания оптических, акустических и электронных приборов, комплексов и систем для метеорологических измерений и технологии их применения в задачах мониторинга окружающей среды" (2012-2016 гг.);

3. Проекты РФФИ:

а) № 09-05-99014/р_офи "Разработка научных основ технологии и создание измерительно-вычислительной системы для регионального прогноза опасных метеорологических явлений" (2009-2010 гг.);

б) № 11-05-98062/ р_сибирь_а "Разработка и исследование алгоритмов пространственно-временного прогнозирования возникновения и развития опасных метеорологических ситуаций и создание макета региональной измерительно-вычислительной системы для их реализации" (2011-2012 гг.);

4. В ОКР специального назначения (заказчик – МО РФ): "Городище-СО-М", "Борисполь-2", "Трасса-М", "Ринг-2/15-ВДВ", "Механизм", "Фальцет", "Канонада", "Броненосец" и др.;

5. В двенадцати проектах Приборной программы СО РАН «Импортозамещение» (2005 – 2012 гг.).

6. По планам работ СКБ НП "Оптика" СО АН СССР, КТИ "Оптика" СО РАН и ИОМ СО РАН в период 1980-2003 гг.

В настоящей диссертационной работе описаны результаты разработки новых способов и реализующих их технических устройств экологического и метеорологического мониторинга для решения различных задач в гражданской и военной областях. Общим для этих разработок являются область их применения: мониторинг окружающей среды (а именно, контроль экологических и метеорологических характеристик АПС), и физические принципы, на которых основывается работа приборов: в основе разработок газоанализаторов и метеорологических измерительных приборов использованы оптические и

акустические методы измерений и их сочетание в одном измерительном комплексе. Это позволило разработать новые способы измерений и создать новые измерительные средства с улучшенными техническими характеристиками и широкими функциональными возможностями.

Целью диссертационной работы является разработка методологических основ и создание инструментальной базы для обеспечения экспериментальных натурных исследований новых алгоритмов, методов и технологий контроля атмосферного пограничного слоя, а также решение проблемы импортозамещения в области экологического и метеорологического приборостроения.

Основные задачи диссертационной работы:

- разработка, создание, испытания и организация производства новых автоматических приборов и комплексов на основе использования оптических и акустических методов;
- разработка метрологического обеспечения разрабатываемых технических средств;
- разработка алгоритмического и программно-технического обеспечения процессов обработки информативных сигналов и представление результатов в приборах для экологического и метеорологического мониторинга атмосферного пограничного слоя и в средствах контроля технологических процессов;
- разработка методов повышения информационной и метрологической надежности разрабатываемых приборов и средств контроля в процессе эксплуатации, обеспечение диагностики приборов контроля.

Научная новизна:

1. Разработаны новые схемотехнические и конструктивные решения для ультразвуковых 3D-термоанемометров (3D-УТА), обеспечивающие малое затенение электроакустических преобразователей (ЭАП) и жесткость несущей конструкции. На основе разработанных 3D-УТА создан ряд модификаций

ультразвуковых автоматических метеорологических станций (УАМС) с улучшенными техническими и эксплуатационными характеристиками. Новые технические решения защищены патентом РФ № 147970 [3].

2. Разработаны новые способы и реализующие их устройства для контроля и диагностики 3D-УТА, позволяющие оперативно выполнять эти операции непосредственно на месте эксплуатации измерительных приборов. Новые технические решения защищены двумя патентами РФ № 2319987 [4] и № 2568993 [5].

3. Разработаны новые схмотехнические и конструктивные решения, алгоритм работы и методика калибровки оптического измерителя осадков, использующего теневой метод, и создан опытный образец осадкомера. Новые технические решения защищены двумя патентами РФ № 2575181 [6] и № 119898 [7].

4. Предложены и апробированы в натурных условиях новые методы и технологии дистанционного контроля метеорологических параметров АПС посредством портативных автоматических метеостанций, устанавливаемых на борту беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), а также разработаны способы и технические решения для комплексного контроля метеорологических параметров АПС и содержания поллютантов в воздухе посредством измерения характеристик оптического и акустического излучения плазмы дистанционного оптического пробоя. Новые технические решения защищены 11 авторскими свидетельствами СССР №№ [8 – 18] и 2 патентами РФ №№ 246936, 2251096 [19, 20].

5. Впервые предложен и обоснован новый термоакустический метод определения энергии излучения инфракрасного диапазона, обладающий малой инерционностью (~10 мс), и разработан новый оптико-акустический способ измерения этой энергии с помощью ультразвукового термоанемометра, показана возможность использования предложенного способа для детектирования оптических сигналов в абсорбционных ИК-газоанализаторах. Новые технические решения защищены 3 патентами РФ №№ 2208224, 2207546, 2460990 [21, 22, 23].

6. Разработаны новые схемотехнические и конструктивные решения автоматических оптических газоанализаторов на основе метода дифференциального атомного абсорбционного анализа (ДААС) в ближней ультрафиолетовой и видимой области оптического спектра, а также метода спонтанного комбинационного рассеяния света (СКР), что позволило создать ряд модификаций приборов для непрерывного мониторинга дымовых выбросов и определения загрязнений воздушной среды токсичными газами и парами ртути. Новые технические решения защищены 4 патентами РФ №№ 126136, 2244291, 2469281, 2474796 [24 – 27] и свидетельством РФ на полезную модель № 19169 [28].

7. Разработана, создана и введена в опытную эксплуатацию мезомасштабная автоматизированная система для обеспечения экспериментальных исследований и натурной апробации новых алгоритмов, методов и технологий контроля состояния АПС.

Разработки, выполненные при участии и под руководством автора в период с 1997 по 2015 гг., десять раз включались в годовые отчетные доклады РАН и СО РАН в качестве важнейших научных достижений:

- 1997 г. (СО РАН) – разработка газоанализатора "Оксид-1М" (прототип ДОГ);
- 2000 г. (СО РАН) – разработка газоанализатора ДОГ (модификация ДОГ-1М);
- 2003 г. (РАН) – разработка бортового метеокомплекса БМК-01 (в составе бортовой системы прогнозирования дальности и качества звукового вещания);
- 2008 г. (СО РАН) – разработка мобильного варианта УАМС АМК-03Б;
- 2009 г. (РАН) – разработка переносного метеокомплекса ЭКСМЕТЕО (аналог ПАМК 1Б65 военного назначения);
- 2009 г. (РАН) – разработка оптического измерителя осадков;
- 2010 г. (РАН) – разработка прототипа региональной информационно-измерительной системы для мониторинга опасных метеорологических явлений;
- 2012 г. (РАН) – разработка СКР-газоанализатора;
- 2013 г. (СО РАН) – разработка оптического измерителя осадков;
- 2014 г. (РАН) – разработка оптического измерителя осадков ОПТИОС.

Практическая значимость и реализация результатов работы

Практическая значимость результатов работы определяется прикладным характером выполненных исследований и подтверждается внедрением разработанных способов измерений и реализующих их устройств в различных отраслях экономики и оборонного комплекса страны:

1) Сертифицированы в качестве средств измерений гражданского и военного назначения УАМС АМК-03, ПАМК 1Б65 и бортовой метеокомплекс АМК-Б (в составе изделия ГО.1.26.02) (см. Приложения А1, А2, А3). Метеокомплексы 1Б65, 1Б65Б и АМК-Б (в составе изделия ГО.1.26.02) приняты на снабжение Вооруженных Сил РФ (см. Приложение В1). Организовано опытное и промышленное производство УАМС АМК-03 и ее модификаций гражданского и военного назначения: УАМС АМК-03, 1Б65, 1Б65Б, АМК-Б выпускаются серийно, метеокомплексы БМК-01, АМК-03/3у АМК-03Б – в виде опытных и экспериментальных образцов (см. Приложения Б1 – Б4).

Основными потребителями метеокомплексов являются Минобороны России, МВД России, МЧС России, промышленные предприятия и государственные спецобъекты России (космодром «Восточный» (см. Приложение В2), космодром «Байконур»), а также зарубежные пользователи – Северо-западный институт ядерных исследований (NINT) (Китайская народная республика), ЗАО «Завод им. Кирова» (Республика Казахстан), Центр парашютной подготовки Вооруженных Сил Республики Казахстан (см. Приложение В2), вооруженные силы иностранных государств (АО «Рособоронэкспорт» (см. Приложения Б1 – Б4).

Метеокомплексы АМК-03 и их модификации (включая системы метеорологического мониторинга на основе АМК-03), а также ртутный газоанализатор ДОГ-5, используются для выполнения научных исследований в научно-исследовательских институтах Сибирского отделения РАН и ВУЗах Сибирского региона: БНЦ СО РАН (г. Улан-Уде) (внедрены в рамках Приборной программы СО РАН «Импортозамещение – 2005, 2006, 2007, 2011»); ИМ СО РАН (г. Якутск), ИГ СО РАН (г. Иркутск), ИВЭП СО РАН (г. Барнаул) (внедрены в

рамках Приборной программы СО РАН «Импортозамещение – 2009»); ИЛ СО РАН (г. Красноярск), ИКФИА СО РАН (г. Якутск), (внедрены в рамках Приборной программы СО РАН «Импортозамещение – 2010»); ТуВИКОПР СО РАН (г. Кызыл), ИБПК СО РАН (г. Якутск) (внедрены в рамках Приборной программы СО РАН «Импортозамещение – 2011»); ИВТ СО РАН (г. Новосибирск) (внедрен в рамках Приборной программы СО РАН «Импортозамещение – 2012»); а также ИМКЭС СО РАН (г. Томск), ИОА СО РАН (г. Томск), Томский государственный университет, Сургутский государственный университет, Нижневартровский педагогический институт и др.

Производителями УАМС АМК-03 и ее модификаций являются предприятия и организации г. Томска – ООО «Сибаналитприбор», ЗАО «Томский приборный завод» и ИМКЭС СО РАН (годовой объем выпуска изделий в 2015 – 2016 гг. превысил 100 штук, всего за время выпуска изготовлено и отправлено заказчикам около 700 метеокомплексов всех модификаций) (см. Приложения Б1 – Б4).

2) Опытный образец оптического измерителя осадков ОПТИОС входит в состав комплекса аппаратуры для обеспечения безопасности взлетно-посадочной полосы аэродромов, разрабатываемого ООО «БАНС» (г. Москва) по заказу МО РФ, а также в состав измерительно-вычислительной системы ЭО ИВС, разрабатываемой в рамках ФЦП МОН РФ [29].

3) Способ дистанционного определения элементного состава атмосферных газов и аэрозолей и реализующее его устройство (спектрохимический лидар) разработаны и изготовлены в СКБ НП «Оптика» СО АН СССР и в 1982-1985 гг. использовались для обеспечения научно-исследовательских работ по спецтематике в НПО «Астрофизика» (ОКБ «Радуга», г. Владимир).

4) Сертифицированы в качестве средств измерений РФ газоанализаторы ДОГ-1М и ДОГ-4 (см. Приложения А4 – А5). Организовано промышленное производство газоанализаторов ДОГ-1М, партия которых в количестве 70 шт. внедрена на теплоэнергетических предприятиях ОАО «Тюменьэнерго». Опытный образец двухкомпонентного газоанализатора ДОГ-4 прошел промышленные

испытания на ГРЭС-2 г. Томска и готовится к внедрению на предприятиях теплоэнергетики.

5) Экспериментальный образец СКР-газоанализатора прошел испытания во ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» с целью получения рекомендации на внедрение метода СКР-газоанализа на предприятиях ПАО «Газпром» в качестве штатного средства контроля компонентного состава природного газа, транспортируемого по магистральным газопроводам (см. Приложение В3).

6) Опытные образцы автоматизированной системы метеорологического мониторинга мезомасштабной территории «ИВС-МЕТЕО-3», ИВС-МЕТЕО-5» и ЭО ИВС изготовлены в ООО «Сибаналитприбор» (г. Томск) и внедрены в ИМКЭС СО РАН (г. Томск) и в ОАО «Ванкорнефть» (г. Красноярск).

На защиту выносятся следующие положения:

1. Использование совокупности новых технических решений в реализации метода акустической термоанемометрии и оптического теневого метода контроля атмосферных осадков позволило создать программно-аппаратный комплекс для определения метеорологических и турбулентных характеристик приземной атмосферы, обладающий расширенными функциональными возможностями, улучшенными техническими характеристиками и способный выполнять измерения в автоматическом режиме без участия оператора в условиях арктического, умеренно-холодного и тропического климата.

2. Использование совокупности новых технических решений при создании автоматизированных диагностических устройств и систем для контроля и восстановления метеорологических характеристик ультразвуковых термоанемометров, а также применение новых технических решений в конструкции ультразвукового термоанемометра, позволило создать мобильные (переносные и бортовые) автоматические метеорологические комплексы военного и гражданского назначения, сохраняющие работоспособность после воздействия возникающих при транспортировке и развертывании комплекса ударных и вибрационных нагрузок, предусмотренных ГОСТ РВ 20.39.304-98 по группам

исполнения 4.16 и 1.6.5, способные при этом проводить измерения на произвольных неподготовленных метеорологических площадках и выполнять задачи по оперативному метеорологическому обеспечению проведения специальных операций и боевых действий различными видами и родами войск.

3. Разработанный на основе метода ультразвуковой термометрии новый тип селективного фотоприемника инфракрасного диапазона обладает малой инерционностью (не более 10^{-2} с), высокой пороговой чувствительностью (не хуже 10^{-3} Дж), а также широким динамическим диапазоном, определяемым, с одной стороны, чувствительностью ультразвукового метода измерения температуры газа, используемого в качестве детектора (порядка $10^{-2} \div 10^{-3}$ К), и, с другой стороны, пороговыми значениями энергии оптического пробоя в этом газе (порядка 10 Дж/см²).

4. Разработанные дистанционные методы и реализующие их аппаратные комплексы, использующие портативные автоматические метеостанции, устанавливаемые на борту беспилотных летательных аппаратов, а также устройства, инициирующие в атмосфере дистанционный оптический пробой путем фокусировки в атмосфере мощного лазерного пучка и затем регистрирующие спектральные и временные параметры оптического и акустического излучения плазмы оптического пробоя, позволяют контролировать метеорологические и турбулентные параметры атмосферы до высот 1000 – 2000 метров и определять в режиме реального времени содержание загрязнителей в атмосферном воздухе.

5. Использование совокупности новых технических решений при реализации оптических методов газоанализа, основанных на использовании эффекта дифференциального поглощения оптического излучения молекулами газа, эффекта расщепления в поперечном магнитном поле линий излучения ртутной лампы с естественным изотопным составом паров ртути (поперечный эффект Зеемана), эффекта спонтанного комбинационного рассеяния света молекулами газа, позволило создать многофункциональный газоаналитический комплекс для мониторинга газовых загрязнений приземного слоя атмосферы и

работы в составе автоматизированных систем управления технологических процессов.

6. Разработка новых автоматических приборов и комплексов, построенных на использовании оптических и акустических методов измерений, позволила создать мезомасштабную пространственно-распределенную измерительно-вычислительную систему, обеспечивающую выполнение комплексных экспериментальных исследований и натурную апробацию новых методов экологического и метеорологического мониторинга атмосферного пограничного слоя (АПС), в том числе алгоритмов определения термодинамического состояния приземной атмосферы, методик восстановления вертикальных профилей метеорологических характеристик, технологий сверхкраткосрочного временного и мезомасштабного пространственного прогнозирования эволюции параметров АПС.

Достоверность полученных результатов подтверждается метрологически обоснованными испытаниями разработанной аппаратуры, сертификацией разработанных измерительных средств в Росстандарте, а также итогами их опытной и промышленной эксплуатации.

Личный вклад автора

Диссертация является обобщением результатов работ, выполненных автором в ИМКЭС СО РАН в период с 1980 г. по настоящее время, по разработке, созданию и внедрению новых приборов, программно-аппаратных комплексов и систем, построенных на использовании оптических и акустических методов измерений. Работа выполнена с использованием результатов, полученных лично автором или при его творческом участии в постановке задач и исследований.

В материалах, изложенных в главе 2 (параграфах 2.1, 2.3, 2.4) и главе 3 автору принадлежат основные теоретические и экспериментальные результаты, в главе 4 автором выполнялась конкретизация разработанных методов и решение частных инженерных задач, в параграфе 2.2 главы 2 и главе 5 автором

сформулированы задачи, определены способы их решения, выбраны методы исследования. В обзорных статьях раздела 1 автором использованы собственные материалы, а также материалы соавторов и других авторов.

Под руководством автора защищена диссертация на соискание степени кандидата технических наук (Кобзев А.В. Оптико-электронный двухканальный измеритель атмосферных осадков. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. ИМКЭС СО РАН. Томск. 2013 г.), часть результатов которой приведено в параграфе 2.2 настоящей работы.

Автором осуществлялось непосредственное руководство инженерно-конструкторскими разработками, работами по аттестации методик измерений и сертификации приборов, ему принадлежит, так же, основная роль в организации их производства и внедрении в различных областях научно-производственного и оборонного комплекса страны.

За большой личный вклад в разработку и создание автоматических метеорологических комплексов военного назначения автору дважды (в 2008 и 2015 гг.) назначались именные стипендии МО РФ. Достижения автора в научной деятельности отмечены Почетными грамотами РАН (2002 г.) и СО РАН (2012 г.). За значительный личный вклад в процесс создания интеллектуальной собственности автор награжден Дипломом Торгово-промышленной палаты РФ (2013 г.) и нагрудным знаком «Изобретатель СССР» (1983 г.).

Автор выражает благодарность сотрудникам ИМКЭС СО РАН Азбукину А.А., Богушевичу А.Я., Кальчихину В.В., Кобзеву А.А., Матросову И.И., Петрову Д.В., Татуру В.В., являвшимся основными соавторами публикаций по совместно проведенным исследованиям. Особая благодарность выражается научному консультанту Тихомирову А.А. за неоценимую помощь в организации работ и подготовке диссертации.

Апробация работы

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались более чем на 60 международных, всероссийских (всесоюзных) и региональных конференциях и симпозиумах, в том числе: VII и X Всесоюзные симпозиумы по лазерному и акустическому зондированию атмосферы (г. Томск, 1982, 1989 гг.); III Всесоюзная конференция «Применение лазеров в технологии и системах передачи и обработки информации» (г. Таллин, 1987 г.); III, VI и XIX Межреспубликанские (Международные) симпозиумы «Оптика атмосферы и океана» (г. Томск, 1996, 1999, 2013 гг.); I, II, III, IV, V и VI Международные симпозиумы «Контроль и реабилитация окружающей среды» (г. Томск, 1998, 2000, 2002, 2004, 2006, 2008 гг.); III Российская научно-техническая конференция «Современное состояние проблемы навигации и океанографии» (г. Санкт-Петербург, 1998 г.); Международная конференция «Физика атмосферного аэрозоля» (г. Москва, 1999 г.); Международная конференция «Проблемы методологии, автоматизированного сбора и обработки метеоинформации и новые направления в развитии гидрометеорологического приборостроения (г. Ташкент, Республика Узбекистан, 1999 г.); IV, V, VI, VIII, IX, X и XI Сибирские совещания по климатозэкологическому мониторингу (г. Томск, 2001, 2003, 2005, 2009, 2011, 2013, 2015 гг.); VI Международная конференция по судостроению, судоходству, оборудованию морских платформ и обеспечивающих их работу плавсредств, морская техника для освоения океана и шельфа (г. Санкт-Петербург, 2001 г.), VIII Joint International Symp. «Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics» (г. Иркутск, 2001 г.); IV Российская научно-техническая конференция «Современное состояние, проблемы навигации и океанографии НО-2001» (г. Санкт-Петербург, 2001 г.); I Международная научно-практическая конференция «Управление отходами – основа восстановления экологического равновесия в Кузбассе» (г. Новокузнецк, 2005 г.), IV Межрегиональная научно-практическая конференция "Многоцелевые гусеничные и колесные машины: разработка, производство, модернизация, эксплуатация, боевая эффективность, наука и образование" – "БРОНЯ-2008" (г. Омск, 2008 г.); X и XI Всероссийские

конференции «Проблемы мониторинга окружающей среды (г. Кемерово, 2009, 2011 гг.); VII и VIII Всероссийские симпозиумы «Контроль окружающей среды и климата» (г. Томск, 2010, 2012 гг.); XVIII, XIX, XX, XXI, XXII и XXIII Международные конференции «Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии и геоэкологии» (г. Новороссийск, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015 гг.); I и II Международные симпозиумы «Ртуть в биосфере: эколого-геохимические аспекты» (г. Москва, 2010 г., г. Новосибирск 2015 г.); XX Международная конференция «Лазеры. Измерения. Информация» (г. Санкт-Петербург, 2010 г.); Environmental Geosciences and Engineering Survey for Territory Protection and Population Safety (EngeoPro-2011) Intern. Conf. Moscow (г. Москва, 2011 г.); Международная конференция «Фундаментальные проблемы оптики - 2012» (г. Санкт-Петербург, 2012 г.); Международная конференция памяти академика А.М. Обухова «Турбулентность, динамика атмосферы и климата» (г. Москва, 2013 г.), III Всероссийская научно-практическая конференция «Системы гидрометеорологического, экологического и специального мониторинга». Академические Жуковские чтения (г. Воронеж, 2015) и др.

Экспериментальные и опытные образцы разработанных измерительных приборов, комплексов и систем экспонировались, в общем счете, более чем на 30 международных, всероссийских и региональных выставках, в том числе:

- на специализированных международных метеорологических выставках «METEO EXPO-2003» и «METEOREX-2014» (г. Санкт-Петербург);

- на специализированных международных выставках по военной технике и средствам безопасности: «ВТТВ-Омск-2009» и «ВТТВ-Омск-2011» (г. Омск), «KADEX-2012» (г. Астана, Республика Казахстан), «День инноваций министерства обороны РФ. 2013 г.» (г. Москва), АРМИЯ-2015 (г. Кубинка), «Средства спасения-2006» (г. Санкт-Петербург), «Ергаки-2010» (пос. Танзыбей, Хакасия), Международный салон «Комплексная безопасность 2011» (г. Москва);

- на международных выставках: «OPTICS-EXPO - 2012» (г. Москва), INNOVUS-2013 (г. Томск), VI промышленная выставка «EXPO-RUSSIA

KAZAKHSTAN 2015» (г. Алма-Ата, Республика Казахстан), «Открытые инновации - 2015» (г. Москва), «ТЕХНОПРОМ-2016» (г. Новосибирск).

Публикации

По теме диссертационной работы автором опубликовано более 150 работ, в том числе: 27 статей в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК, 7 статей в зарубежных изданиях, входящих в базы данных WoS и Scopus, 45 докладов на международных и 38 докладов на отечественных конференциях; получено 26 авторских свидетельств и патентов (6 из них без соавторов) и 5 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка основных обозначений, списка цитируемой литературы и приложений. Рукопись содержит 471 страницу, включая 175 рисунков и 44 таблицы. Список публикаций содержит 258 наименований.

Содержание работы

В 1-й главе приведен краткий обзор существующих средств контроля метеорологических характеристик и газового состава атмосферы, проанализированы их недостатки с точки зрения использования в составе автоматизированных систем ЭММ, сформулированы технические требования к разрабатываемым для этих целей приборам и комплексам.

Во 2-й главе приведены результаты разработки акустических и оптических приборов и комплексов для измерения метеорологических и турбулентных характеристик АПС: акустических 3D-термоанемометров, оптических измерителей осадков и ультразвуковых автоматических метеорологических станций, а также представлено программное и метрологическое обеспечение разработанных приборов.

Приведено описание разработанных систем и устройств для диагностики функционирования и восстановления метрологических характеристик 3D-УТА УАМС в полевых условиях непосредственно на месте эксплуатации прибора.

Приведены сведения о результатах внедрения разработанных приборов и комплексов.

В 3-й главе представлены результаты разработки методов и технических средств для дистанционного контроля характеристик АПС.

Рассмотрены методологические основы реализации технологии дистанционного контактного измерения метеорологических и турбулентных характеристик АПС, проведена экспериментальная апробация метода, позволяющего выполнять непосредственные измерения метеорологических величин и турбулентных параметров атмосферы с помощью портативных автономных автоматических метеостанций, устанавливаемых на борту БПЛА.

В 3-й главе рассмотрены, так же, физические основы и технические аспекты реализации дистанционного бесконтактного метода контроля экологического и метеорологического состояния АПС, основанного на эффекте оптического пробоя, дистанционно возбуждаемого в атмосфере мощным лазерным излучением, а также трассового метода измерения метеорологических характеристик АПС с использованием БПЛА.

Во 4-й главе представлены результаты разработки автоматических оптических газоанализаторов для контроля загрязнений приземной атмосферы, использующих метод дифференциальной спектроскопии (в том числе эффект Зеемана в поперечном магнитном поле для контроля содержания паров ртути в воздухе) и метод спонтанного комбинационного рассеяния света газовыми молекулами (СКР-спектроскопия). Приведены результаты метрологических испытаний газоанализаторов и сведения о внедрении разработанных приборов.

В 5-й главе представлены результаты разработки методического, технического, приборного и информационного обеспечения для мезомасштабной автоматизированной измерительно-вычислительной системы (ЭО ИВС), предназначенной для экологического и метеорологического мониторинга приземной атмосферы, а также для экспериментальных исследований и натурной апробации новых методов и технологий контроля характеристик АПС. Созданная ЭО ИВС основана на отечественных измерительных приборах и комплексах, разработка которых описана во второй, третьей и четвертой главах настоящей работы.

Здесь же приведены первые результаты выполненных с помощью ЭО ИВС исследований:

- методов статистической пространственно-временной экстраполяции метеорологических данных,
- методов определения типа стратификации в АПС,
- методов определения уровня корреляции данных сети приземных автоматических метеорологических станций,
- методов восстановления высотных профилей метеорологических величин в приземном слое атмосферы и др.

1 Современное состояние проблемы инструментального обеспечения экологического и метеорологического мониторинга атмосферы

1.1 Автоматизированные информационно-измерительные системы мезомасштабного ЭММ АПС

1.1.1 АИИС метеорологического мониторинга

1.1.1.1 Глобальный мониторинг состояния атмосферы осуществляется на основе данных метеорологических постов, образующих государственные и мировую измерительные сети (в последнее время к этим данным добавляются данные спутниковых наблюдений). Существенными недостатками таких систем являются редкая (особенно в малообжитых и труднодоступных регионах планеты) сеть измерительных постов и низкая периодичность выполнения измерений: один раз в три часа для характеристик приземного слоя атмосферы и один-два раза в сутки – для характеристик атмосферного пограничного слоя (АПС) на ограниченном числе постов (аэрологическое зондирование). Ограниченность получаемой такими системами информации не позволяет осуществлять оперативный контроль метеорологической и экологической ситуации на локальных территориях масштаба города или отдельного крупного технологического объекта (транспортного узла, промышленного комбината, сельскохозяйственного агрокомплекса и т.п.), что является не менее актуальной задачей, чем долговременные метеорологические прогнозы регионального масштаба.

Следует отметить существенное отставание России в создании современных систем и измерительной аппаратуры для мониторинга окружающей среды, в том числе, приземного слоя атмосферы и АПС. В настоящее время Росгидромет обладает измерительной сетью с крайне низкой плотностью, при этом на большей части измерительных постов используются морально и технически устаревшие приборы. Существующее относительно небольшое число автоматических

метеостанций нового поколения оснащено зарубежными приборами, высокая стоимость которых, а также проблемы с техническим обслуживанием и адаптацией в существующие сети, препятствуют их широкому использованию как в составе сети постов Росгидромета, так и в составе отдельных специализированных измерительных комплексов.

В связи с недостаточностью объема и качества метеорологической информации, поступающей из государственной системы гидрометеорологических наблюдений (Росгидромет), в последнее время в нашей стране активно стали разрабатываться и внедряться специализированные автоматические и автоматизированные системы метеорологического и экологического мониторинга, предназначенные, как правило, для решения ограниченного круга задач, определяемых интересами внедряющего систему ведомства.

Краткий обзор наиболее распространенных отечественных и зарубежных систем ЭММ приведен ниже [29].

1.1.1.2 Для обеспечения метеорологической информацией подразделений Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды с целью подготовки и распространения прогнозов погоды и климатических характеристик по территории страны создана автоматизированная информационно-измерительная система (АИИС) «Погода» [31] (зарегистрирована в Госреестре под номером 17529-10 [32]). Она предназначена для автоматических измерений метеорологических величин: температуры воздуха, температуры поверхности почвы, температуры почвы на глубине, относительной влажности воздуха, скорости и направления ветра, атмосферного давления, высоты облаков, метеорологической (оптической) дальности видимости, количества осадков; их обработки, отображения на дисплее, формирования метеорологических сообщений, их регистрации и архивации.

Принцип действия АИИС «Погода» основан на дистанционном измерении посредством контактных датчиков метеорологических величин, их преобразовании в цифровой код измерительными преобразователями и последующей передачи по кабельной линии связи в центральную систему для

обработки, отображении на дисплее оператора, формировании метеорологических сообщений, их регистрации и архивации.

Конструктивно АИИС «Погода» построена по модульному принципу. Измерительный модуль (рис. 1.1), размещенный на метеоплощадке, состоит из метеорологических датчиков, дополнительного и вспомогательного оборудования. Модуль измерительных преобразователей, состоящий из измерительных преобразователей и линий связи, размещён вместе с метеорологическими датчиками на площадке. Модуль центральной системы сбора и обработки информации состоит из основной и резервной ПЭВМ, источника бесперебойного питания, модемов, базового и специального программного обеспечения и размещён в помещении пункта наблюдения.

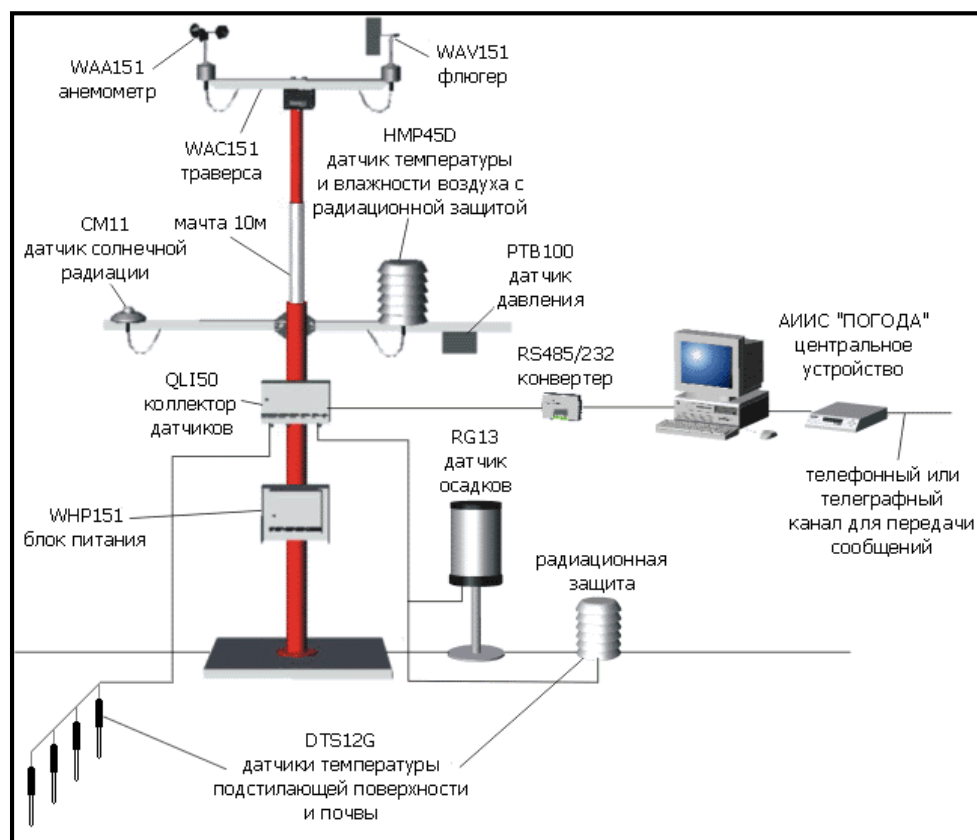


Рисунок - 1.1 Измерительный модуль АИИС «Погода»

АИИС «Погода» состоит из измерительных каналов, в состав которых в зависимости от модификации (табл. 1.1) входят различные метеорологические датчики, измерительные преобразователи, линии связи и центральная система

сбора и обработки информации. Система работает круглосуточно, имеет последовательные интерфейсы RS-232/485. Дистанционность подключения датчиков при использовании модемов составляет до 10 км.

Таблица 1.1 - Состав измерительных каналов и датчиков АИИС «Погода» различных модификаций

Канал	Датчик		
	«Погода-09.01»	«Погода-09.02»	«Погода-09.03»
Количество каналов	до 18	до 18	до 18
Температура и относительная влажность воздуха	HMP45D	HMP45D	HMP45D
Температура почвы	DTS12G	DTS12G	ТСПТ300
Атмосферное давление	PTB200	PTB330	PTB200
Скорость ветра	M-127	WAA151/252 WM30	RM Young 05103
Направление ветра	M-127	WAV151/252 WM30	RM Young 05103
Высота нижней границы облаков	ДВО-2	CL31	–
Метеорологическая (оптическая) дальность видимости	ФИ-3	FD121/FD12P	–
Количество и интенсивность осадков	RG13/RG13H VRG101	RG13/RG13H VRG101	QMR360

Как видно из данных таблицы, в составе АИИС «Погода» использованы, преимущественно, датчики зарубежного производства.

1.1.2 АИИС авиационного обеспечения

1.1.2.1 В настоящее время активно развивается направление по созданию АИИС авиационного обеспечения [33]. Создание аэродромных АИИС базируется на использовании «интеллектуальных» датчиков нового поколения, обеспечивающих на базе встроенных микропроцессоров обработку исходной информации и формирование выходных данных, повышение информационных и эксплуатационных характеристик приборов. Помимо типового набора

измерительной аппаратуры, предназначенной для оснащения аэродромов, в состав АИИС включаются дополнительные датчики, служащие для повышения уровня автоматизации метеобеспечения (датчики яркости, гололёда, количества и интенсивности осадков, состояния взлётно-посадочной полосы, пеленгаторы грозовых разрядов и др.). Важными дополнительными задачами, возлагаемыми на аэродромные АИИС, является автоматизация режимных наблюдений и формирование климатических характеристик аэродрома. В состав АИИС входят также коллективные и индивидуальные средства отображения, автоматизированные рабочие места, средства сопряжения АИИС с другими системами аэродрома. В аэродромных АИИС большое внимание уделяется надежности систем, которая включает в себя не только аппаратную надежность (различные схемы резервирования датчиков и центральной системы, тестирование и т. п.), но и обеспечение достоверности, защиту информации, обеспечение большей репрезентативности измерительной информации. Это касается, в первую очередь, алгоритмов измерения и обработки данных (контроль и исключение выбросов, мажоритарные методы осреднения и т. п.). Важным элементом надежности системы является также требование архивирования всей входящей (включая резервные датчики) и выдаваемой информации, а также всех действий оператора и защита архива от несанкционированного вмешательства.

Компанией Vaisala (Финляндия) разработана автоматическая система наблюдения за погодой Vaisala AviMet® Automated Weather Observing System (AWOS) [33]. Система AWOS является частью технологической платформы AviMet®, в которую входят другие крупные системы: система оповещения о сдвиге ветра в приземном слое LLWAS и система дальности видимости на взлётно-посадочной полосе RVR. Все эти системы могут полностью объединяться. AWOS помогает пилотам и диспетчерам в принятии критических решений, предоставляя непрерывную информацию в реальном времени, а также сводки погодных условий аэропорта.

Система AWOS включает в себя датчики, центральный и дублирующий блоки обработки данных и станции для различных групп персонала аэропорта.

Система разработана для использования с различными форматами выходной связи и для соответствия различным стандартам и нормам связи. Кроме того, выходные данные могут передаваться при помощи различных средств связи.

1.1.2.2 В России разработана аэродромная метеорологическая информационно-измерительная система АМИС-РФ. Система [35] зарегистрирована в Госреестре средств измерений под номером 17011-10 [32]. Она предназначена для автоматических измерений метеорологических величин, их обработки, графического и численного отображения на рабочем месте оператора, формирования метеорологических сообщений, регистрации и архивации данных измерений. Область применения – обеспечение метеорологической информацией службы управления воздушным движением с целью обеспечения безопасности взлета и посадки воздушных судов на аэродроме.

Конструктивно система построена по модульному принципу. Измерительный модуль состоит из метеорологических датчиков, предназначенных для измерений метеорологических величин, дополнительного и вспомогательного оборудования, размещенного в основном пункте наблюдения, вдоль взлётно-посадочной полосы и на ближних приводных радиомаяках. Модуль измерительных преобразователей состоит из измерительных преобразователей и каналов связи, размещенных совместно с метеорологическими датчиками. Модуль центральной системы сбора и обработки информации состоит из основной и резервной ПЭВМ, источника бесперебойного питания, модемов, базового и специального программного обеспечения, размещенных в основном пункте наблюдения.

Система работает круглосуточно, данные измерений передаются через определённые интервалы или по запросу. Обмен информацией осуществляется через интерфейсы RS-232/485. Дистанция подключения датчиков при использовании модемов составляет не более 10 км.

Состав измерительных каналов и датчиков АМИС-РФ различных модификаций приведён в таблице 1.2.

Таблица 1.2 - Состав измерительных каналов и датчиков АМИС-РФ различных модификаций

Канал	Датчик		
	АМИС-РФ-01	АМИС-РФ-02	АМИС-РФ-03
Количество каналов	до 18	до 18	до 18
Температура и относительная влажность воздуха	HMP45D	HMP45D	HMP45D
Температура почвы	DTS12G	ТСПТ300	DTS12G
Атмосферное давление	PTB330	PTB200	PTB200
Скорость ветра	WAA151/252 WM30	M-127	RM Young 05103
Направление ветра	WAV151/252 WM30	M-127	RM Young 05103
Высота нижней границы облаков	CL31	ДВО-2	—
Метеорологическая (оптическая) дальность видимости	LT31 FD12/FD12P	ФИ-3	—
Количество и интенсивность осадков	VRG101	RG13/RG13H	—

В этой системе также используется значительное число импортных метеодатчиков.

Существует также комплексная радиотехническая аэродромная метеорологическая станция КРАМС-4. Станция КРАМС-4 [31] зарегистрирована в Госреестре под номером 16175-13 [32]. Назначение, область применения и архитектура системы аналогичны АМИС-РФ. Состав измерительных каналов и датчиков КРАМС-4 различных модификаций приведён в табл. 1.3.

Таблица 1.3 - Состав измерительных каналов и датчиков КРАМС-4 различных модификаций

Канал	Датчик		
	КРАМС-4	КРАМС-4.01	КРАМС-4.02
Количество каналов	до 100	до 50	до 50
Температура и относительная влажность воздуха	HMP45D HMP155	HMP45D HMP155	HMP45D HMP155
Атмосферное давление	PMT16A PTB200 PTB330	PTB200 PTB330	PTB200 PTB330 БРС-1М-1

Скорость ветра	WAA151/252 WM30	WAA151/252 ИПВ-01	ИПВ-01 Ветромер-1
Направление ветра	WAV151/252 WM30	WAV151/252 ИПВ-01	ИПВ-01 Ветромер-1
Высота нижней границы облаков	CL31 CT25K	CL31 ДВО-2 РВО-5 Пеленг СД-02-2006	ДВО-2 РВО-2 Пеленг СД-02-2006
Метеорологическая (оптическая) дальность видимости	LT31 FD12P FS11 PWD	ФИ-3 FD12P FS11 ИМДВ-01	ФИ-3 ИМДВ-01
Количество осадков	RG13/RG13H	Pluvio 2	—

В КРАМС-4 также частично используются импортные метеодатчики.

1.1.2.3 Автоматизированная метеорологическая информационно-измерительная система АМИИС-Ямал-М (зарегистрирована в Госреестре под номером 29908-14 [32]) по назначению, области применения и архитектуре аналогична АМИИС-РФ. Основным отличительным признаком системы является возможность эксплуатации при низких отрицательных температурах в условиях Сибири и Арктики. Состав измерительных каналов и датчиков различных модификаций приведён в табл. 1.4.

Таблица 1.4 - Состав измерительных каналов и датчиков АМИИС-Ямал-М различных модификаций

Канал	Датчик		
	Ямал-М-01	Ямал-М-02	Ямал-М-03
Количество каналов	до 18	до 20	до 12
Температура и относительная влажность воздуха	HMP155 Rotronic HygroClip 2	HMP155 Rotronic HygroClip 2	HMP155 Rotronic HygroClip 2
Атмосферное давление	PTB330	PTB330 БРС-1М-1	БРС-1М-1
Скорость и направление ветра	WAA151/252 WAV151/252	RM Young 05103 ИПВ-01	RM Young 05103 ИПВ-01
Высота нижней границы облаков	CL31	ДВО-2 РВО-5	РВО-5 ДОЛ-2
Метеорологическая (оптическая) дальность видимости	LT31 / FD12 / FS11	FS11	FD12

1.1.2.4 Автоматизированная метеорологическая станция «ЛОМО-Метео» [36] зарегистрирована в Госреестре под номером 50729-12 [32]. «ЛОМО-Метео-01» и «ЛОМО-Метео-02» являются аэродромными АМИИС и предназначены для автоматического дистанционного измерения основных метеорологических величин, ручного ввода, обработки и регистрации результатов измерений, индикации метеорологической информации, а также автоматического формирования и распространения сводок погоды. АМС «ЛОМО-Метео-03» предназначена для сбора, обработки и архивирования информации о состоянии приземного слоя атмосферы, поэтому в её состав, кроме метеорологических измерительных датчиков, входят различные газоанализаторы.

Состав измерительных каналов и датчиков АМС «ЛОМО-Метео» различных модификаций приведён в таблице 1.5. Общий вид АМС «ЛОМО-Метео» показан на рис. 1.2.

В составе АМС «ЛОМО-Метео» количество импортных датчиков существенно сокращено, однако примененные датчики построены, в основном, на базе комплектующих изделий зарубежного производства.

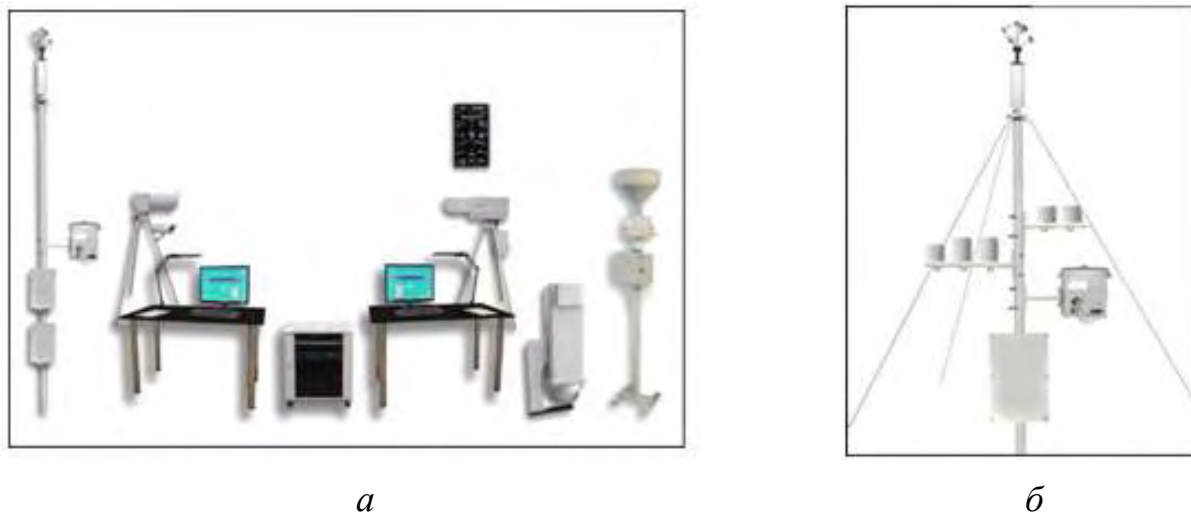


Рисунок 1.2 - Автоматизированные метеорологические аэродромные станции «ЛОМО-Метео»: *a* – «ЛОМО-Метео-01»; *б* – «ЛОМО-Метео-03»

Таблица 1.5 - Состав измерительных каналов и датчиков АМС «ЛОМО-Метео» различных модификаций

Канал	Датчик		
	АМС «ЛОМО-Метео-01»	АМС «ЛОМО-Метео-02»	АМС «ЛОМО-Метео-03»
Количество каналов	до 31	до 22	до 39
Температура и относительная влажность воздуха	ТГБА-1	ТГБА-1 МК-15	ТГБА-1
Атмосферное давление	ТГБА-1	ТГБА-1 МК-15	ТГБА-1
Скорость ветра	ИПВ-У	МК-15/ ИПВ-У	ИПВ-У
Направление ветра	ИПВ-У	МК-15/ ИПВ-У	ИПВ-У
Высота нижней границы облаков	ДОЛ-2	ДОЛ-2	ДОЛ-2
Метеорологическая (оптическая) дальность видимости	ФИ-3 ФИ-4	ФИ-3	ФИ-3 ФИ-4
Яркость фона	ДФ-1	–	ДФ-1
Количество осадков	ИКО-1	–	ИКО-1
Массовая концентрация CH_4	–	–	МСП-Сигма-1
Массовая концентрация $\sum(\text{C}_2\text{--C}_{10})$	–	–	МСП-Сигма-1
Массовая концентрация CO	–	–	МСП-Сигма-8
Массовая концентрация NO_2	–	–	МСП-Сигма-9
Массовая концентрация SO_2	–	–	МСП-Сигма-10
Массовая концентрация H_2S	–	–	МСП-Сигма-11
Объёмная доля O_2	–	–	МСП-Сигма-12

1.1.3 АИИС для метеорологического обеспечения автомобильных дорог

1.1.3.1 АИИС для метеорологического обеспечения автомобильных дорог осуществляют непосредственный и непрерывный контроль состояния дорожного покрытия и тем самым обеспечивают оптимальную и безопасную эксплуатацию дорог самого разного назначения. Полноценное метеорологическое обеспечение дорожной сети позволяет контролировать воздействие атмосферных факторов в режиме реального времени. Благодаря данным, которые непрерывно передаются для обработки и анализа, появляется возможность профессионально оценивать факторы риска для автотранспорта и своевременно принимать решения об устранении последствий погодных воздействий, а именно: своевременно

принимать меры по очистке дорожного полотна от снега и гололеда в зимнее время; планировать движение автотранспорта по разным участкам дорожной сети; принимать решения об ограничении максимальной скорости движения автотранспорта; на основе данных измерений составлять краткосрочный прогноз выпадения осадков и обледенения дорожного покрытия; принимать меры по устранению опасных ситуаций, связанных с экстремальными погодными условиями.

К наиболее распространённым дорожным АИИС относятся системы «МетеоТрасса» (разработана в компании «ИРАМ», Россия; зарегистрирована в Госреестре под номером 23045-14) и ROSA (разработана в компании Vaisala, Финляндия, зарегистрирована в Госреестре под номером 31300-12) [31, 32].

АИИС предназначены для автоматических измерений метеорологических величин: атмосферного давления, температуры и относительной влажности воздуха, скорости и направления ветра, температуры поверхности дорожного полотна или ВПП, температуры грунта, метеорологической (оптической) дальности видимости, толщины слоя воды, снега, льда на поверхности дорожного полотна или ВПП; обработки, отображения, анализа и архивирования результатов измерений, формирования метеорологических сообщений и их передачи по каналу связи. Системы обеспечивают оперативной метеорологической информацией дорожные или аэродромные службы о состоянии дорожного покрытия или ВПП под воздействием метеорологических явлений.

Обе АИИС являются аналогами друг друга. Конструктивно они построены по модульному принципу. Системы работают круглосуточно, сообщения передаются автоматически по установленному режиму или по запросу. Обмен данными осуществляется через интерфейсы RS-232/485. Дистанция подключения датчиков при использовании модемов составляет не более 10 км.

Состав измерительных каналов и датчиков АИИС «МетеоТрасса» различных модификаций и АИИС ROSA приведён в таблице 1.6.

Таблица 1.6 - Состав измерительных каналов и датчиков АИИС «МетеоТрасса» различных модификаций и АИИС ROSA

Канал	Датчик			
	АИИС «Метео Трасса»	АИИС «Метео Трасса-01»	АИИС «Метео Трасса-02»	АИИС ROSA
Температура и относительная влажность воздуха	HMP155	HMP155	WXT520	HMP155
Скорость и направление ветра	WAA151 WAV151	WMT700	WXT520	WAA151/252 WAV151/252
Атмосферное давление	PTB110	PTB330	WXT520	PTB200
Температура поверхности дорожного полотна	DRS511	DST111 DST111R	DST111 DST111R	DRS50/50B DRS511 DRS511B
Толщина слоя воды, снега, льда	DRS511	DSC111	DSC111	DSC111
Температура грунта	DTS12G	DTS12G	DTS12G	DRS511 DRS511B
Метеорологическая (оптическая) дальность видимости	PWD12/22	PWD12/22	PWD12/22	—

1.1.4 Агрометеорологические АИИС

Агрометеорологические АИИС выполняют измерения в реальных погодных условиях с целью предоставления метеоданных, которые необходимы для планирования и контроля оптимального времени выполнения полевых работ (посев, культивация, защита от вредителей, потребность в орошении, сбор урожая и др.). Собранные метеоданные также анализируются с целью принятия более эффективных решений, которые подразумевают меньшую степень риска в управлении хозяйством.

Среди разработанных агрометеорологических АИИС можно выделить две современные системы, которые широко используются в нашей стране и за рубежом.

Система Vaisala AWS [33] предоставляет данные и вычисления, которые помогают земледельцам повышать эффективность орошения, оптимизируя использование воды. В наиболее распространённую в мире систему обычно

входит портативная метеостанция Vaisala WXT520, пиранометр и датчики температуры и влажности почвы. Эта система предоставляет основные агрометеорологические данные: скорость и направление ветра, температуру и относительную влажность воздуха, атмосферное давление, количество осадков, температуру и влажность почвы, энергетическую освещенность и расчётное значение эвапотранспирации. Включённые в систему датчики требуют минимума технической поддержки и обслуживания после установки.

Система построена по модульному принципу. Имеет автономное питание от аккумуляторов и солнечных панелей. Данные измерений передаются в центр сбора по радиоканалу стандарта GSM/GPRS.

Метеорологический комплекс МК-30 «Агро». Комплекс МК-30 «Агро» [36] зарегистрирован в Госреестре под номером 43634-10 [32]. Предназначен для автоматических измерений основных агрометеорологических величин, их регистрации, отображения, архивации, передачи в канал связи. Обработка результатов измерений включает усреднение измеряемых величин за установленный оператором временной интервал, формирование данных об условиях зимовки озимых, рекомендации о целесообразности и сроках проведения химических обработок.

В состав комплекса входит акустический анемометр, комплект агрометеорологических датчиков, центральный блок, блок питания и ПЭВМ. Состав измерительных каналов и датчиков МК-30 «Агро» приведён в табл. 1.7.

Комплекс работает круглосуточно, данные измерений передаются через определённые интервалы или по запросу. Обмен информацией осуществляется через интерфейс RS-232. Передача данных в центр обработки данных осуществляется по проводному или радиоканалу.

Комплексы могут работать как самостоятельно, так и в составе АИИС.

Таблица 1.7 - Состав измерительных каналов и датчиков комплекса МК-30 «Агро»

Канал	Датчик
Температура и относительная влажность воздуха	MP106A-T7-W4
Атмосферное давление	ПДТК-0,1-МП
Направление и скорости горизонтальной и вертикальной составляющих ветра	МАЕК.416312.005
Температура почвы	ТС-1388/4
Влажность почвы	6440
Наличие росы	н/д
Количество осадков	7852
Энергетическая освещённость	6450

1.1.5 АИИС экологического мониторинга

1.1.5.1 АИИС экологического мониторинга предназначены для непрерывного контроля экологического состояния воздуха муниципальных образований, крупных промышленных и транспортных объектов и пр. В нашей стране и за рубежом разработаны и функционируют различные как крупные региональные, так и небольшие локальные АИИС экологического мониторинга. Среди отечественных систем мезомасштабного метеорологического и экологического мониторинга следует отметить единую систему экологического мониторинга города Москвы [38]. Она включает в себя несколько мобильных и 43 стационарные автоматические станции контроля загрязнения атмосферы АСКЗА, из них 3 высотные станции, расположенные на Останкинской телебашне и 2 фоновых станции за чертой города Москвы (в качестве измерительных средств использованы, в основном, датчики зарубежного производства указанных выше компаний). Система мониторинга ГИС-Атмосфера построена на основе измерительных приборов «Морепром-А8» и позволяет контролировать стандартные метеорологические характеристики (температуру и влажность воздуха, направление и скорость ветра), а также концентрацию в воздухе двуокиси азота (NO_2) и серы (SO_2), окиси углерода (CO), сероводорода (H_2S). Архитектура комплекса предусматривает возможность оснащения его

дополнительными датчиками с возможностью расширения объема обрабатываемой информации до 18 каналов.

1.1.5.2 К локальным экологическим АИИС относится измерительный комплекс «СКАТ» [39], (рег. № 26524-09 [32]), предназначенный для непрерывного автоматического измерения массовой концентрации CO, CO₂, NO, NO₂, SO₂, H₂S, O₃, NH₃, $\Sigma(C_xH_y+CH_4)$, CH₄, $\Sigma(C_xH_y-CH_4)$, CH₂O, аэрозольных частиц (пыли) в атмосферном воздухе; сбора, регистрации, обработки, визуализации и хранения полученных данных; передачи по запросу накопленной информации по проводным и беспроводным каналам связи.

1.1.5.3 К региональным экологическим АИИС относится автоматизированная система контроля радиационной обстановки (АСКРО) ([40], рег. № 22528-02 [32]). Система предназначена для измерения мощности экспозиционной (эквивалентной) дозы гамма-излучения измерительными постами, размещёнными вокруг ядерного объекта, а также для прогнозирования радиационной обстановки на местности в аварийных ситуациях в автономном режиме.

1.1.5.4 Наиболее универсальной и многоцелевой отечественной АИИС экологического мониторинга является региональная автоматизированная измерительная система производственно-экологического мониторинга (РАИСПЭМ) потенциально-опасных предприятий и состояния окружающей среды. РАИСПЭМ [41] зарегистрирована в Госреестре под номером 50366-12 [31] и предназначена для непрерывного измерения и контроля превышения предельно допустимой концентрации (ПДК) вредных химических и радиоактивных веществ на рабочих местах, на территории промышленной площадки предприятия, в санитарно-защитной зоне, в зоне наблюдения, а также для измерений и контроля параметров окружающей среды – основных метеорологических величин (температуры и относительной влажности воздуха, атмосферного давления). Система включает в себя объектовые автоматизированные измерительные системы производственно-экологического мониторинга (АИСПЭМ) и мобильные

автоматизированные системы экологического мониторинга комплексов аварийного реагирования (АСЭМКАР).

РАИСПЭМ обеспечивает:

- измерение параметров химической и радиационной обстановки с чувствительностью, позволяющей регистрировать её изменения на уровнях от ПДК, минимальной допустимой активности и радиационного фона и выше, параметров уровня вод, расхода и качества воды и др.;
- оперативное обнаружение и сигнализацию об аварийных ситуациях;
- измерение и регистрацию метеорологических величин в местах наблюдения;
- сбор, обработку и отображение данных о радиационной и экологической обстановке (концентрация вредных химических веществ в воздухе, метеовеличины, уровень воды в водоёмах, расход и качество воды и др.);
- передачу информации в смежные системы;
- возможность передачи информации в органы местного самоуправления и органы, осуществляющие государственный санитарно-эпидемиологический надзор для выполнения функции оповещения и информирования населения об угрозе возникновения или о возникновении чрезвычайных и аварийных ситуаций, создающих угрозу населению.

РАИСПЭМ представляет собой централизованную территориально распределённую 2-уровневую систему с распределённой организацией сбора и обработки информации. Технические средства РАИСПЭМ разделены на программно-технические средства нижнего и верхнего уровней. Функционально программно-технические средства верхнего уровня реализуют центральный диспетчерский пункт сбора данных системы. Для этой цели он оснащён автоматизированными рабочими местами и прикладным программным обеспечением верхнего уровня.

В состав оборудования программно-технических средств нижнего уровня входит оборудование стационарных и переносных автоматических постов, обеспечивающих измерение контролируемых параметров в точках контроля и

передающих результаты измерений на центральный диспетчерский пункт по беспроводным каналам связи. Посты подразделяются на:

- автоматические стационарные посты контроля опасных химических веществ (9 шт.);
- автоматические стационарные посты контроля метеорологических величин (2 шт.);
- автоматические стационарные посты контроля гидрологических величин водных объектов (1 шт.);
- автоматические стационарные посты контроля радиационных величин (3 шт.);
- автоматические стационарные посты контроля аэрозолей (1 шт.).

В состав РАИСПЭМ дополнительно в качестве подсистем могут быть включено до десяти АИСПЭМ предприятий, расположенных в радиусе до 50 км, и пяти АСЭМКАР (таблица 1.8).

Таблица 1.8 - Состав измерительных каналов и датчиков РАИСПЭМ

Канал	Датчик
Концентрация SO_2	Сенсис-400
Концентрация NO_2	Сенсис-400
Концентрация CO	Сенсис-400
Концентрация $\sum \text{C}_x\text{H}_y$	Сенсис-400
Концентрация CH_2O	Сенсис-400, ГАНК-4РБ
Концентрация HCl	Сенсис-400
Концентрация Cl_2	Сенсис-400
Концентрация HF	Сенсис-400
Концентрация $\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$	ГАНК-4РБ
Мощность амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения	GammaTRACER Basic, MiniTRACE Gamma S100
Амбиентный эквивалент дозы гамма-излучения	MiniTRACE Gamma S100
Температура и относительная влажность воздуха	WXT520
Скорость и направление ветра	WXT520
Количество осадков	WXT520
Высота уровня воды	OTT RLS
Концентрация аэрозольных частиц	ОМПИ-10.0

1.2 Технические средства контроля метеорологических характеристик и газового состава атмосферы и возможность их применения в составе АИИС ЭММ АПС

1.2.1 Технические средства для метеорологического мониторинга приземного слоя атмосферы

1.2.1.1 Для измерения скорости и направления ветра в приземном слое атмосферы традиционно применяются анеморумбометры роторного типа. Физический принцип – вращение ротора под действием ветрового потока и преобразование частоты вращения ротора в показания скорости ветра [43].

В таблице 1.9 приведены характеристики основных моделей отечественных анеморумбометров.

Таблица 1.9 - Технические характеристики основных моделей отечественных анеморумбометров

Модель анемометра (анеморумбометра)	Датчик ветра М-127	Анемометр сигнальный АС-1	Чашечный анемометр с дополнительным флюгером
Диапазон измерения скорости ветра V , м/с	от 2 до 60	от 2,5 до 45	от 2,5 до 45
Погрешность измерения скорости ветра, м/с	$\pm(0,3+0,04V)$	$\pm(0,5\pm 0,05V)$	$\pm(0,5\pm 0,05V)$
Диапазон измерения направления ветра	0 до 360°	Не измеряет	0 до 360°
Погрешность измерения направления ветра	$\pm 6^\circ$	Не измеряет	$\pm 6^\circ$

Основные достоинства роторных анемометров (анеморумбометров):

- простота конструкции;
- невысокая стоимость.

Основные недостатки роторных анемометров (анеморумбометров):

- малая чувствительность и высокая погрешность измерений;

- большая инерционность измерений (невозможность использования для контроля турбулентных характеристик атмосферы);
- невысокая надежность (наличие в конструкции механически вращающихся элементов);
- зависимость от погодных условий (обмерзание конструкции и налипание мокрого снега приводит к ошибкам измерений);
- зависимость от точности установки вертикальной оси конструкции (отклонения от вертикали приводит к ошибкам измерений).

С учетом перечисленных преимуществ и недостатков роторные анеморумбометры, в принципе, могут быть применены в автоматизированных системах ЭММ атмосферы для решения ограниченного круга задач, не требующих высокой точности и малой инерционности измерений, и рассчитанных на работу под постоянным контролем человека. Применение роторных анеморумбометров в составе мобильных измерительных комплексов проблематично.

Ультразвуковые анемометры основаны на принципе измерения времени пролета ультразвуковых импульсов через измерительный объем в двух противоположных направлениях [44]. Основной особенностью ультразвуковых анемометров является то, что они измеряют мгновенные значения скорости и направления ветра. Кроме того, такой прибор позволяет измерять вертикальную составляющую скорости ветра (3D-анемометр), которая характеризует градиентные характеристики приземного атмосферного слоя.

Основные достоинства ультразвуковых анемометров:

- высокая чувствительность измерений;
- малая инерционность измерений (частота измерений мгновенных значений скорости ветра может составлять 80 – 160 Гц) и возможность использования для контроля турбулентных характеристик атмосферы;
- высокая надежность (отсутствие в конструкции механически вращающихся элементов);

- низкая зависимость от погодных условий (обмерзание конструкции и налипание мокрого снега легко устраняется использованием специальных покрытий и систем обогрева элементов конструкции);
- независимость от точности установки вертикальной оси конструкции (отклонения от вертикали устраняется использованием специальных систем контроля углов наклона);
- возможность использования систем контроля функционирования и диагностики непосредственно при эксплуатации прибора.

Основные недостатки ультразвуковых анемометров:

- чувствительность к стабильности расстояния между электроакустическими преобразователями, влияющей на точность измерений, и отсутствие автоматизированной системы контроля метрологических характеристик прибора непосредственно в процессе эксплуатации;
- необходимость учета искажений измеряемого ветрового потока, вносимых несущей арматурой.

В настоящее время в мире разработано и выпускается (в основном, зарубежными фирмами) довольно большое количество ультразвуковых 3D-анемометров различных конструкций (рис. 1.3, 1.4). В таблицах 1.10 и 1.11 представлены их основные технические характеристики. В России опытные образцы анемометров были разработаны только в НПО «Тайфун», а экспериментальные в ИОА СО РАН [45].

С учетом перечисленных преимуществ и недостатков ультразвуковые анемометры наиболее предпочтительны для использования в составе автоматизированных систем ЭММ атмосферы. Тем не менее, анализ технических характеристик серийно выпускаемых ультразвуковых термоанемометров (см. табл. 1.10 и 1.11) говорит о необходимости разработки специализированных модификаций приборов, функциональные возможности которых в большей степени соответствовали бы концепции разрабатываемой ЭО ИВС (см. п. 1.4 настоящей работы).

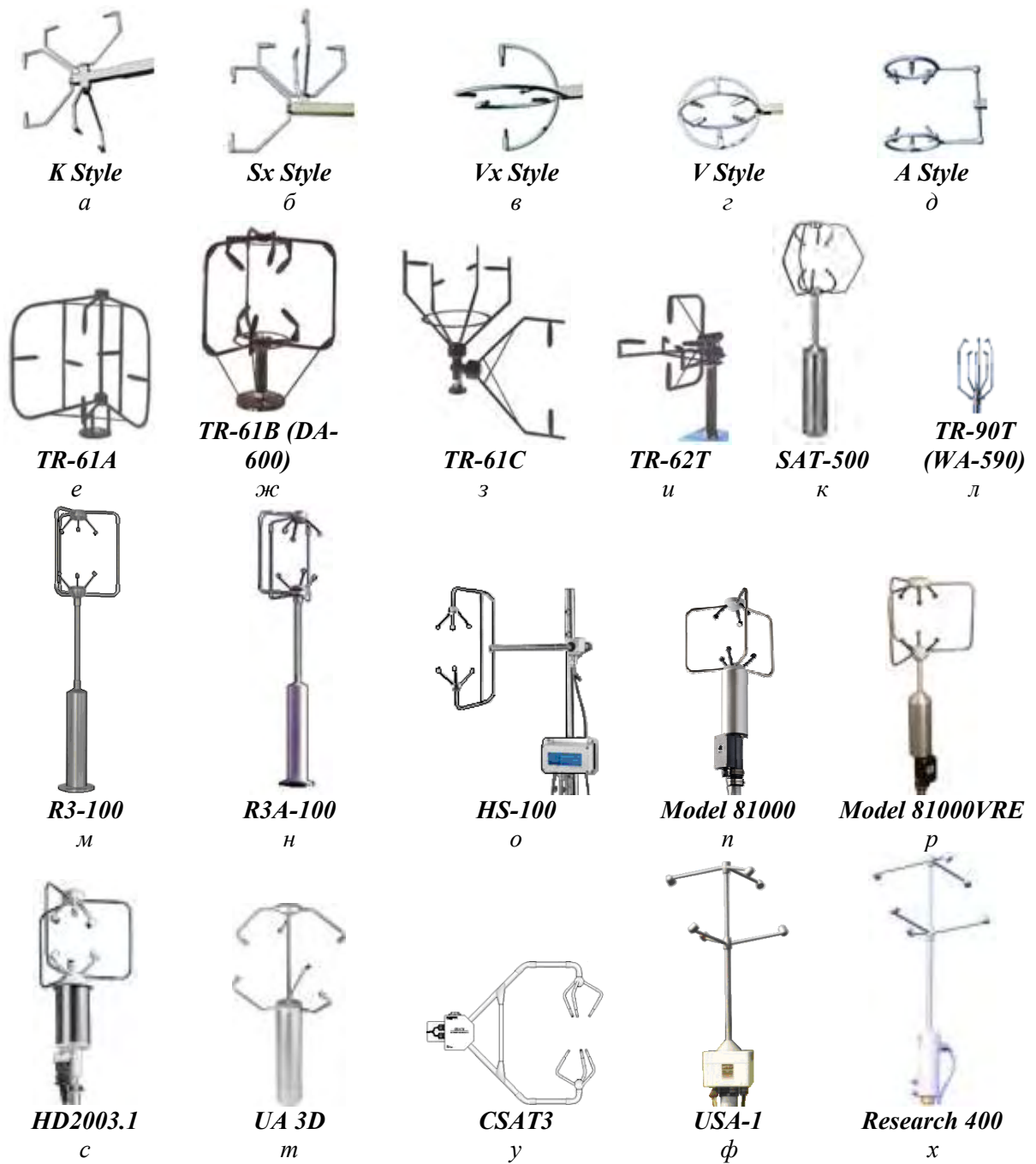


Рисунок 1.3 - Ультразвуковые анемометры для измерения трехкомпонентного вектора скорости ветра зарубежных фирм: *a-d* – Applied Technologies Inc.; *e-л* – Kaijo (Sonic Corporation); *м-о* – Gill Instruments Ltd.; *н-р* – R.M. Young Company; *с* – Delta Ohm Srl.; *т* – Thies Clima; *у* – Campbell Scientific Inc.; *ф* – METEK GmbH; *х* – Biral



а) АЦАТ-3



б) АЦАТ-3М

Рисунок 1.4 - Ультразвуковые анемометры НПО "Тайфун" (Россия)

Таблица 1.10 - Технические характеристики ультразвуковых 3D-анемометров зарубежного производства

Модель (рис. 1.3)	Скорость ветра, м/с			Направление, град		Рабочая температура Т, °С
	Диапа- зон	Разре- шение	Погреш- ность	Диапа- зон	Погреш- ность	
<u>K Style</u> (рис. 1.3,а)	0...30	0,01	0,03	0...359	±0,1	-40...+60
<u>Sx Style</u> (рис. 1.3,б)	то же	то же	то же	то же	то же	то же
<u>Vx Style</u> (рис. 1.3,в)	0...20	то же	то же	то же	то же	то же
<u>V Style</u> (рис. 1.3,г)	0...15	то же	то же	то же	то же	то же
<u>A Style</u> (рис. 1.3,д)	0...60	то же	то же	то же	то же	то же
<u>TR-61A</u> (рис. 1.3, е)	0...30	0,005	±1%	0...540		-20...+50
<u>TR-61B</u> (рис. 1.3,ж)	0...60	то же	то же	то же		то же
<u>TR-61C</u> (рис. 1.3,з)	0...30	то же	то же	то же		то же
<u>TR-62T</u> (рис. 1.3,и)	0...30	то же	то же	то же		то же
<u>SAT-550</u> (рис. 1.3,к)	0...60	0,01	±2%	540	±3	-20...+50
<u>TR-90T</u> (рис. 1.3,л)	0...10	0,005	±2%			0...40
<u>R3-100</u> (рис. 1.3,м)	0...45	0,01	< ±1%	0...359	< ±1%	-40...+60
<u>R3A-100</u> (рис. 1.3,н)	то же	то же	то же	то же	то же	то же
<u>HS-100</u> (рис. 1.3,о)	0...45	то же	то же	0...360	то же	то же

Таблица 1.11 - Технические характеристики ультразвукового 3D-анемометра производства НПО «Тайфун» (Россия)

Модель (рис. 1.4)	Скорость ветра, м/с			Направление, град		Рабочая температура Т, °С
	Диапа- зон	Разре- шение	Погре- шность	Диапа- зон	Погре- шность	
АЦАТ-3М	0,2...60	-	0,1 м/с	0...359	±6°	-40...+60

Основные требования к разработке ультразвукового анемометра для ЭО ИВС:

- расширение функциональных возможностей – введение функции измерения ультразвуковой температуры воздуха (ультразвуковой термоанемометр);
- повышение эксплуатационных качеств – обеспечение возможности работы в составе мобильного измерительного комплекса;
- расширение диапазона измерения скорости ветра и интервала рабочих температур;
- создание отечественного ультразвукового термоанемометра с техническими характеристиками, не уступающими лучшим зарубежным образцам;
- создание автоматизированной системы контроля метрологических характеристик ультразвукового термоанемометра.

В п.2.1 настоящей работы приведены результаты выполненной при участии и под руководством автора разработки ультразвуковых термоанемометров [46], использованных в составе автоматизированной системы ЭММ АПС (гл. 5 настоящей работы) [42].

1.2.1.2 Для измерения температуры воздуха в метеорологии применяются различные типы контактных термометров, использующих в качестве чувствительного элемента жидкость (ртуть, спиртовой раствор), изменяющую свой объем при изменении температуры: психрометрический термометр ТМ4-1 (срочная температура), минимальный термометр ТМ2-1 (или ТМ2-2, ТМ2-3) (минимальная температура между сроками измерений), максимальный термометр ТМ-1 (максимальная температура между сроками измерений). Термометры этих типов требуют участия в процессе измерений человека и не применяются в составе автоматизированных систем контроля [47].

Более совершенными являются контактные термометры, использующие терморезистивный эффект – изменение удельного сопротивления проводниковых, полупроводниковых и диэлектрических материалов под действием температуры.

Наибольшее распространение среди терморезисторов получил платиновый термометр в связи с тем, что он имеет высокий температурный коэффициент сопротивления, при этом сопротивление постоянно и непрерывно увеличивается при повышении температуры, физические и химические свойства материала остаются неизменными во всем диапазоне измерений, коррозия и физическая деформация слабо влияют на его электрическое сопротивление.

Для исключения влияния прямых солнечных лучей все контактные термометры необходимо устанавливать в психрометрическую будку или в защитный радиационный экран, что затрудняет применение термометров в составе мобильных измерительных комплексов [47].

Основные достоинства термометров на терморезисторах:

- высокая надежность;
- малые вес и габариты;
- низкая стоимость.

Основные недостатки термометров на терморезисторах:

- невысокая чувствительность измерений;
- большая инерционность измерений (невозможность использования для контроля турбулентных характеристик атмосферы);
- большая погрешность измерений в натурных условиях, обусловленная воздействием на датчик солнечной радиации (либо необходимость помещения датчика в защитный радиационный экран, в идеале – в психрометрическую будку).

Альтернативным методом измерения температуры воздуха является метод акустический термометрии, в котором используется зависимость скорости звука в воздухе от его температуры. Метод акустический термометрии может быть реализован совместно с измерениями параметров ветра. Приборы такого типа называются ультразвуковыми термоанемометрами (рис. 1.5) [45].



Рисунок 1.5 - Ультразвуковые термоанемометры: *а* – R3-50 (R.M. Young Company); *б* – Model 81000 (Metek); *в* – USA-1 (Biral)

В табл. 1.12 приведены характеристики основных моделей ультразвуковых термоанемометров.

Таблица 1.12 - Характеристики ультразвуковых термоанемометров

Наименование модели	Model 81000	R3-50
Диапазон измерения температуры	-	Скорость звука в пределах (300-370 м/с)
Точность измерения температуры	-	$<\pm 0.5\%$ при 20°
Диапазон рабочих температур	от минус 40 до плюс 60°C	-

Основные достоинства ультразвуковых термоанемометров:

- высокая чувствительность измерений;
- малая инерционность измерений (частота измерений мгновенных значений температуры воздуха может составлять 80 – 160 Гц) и возможность использования для контроля турбулентных характеристик атмосферы;
- отсутствие ошибки измерений, вызванной воздействием солнечной радиации (отсутствие необходимости помещения датчика в защитный радиационный экран или психрометрическую будку);
- низкая зависимость от погодных условий (обмерзание конструкции и налипание мокрого снега легко устраняется использованием специальных покрытий и систем обогрева элементов конструкции);

- возможность использования специальных систем контроля функционирования и диагностики непосредственно при эксплуатации прибора.

Основные недостатки ультразвуковых термоанемометров:

- чувствительность к стабильности расстояния между ЭАП, влияющей на точность измерений;
- необходимость учета влажности воздуха и атмосферного давления при вычислении температуры воздуха из скорости звука.

С учетом перечисленных преимуществ и недостатков УТА наиболее предпочтительны для использования в составе автоматизированных системах ЭММ атмосферы.

В п.2.1 настоящей работы приведены результаты выполненной при участии и под руководством автора разработки ультразвуковых термоанемометров [46], использованных в составе автоматизированной системы ЭММ АПС (гл. 5 настоящей работы) [42].

1.2.1.3 На неавтоматизированных метеорологических постах применяется психрометрический метод измерения влажности воздуха. Этот метод заключается в одновременном измерении температуры с помощью размещенных рядом термометров. Поверхность чувствительного элемента (резервуара жидкостного термометра или платинового резистора) одного из них покрыта тонкой пленкой воды. Чувствительный элемент другого термометра находится в воздухе, и этот термометр называется сухим. Психрометрический метод измерения влажности воздуха основан на зависимости интенсивности испарения с водной поверхности от дефицита влажности соприкасающегося с ней воздуха. Влажность воздуха определяется косвенно по интенсивности испарения путем измерения понижения температуры тела, с поверхности которого происходит испарение, за счет затраты тепла тела на испарение [47].

В автоматических метеорологических станциях и комплексах применяется адсорбционный (абсорбционный) метод измерения влажности воздуха. Он основан на использовании химических и физических свойств некоторых материалов, проявляющихся при взаимодействии с водяным паром, находящимся

в воздухе. Наибольшее распространение получили резистивные и емкостные датчики влажности, обладающие хорошей точностью, температурной стабильностью и широким диапазоном измерения. Инерционность датчиков (время отклика для шага изменения влажности в 63%) составляет от 30 до 60 с [48].

В табл. 1.13 приведены основные характеристики абсорбционных датчиков влажности различных фирм. Все они измеряют влажность от единиц процентов до 100 % с погрешностью в пределах 1,7 – 5%.

Таблица 1.13 - Характеристики абсорбционных датчиков влажности

Компания – производи- тель	Hygrochip Германия	HY-LINE Sensor- Tec Vertriebs Германия	Sensirion Швейцар ия	Honeywell США	Silicon Labs США	Measurement Specialties США
Модель	НУТ-939	HMT- 71B-H	SHT75	HIH9000 Series	Si7021	HTU21P
Диапазоны измерения влажности %	0-100	0-100	0-100	0-100	0-100	0-100
Точность	0,1% в диапазоне 0-10 %; 1,8 % в диапазоне 10-80 %; ± 4 % (максимал ьная)	±1,8% при 33/75 HR%	±1,8 в диапазоне 10-90%; ± 3 % (максима льная)	±1.7 в диапазоне 10-90%; ± 3 % (максимал ьная)	±2 в диапазоне 0-80% ± 4.5 % (максимал ьная)	±2 в диапазоне 20-80% ± 3 % (максимал ьная)
Гистерезис	±1%	±1%	±1%	±1%	±1%	±1%
Диапазон рабочих температур	-40 ... +125 °C	-40 ... +125 °C	°C	-40 ... +125 °C	-40 ... +125 °C	-40 ... +125 °C

Основные достоинства абсорбционных датчиков влажности:

- малые вес и габариты;
- низкая стоимость.

Основные недостатки абсорбционных датчиков влажности:

- эффект насыщения (временная потеря способности измерения после воздействия высокой влажности или попадания капли дождя);
- большая инерционность измерений;
- временная нестабильность метрологических параметров.

С учетом перечисленных преимуществ и недостатков абсорбционные емкостные датчики влажности наиболее предпочтительны для использования в составе автоматизированных систем ЭММ атмосферы. В описываемых ниже автоматических метеостанциях АМК-03 использованы датчики влажности НН-4602 (Honeywell, США) [49, 50].

1.2.1.4 Атмосферное давление в метеорологии измеряется двумя основными методами:

а) метод, базирующийся на измерении веса столба жидкости, которая уравнивает вес вертикального столба атмосферы, т.е. давление атмосферы (на этом принципе работают ртутные и водяные барометры);

б) метод, базирующийся на измерении деформации эластичной мембраны при возникновении перепада давления на ее сторонах (принцип «барокоробки»): деформация мембраны, в свою очередь, приводит к изменениям других физических величин - емкости, резонансной частоты и др.

В автоматических метеостанциях используются датчики давления только второго типа

В датчиках РТВ210 фирмы Vaisala (Финляндия) используется эффект изменения емкости конденсатора при деформации барокоробки [51]. РТВ210 измеряет атмосферное давление в диапазоне 500-1100 гПа, предел допускаемой погрешности измерения составляет $\pm 0,25$ гПа, рабочая температура от минус 40 до плюс 60 °С [51].

По принципу барокоробки работает датчик давления РКМА-Р, чувствительным элементом которого является кварцевый резонатор. Частота колебаний резонатора изменяется с изменением воздействующего на него давления. РКМА-Р предназначен для работы в составе прецизионных электронных преобразователей, манометров и контроллеров давления с

частотным выходом в качестве преобразователя текущих значений давления в частоту [53]. Датчики РКМА-Р работают в широком диапазоне температур (от минус 55 до плюс 80 °С) и обеспечивают погрешность не более 0,75 %.

В датчиках на пьезорезистивном эффекте деформация барокоробки приводит к изменению сопротивления кристалла. На подобном эффекте работает датчик MPXV4115 (Motorola) [54].

В таблице 1.14 приведены характеристики датчиков давления.

Таблица 1.14 - Характеристики датчиков давления.

Производитель	Freescall Semiconductor	ООО "СКТБ ЭлПА" Россия	ООО "СКТБ ЭлПА" Россия	Vaisala Финляндия
Модель	MPX4115A	ПДТК-0.1	РКМА-0.1-1	РТВ210
Диапазон измерения давления, гПа	150-1150	400...1067	0-1000	50 – 1100
Погрешность в интервале рабочих температур, не более, %	±1,5	±0,06	± 0,75	± 0,05 %
Диапазон рабочих температур, °С	–40 ... +125	–60 ... + 60	–196 ... +250	–40 ... +60

Основные достоинства датчиков давления, использующих метод «барокоробки»: хорошая точность, малые вес и габариты, низкая стоимость.

Основные недостатки датчиков давления: большинство датчиков, в большей или меньшей степени, имеют зависимость от температуры гистерезисного типа, что приводит к ошибкам измерения давления.

С учетом перечисленных преимуществ и недостатков датчики давления, использующие метод «барокоробки», наиболее предпочтительны для использования в составе автоматизированных систем ЭММ атмосферы. В описываемых ниже автоматических метеостанциях использованы датчики

давления MPX4115A (Freescale Semiconductor) и ПДТК-0.1 (ООО "СКТБ ЭлПА", Россия).

1.2.2 Технические средства измерения атмосферных осадков

1.2.2.1 Стандартные осадкомеры, применяемые для сетевых метеорологических наблюдений, имеют сходную конструкцию, основу которой составляют приемная воронка или отверстие и водосборник для хранения собранных осадков до момента измерения. Чувствительность и точность измерений водосборного осадкомера определяется размером приемной воронки и конструкцией водосборника, препятствующей потере собранных осадков на испарение, выдувание и пр.

Типичными примерами водосборного осадкомера традиционной конструкции являются осадкомер О-1 и осадкомер Хеллмана [55, 56, 57]. Эти и подобные осадкомеры позволяют производить измерения осадков за небольшие интервалы времени, так как имеют ограниченный объем водосборника.

Основными источниками систематических погрешностей осадкомеров традиционной конструкции является:

- ветровой недоучет (эффект Джевонса) [58];
- разрушение частиц осадков при ударах о край входного отверстия и их отражение от элементов конструкции водосборника [59];
- потери собранной влаги за счет испарения из прибора и смачивания его стенок.

Данные типы осадкомеров требуют постоянного обслуживания и не могут быть использованы в автоматизированных системах ЭММ.

Для непрерывной регистрации осадков предназначены плювиометры, наиболее распространенными среди которых являются осадкомеры, использующие челночный (tipping-bucket) механизм. Достоинством этих приборов, является более высокая надежность, обусловленная устойчивостью к засорению [60, 61].

Основные достоинства плювиометров:

- возможность автоматизации процесса измерений;
- малые вес и габариты;
- низкая стоимость.

Основные недостатки плювиометров:

- высокая погрешность измерений, обусловленная разнообразными внешними факторами (ветер, испарение собранной влаги, выдувание частиц осадков и пр.);
- инерционность измерений интегральных характеристик осадков;
- отсутствие возможности получения информации о микроструктурных характеристиках осадков.

С учетом перечисленных преимуществ и недостатков плювиометры, в принципе, могут быть применены в автоматизированных системах ЭММ атмосферы для решения ограниченных задач, не требующих высокой точности и малой инерционности измерений, и рассчитанных на работу под постоянным контролем человека.

1.2.2.2 Приборами нового поколения для измерения параметров осадков являются дисдрометры, которые позволяют определять параметры отдельных частиц осадков – их структурные характеристики (размеры, скорости падения, их общее количество) и на основании этих данных получать интегральные характеристики (тип осадков, интенсивность и сумму выпавших осадков) (рис. 1.6) [62, 63]. Подобные приборы способны измерять дальность видимости, различать тип осадков (дождь, морось, смешанные осадки, снег, ледяная крупа, град), туман, дымку или ясную погоду.

Для определения параметров частиц осадков в дисдрометрах используются различные оптические методы [64]:

- прямое рассеяние оптического излучения (рисунок 1.7,*а*);
- ослабление светового пучка при прохождении через него частиц осадков (рис. 1.7,*б*);
- непосредственное получение и анализ изображений (или тени) частиц осадков (рис. 1.7,*в*).

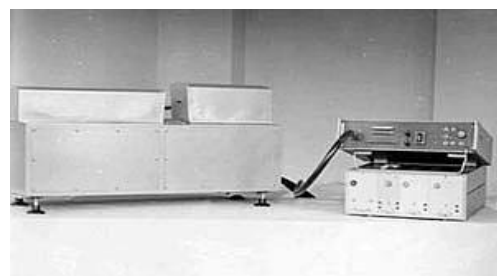
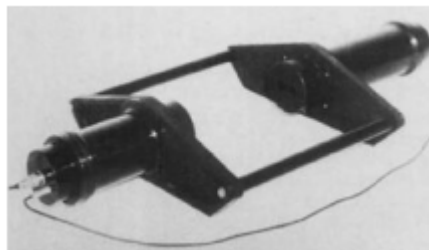
*a**б**в**г*

Рисунок 1.6 - Измерители осадков – дисдрометры: *a* – Optical Scientific (США); *б* – СКБ НП «Оптика» (СССР); *в* – С.Р.Р.Е. (Франция); *г* – Thies Clima (Германия)

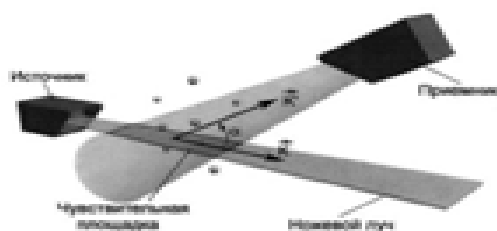
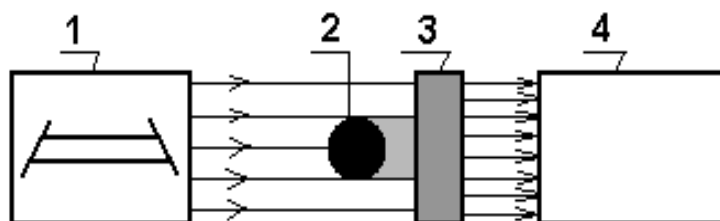
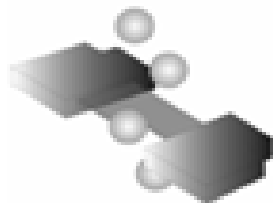
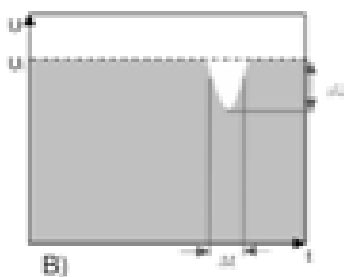
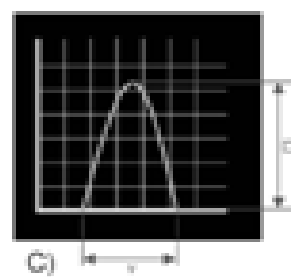
*a)**б)**в)**б)**в)*

Рисунок 1.7 - Принципы работы дисдрометров: *a* – измерение интенсивности рассеяния оптического излучения; *б* – измерение ослабления светового пучка (затенения); *в* – получение и анализ изображения частиц

В таблице 1.15 приведены основные характеристики некоторых оптических приборов для измерения параметров частиц осадков.

Основные достоинства бесконтактные оптические измерители осадков:

- высокая информативность измерений (возможность определения типов осадков, их микроструктурных и интегральных характеристик и пр.);
- высокая чувствительность измерений;
- малая инерционность измерений;
- высокая точность измерений (потенциальная возможность устранения ошибок, вызванных ветровым воздействием, расколом и разбрызгиванием капель дождя, испарением и смачиваемостью поверхности и пр.);
- возможность автоматизации измерений и работы прибора без обслуживания оператором.

Таблица 1.15 - Сравнительные характеристики оптических измерителей осадков

Группа	Наименование / год разработки	Измерительная площадь см ²	Диапазон и точность измерения параметров частиц	
			Измеряемый диапазон	Погрешность
1	Оптический спектроплювиометр OSP (Франция)	100,0	0,31÷5 мм	размер частиц ± 0,3 мм
	Оптический измеритель осадков (МГАПИ)	15,0	0,35÷7 мм	± 3,5% – интенсивность дождя; ±15% – интенсивность снега
	Оптический измеритель дождя ORG-815 (США)/	нет данных	нет данных	±5% от суммы осадков
2	Оптический дисдрометр (Германия)	48,0	1,4÷8 мм	размер капель ±10%
	Лазерный дисдрометр Parsivel (Германия)/	48,0	капли: 0,2÷5 мм, снежинки: 0,2÷25 мм	размер капель ±5% размер снежинок ±20%
	Лазерный дисдрометр Thies Clima (Германия)/	46,0	0,16÷8 мм	размер частиц ±0,2 мм
3	ИКДАН (СССР)	5,7	0,3÷7,5 мм	размер частиц ±0,1 мм
	2D видео дисдрометр 2DVD (Германия)	100,0	0,3÷7,5 мм	размер частиц ±0,2 мм
	Измеритель формы и скорости частиц осадков (Швейцария)	83,7	капли > 1 мм снежинки > 2 мм	размер капель: ±6%; размер снежинок: ±8%

Основные недостатки существующих приборов этого типа:

- ограничение точности измерений вследствие применения различных модельных приближений в оценке форм и размеров частиц, неполного устранения ошибок ветрового недоучета и др.;
- высокая стоимость приборов;
- отсутствие отечественных приборов этого типа.

Исходя из приведенного обзора, можно сделать вывод о том, что наиболее предпочтительными для использования в составе автоматизированных систем ЭММ атмосферы являются бесконтактные оптические измерители осадков, построенные на принципе анализа теневых изображений частиц. В п.2.2 настоящей работы приведены результаты выполненной при участии и под руководством автора разработки оптических измерителей осадков, использованных в составе автоматизированной системы ЭММ АПС (гл. 5 настоящей работы).

1.2.3 Приборы контроля газового состава приземной атмосферы

1.2.3.1 Воздух приземной атмосферы представляет собой многокомпонентную газовую смесь, в которой наряду с основными атмосферными газами (азот, кислород, углекислый газ), концентрация которых составляет десятки процентов, присутствует большое количество газовых компонент, являющихся продуктами природных процессов и технологической деятельности человека, содержание которых в атмосфере определяется сотыми и тысячными долями процента. Тем не менее, именно эти газы (поллютанты) оказывают большое влияние на экологическое состояние окружающей среды [65, 66].

Следовательно, к газоанализаторам, предназначенным для работы в составе систем экологического мониторинга, должны предъявляться следующие требования:

- многокомпонентность и селективность анализа – в воздухе могут присутствовать десятки различных газовых загрязняющих веществ, в зависимости от особенностей территории и вида осуществляемой на ней хозяйственной деятельности;
- высокая чувствительность анализа – уровни ПДК многих газов составляют тысячные доли процента;
- точность определения концентрации газовых компонент (для задач экологического контроля, как правило, достаточной является погрешность измерений в 10 – 30%);
- оперативность анализа – в виду высокой токсичности многих загрязняющих веществ экологический контроль должен проводиться оперативно, желательно, в режиме реального времени;
- длительность непрерывной работы – экологический контроль должен осуществляться в непрерывном режиме в течении длительного времени;
- автоматизация и низкая ресурсоемкость процесса измерений.

1.2.3.2 Среди большого количества существующих сегодня видов газоанализаторов – электро- и термохимических, хроматографических, фотоколориметрических и др. – наиболее полно отвечают этим требованиям оптические газоанализаторы [67]. Этому виду газоанализаторов свойственны оперативность и длительность непрерывной работы, ограниченная только ресурсом применяемых источников оптического излучения. Они не требуют расходных материалов и легко поддаются автоматизации. Такие характеристики, как многокомпонентность, селективность, чувствительность и точность, зависят от типа оптического газоанализатора и используемого в нем метода анализа. Наиболее перспективными с этой точки зрения представляются сегодня оптические газоанализаторы, использующие метод дифференциальной спектроскопии и метод спонтанного комбинационного рассеяния света (СКР-спектроскопия) [68].

В основу метода дифференциальной спектроскопии положена способность газовых молекул и атомов избирательно поглощать оптическое излучение

сложного спектрального состава. В зависимости от сорта контролируемого газа выбирается рабочий спектральный диапазон газоанализатора: в инфракрасной области оптического спектра проще осуществляется спектральная селекция поглощающих газов, но полосы поглощения более слабые, чем в видимой области спектра [69, 70].

Для анализа многих загрязняющих газов (окись азота (NO), двуокись азота (NO_2), закись азота (N_2O), двуокись серы (SO_2), аммиак (NH_3), хлор (Cl_2), бром (Br_2), озон (O_3), перекись водорода (H_2O_2), сероуглерод (CS_2), сероводород (H_2S), четыреххлористый углерод (CCl_4), формальдегид (HCHO), ацетальдегид (CH_3CHO), бензальдегид ($\text{C}_6\text{H}_5\text{CHO}$)) часто используется ближний ультрафиолетовый диапазон оптического спектра, в котором отсутствует поглощение основных компонент атмосферы (N_2 , O_2 , CO_2 и H_2O) [71]. Кроме того, для этой области спектра существуют материалы с необходимыми оптическими свойствами, а также разработаны и промышленно выпускаются эффективные источники и приемники излучения.

Для обеспечения высокой чувствительности к качественному составу анализируемой газовой среды газоанализаторы УФ-диапазона должны иметь элементы, позволяющие успешно осуществлять спектральную селекцию излучения, поэтому важной технической характеристикой УФ газоанализаторов является использованный в приборе способ спектральной селекции света.

В большинстве случаев для выделения рабочей области спектра газоанализатора используются стеклянные или интерференционные светофильтры. Такие газоанализаторы технически просты, легки в эксплуатации и имеют относительно низкую стоимость. Это наиболее распространенный тип газоанализаторов, который применяется для измерения одного-двух компонентов относительно простой газовой среды (в тех случаях, когда в рабочей области спектра газоанализатора находятся полосы поглощения не более двух компонентов среды).

Для анализа сложных газовых сред используются дисперсионные газоанализаторы, основанные на использовании спектрометров и различных

технических и математических методик решения таких задач. Дисперсионные газоанализаторы более сложны и имеют более высокую стоимость. На практике, как правило, удается эффективно разделить 2-3 компоненты в одном газоанализаторе, для большего числа компонент создают газоаналитические комплексы, состоящие из отдельных газоанализаторов.

Основные преимущества оптических газоанализаторов, использующих метод дифференциальной спектроскопии:

- возможность осуществления длительных непрерывных измерений в автоматическом режиме;
- отсутствие расходных материалов;
- отсутствие необходимости особой пробоподготовки;
- многокомпонентность анализа;
- относительная простота конструкции и невысокая стоимость.

Основные недостатки оптических газоанализаторов:

- небольшое количество анализируемых газовых компонент;
- относительно большой вес и габариты.

По своим техническим и эксплуатационным характеристикам оптические газоанализаторы этого типа могут использоваться в составе автоматизированных систем ЭММ в случаях, когда компонентный состав газовых поллютантов определен и не слишком велик. Препятствием широкого применения газоанализаторов является низкий уровень развития этого вида приборостроения в России, значительно уступающий мировому. Разработанные и выпускаемые отечественными компаниями газоанализаторы по разным причинам (в основном в из-за высокого соотношения цена-качество) недостаточно конкурентоспособны и широкого внедрения не получили.

В главе 4 представлены результаты выполненной при участии автора разработки оптического газоанализатора УФ-диапазона для контроля дымовых газов, выбрасываемых в атмосферу теплоэнергетическими предприятиями [72].

Другим перспективным видом оптического газоанализатора является СКР-газоанализатор, в основе работы которого использован эффект спонтанного

комбинационного рассеяния света газовыми молекулами [73]. Основным достоинством этого метода газоанализа является возможность одновременного детектирования всех молекулярных компонентов газовой среды с помощью одного источника света (лазера) с фиксированной частотой излучения, при этом сигнал СКР любого компонента строго индивидуален, пропорционален его концентрации, обладает малой инерционностью и не зависит от состава газовой среды. Благодаря этому, метод СКР-спектроскопии особенно перспективен для определения качественного и количественного состава газовых сред сложного молекулярного состава. В частности, газоанализ методом СКР-спектроскопии является единственным оптическим методом диагностики газовых сред, качественный состав которых заранее неизвестен [74].

Основной технической проблемой, которую необходимо решить при создании СКР-газоанализатора является чрезвычайно низкий уровень интенсивности рассеянного молекулами оптического сигнала, несущего информацию о сорте и количестве молекул газовой компоненты. Тем не менее, в последнее время, благодаря появлению мощных малогабаритных лазеров с достаточно большим ресурсом работы, высокочувствительных фотоприемников на основе ПЗС-матриц с многоступенчатым охлаждением элементами Пельтье и мощных микропроцессоров, позволяющих проводить обработку и выделение полезного сигнала в режиме реального времени, появилась практическая возможность создания высокочувствительных многокомпонентных СКР-газоанализаторов как в стационарном, так и в мобильном исполнениях.

Основные преимущества СКР-газоанализаторов:

- многокомпонентность анализа;
- относительная компактность конструкции;
- отсутствие расходных материалов;
- отсутствие необходимости особой пробоподготовки (требуется только фильтрация газа от аэрозольных частиц и сжатие газовой пробы);
- оперативность выполнения измерений;

- возможность осуществления длительных непрерывных измерений в автоматическом режиме.

Основные недостатки СКР-газоанализаторов:

- низкая концентрационная чувствительность (для обеспечения работы в системах экологического контроля требуется применение дополнительных мер по увеличению чувствительности прибора до уровня ПДК загрязняющих газов);
- сложность конструкции и высокая стоимость газоанализатора.

В главе 4 представлены результаты разработки СКР-газоанализатора, выполненной при участии автора. В описываемой в главе 5 автоматизированной системе ЭММ АПС использован экспериментальный образец мобильного газоанализатора СКР/м.

1.3 Технические средства

дистанционного контроля метеорологических параметров АПС и возможность их применения в составе АИИС ЭММ АПС

1.3.1 Локационные и аэрологические методы определения метеорологических параметров АПС

1.3.1.1 Локационные методы – это дистанционные методы измерений, основанные на регистрации и обработке акустических, оптических или радиосигналов, излучаемых в атмосферу и рассеиваемых ею в обратном направлении. К этой группе можно отнести и, так называемые, трассовые методы зондирования, в которых прошедший через воздушную среду полезный сигнал принимается и обрабатывается в конце трассы зондирования или возвращается для обработки в точку излучения посредством искусственных отражателей сигналов.

К основным локационным методам, позволяющим измерять основные метеорологические величины, относятся содарный, радиолокационный, радиоакустический и лидарный методы.

Содарный метод заключается в следующем. В атмосферу излучается звуковой сигнал, который, распространяясь, взаимодействует с ней, а рассеянное на неоднородностях атмосферы излучение принимается приемной антенной, по параметрам принятого излучения судят о характеристиках атмосферы [75]. На основе данных, полученных доплеровским содаром, можно определить скорость и направление ветра в АПС.

В радиолокационном методе используются отраженные от атмосферных образований радиоволны. Радиолокаторы применяют, в основном, для контроля атмосферных осадков, а также для измерения скорости ветра, комбинируя его с аэрологическим методом (измерение скорости полета шар-зонда) [43].

В радиоакустическом методе зондирования используется резонансное отражение радиоволн (по закону Брега) от периодических неоднородностей атмосферы, созданных посланными акустическими волнами. Данный метод помимо скорости и направления ветра позволяет определять температуру воздуха [75].

В лидарном методе в атмосферу направляют лазерное излучение, а информацию о параметрах атмосферы получают из анализа интенсивности или спектра рассеянных атмосферой оптических сигналов [76, 77].

В главе 3 настоящей работы описывается разработанный при участии автора метод контроля метеорологических характеристик АПС посредством спектрохимического лидара. Метод основан на анализе временных параметров акустического сигнала, инициированного плазмой оптического пробоя, создаваемого в атмосфере мощным лазерным импульсом. Он позволяет получать информацию о средних по высоте значениях скорости ветра и температуры воздуха, но имеет существенные ограничения по практическому применению и может рассматриваться только как попутный метод контроля метеорологических

параметров при дистанционном спектроскопическом анализе атмосферных загрязнителей.

Основные достоинства локационных методов:

- возможность получения данных о метеорологических параметрах АПС на высотах от нескольких сотен метров до нескольких километров, возможность определения вертикальных профилей метеопараметров;
- дистанционность измерений;
- автоматизация измерений.

Основные недостатки локационных методов:

- малая дальность действия, плохая разрешающая способность по времени, низкая помехоустойчивость, раздражающее воздействие на человека (сонары);
- низкая разрешающая способность и недостаточная информативность (радиолокаторы);
- зависимость возможности измерений от состояния атмосферы (ветер, турбулентность) и наличия осадков, низкая помехоустойчивость (системы радиоакустического зондирования);
- низкая разрешающая способность и неоднозначность получаемой информации - зависимость от моделей атмосферных процессов и алгоритмов расчета метеорологических величин на основе данных локации (лидары);
- большие габариты, вес и высокая стоимость оборудования (все локационные системы).

Локационные методы, в принципе, могут быть использованы в системах ЭММ АПС для контроля вертикальных профилей метеорологических параметров. Достаточную эффективность работы можно достичь сочетанием в одной системе нескольких способов зондирования (например, радиоакустического и лидарного). Такой подход имеет ограничения по габаритам системы и ее стоимости.

1.3.1.2 Аэрологические методы – это контактные методы измерений, предусматривающие размещение измерительных датчиков на подвеске аэрологического зонда, запускаемого с поверхности земли в свободный полет.

Наиболее распространенным методом является запуск шаров-зондов с метеорологическим оборудованием и последующим отслеживанием его помощью радара или GPS системы. Подобный метод позволяет осуществить профилирование основных метеорологических величин контактными методами до достаточно больших высот порядка 30-40 км [43].

Основные преимущества аэрологических методов:

- прямые контактные измерения метеорологических характеристик АПС;
- слабая зависимость от текущих метеоусловий;
- хорошая помехозащищенность.

Основные недостатки аэрологических методов:

- отсутствие возможности управления пространственной локализацией измерений (измерения выполняются в областях АПС, определяемых текущими метеоусловиями);
- низкое пространственно-временное разрешение метода, особенно в нижней области АПС (запуски шар-зонда производятся достаточно редко, шар-зонд быстро покидает данный высотный интервал);
- высокая стоимость измерений (шар-зонд с установленным измерительным оборудованием безвозвратно теряется после единичного запуска);
- невозможность автоматизации измерений.

В силу своих особенностей аэрологические методы не могут быть использованы в автоматизированных системах ЭММ АПС.

1.3.2 Дистанционные контактные методы контроля метеорологических параметров АПС с использованием беспилотных летательных аппаратов

1.3.2.1 Альтернативным методом получения вертикальных профилей метеорологических, турбулентных и экологических характеристик АПС являются их непосредственные контактные измерения посредством датчиков, устанавливаемых на платформе БПЛА различных типов, в частности, привязных аэростатов [78]. Основными рабочими высотами для привязных аэростатов

являются высоты до 2 км, что представляет собой наиболее интересный для изучения слой АПС. В последнее время этот метод активно развивается за рубежом.

В работе [79] описаны исследования, выполненные с помощью аэростата, на который устанавливался ультразвуковой анемометр, работающий с частотой 100 Гц, и малоинерционный термометр, что позволяло осуществлять мониторинг не только основных метеорологических величин, но и измерять параметры турбулентности (рис.1.8).

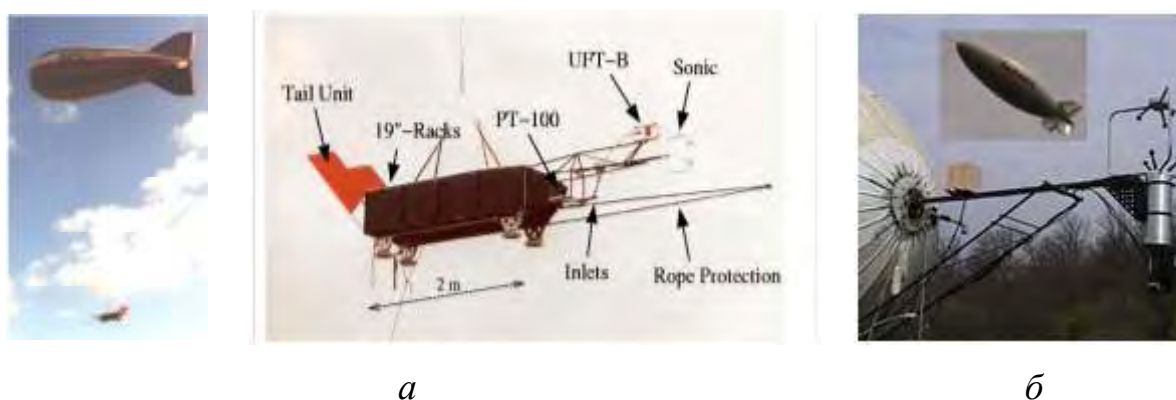


Рисунок 1.8 - Зарубежные БПЛА аэростатного типа с полезной нагрузкой для метеорологических и экологических измерений: *а* – БПЛА аэростатного типа с оборудованием и полезная нагрузка: ультразвуковой анемометр (Sonic), малоинерционный термометр (UFT-B), система для измерения аэрозоля; *б* – УАМС 81000 фирмы R.M. Young Company (США) на БПЛА аэростатного типа

Основные преимущества метода измерений с помощью привязных аэростатов:

- прямые контактные измерения метеорологических, турбулентных и экологических характеристик АПС;
- возможность непрерывных продолжительных измерений характеристик АПС в заданной точке нижнего слоя атмосферы (на высотах от 0 до 2000 метров);
- высокое пространственное и временное разрешение;

- хорошая помехозащищенность;
- возможность измерения вертикальных профилей метеорологических, турбулентных и экологических характеристик АПС посредством контролируемого подъема (спуска) аэростата (метод имеет ограничения по инерционности измерений);
- хорошая грузоподъемность.

Основные недостатки измерений с помощью привязных аэростатов:

- ограничение применения по скорости ветра (большинство привязных аэростатов не имеют возможности подняться при скорости ветра, превышающей 10 – 15 м/с);
- большие габариты баллона аэростата в наполненном газом состоянии;
- возможность оказания помех авиации и связанная с этим необходимость получения специального разрешения на подъем аэростата.

В главе 3 настоящей работы представлены результаты выполненной при участии и под руководством автора разработки технологии контактных измерений метеорологических и турбулентных характеристик АПС с помощью привязного аэростата отечественного производства [80].

Данный измерительный комплекс использован в составе разработанной под руководством и при участии автора автоматизированной системы ЭММ АПС (см. главу 5 настоящей работы).

1.3.2.2 В качестве несущей платформы измерительных комплексов могут использоваться, так же, БПЛА мультикоптерного типа. Они имеют преимущества по отношению к БПЛА самолетного типа, которые, в силу высокой скорости перемещения в атмосфере, не обеспечивают достаточного пространственного и временного разрешения измерений, обладают низкой чувствительностью, не позволяют исследовать турбулентные процессы.

В настоящее время доступные и относительно недорогие мультикоптеры обеспечивают подъем с полезной нагрузкой 3 – 5 кг на высоту 2 – 4 км при длительности полета 30 – 40 минут.

В современных БПЛА бортовая система навигации и управления может обеспечивать:

- полет по заданному маршруту (задание маршрута производится с указанием координат и высоты поворотных пунктов маршрута);
- изменение маршрутного задания или возврат в точку старта по команде с наземного пункта управления;
- облет указанной точки;
- стабилизацию углов ориентации БПЛА,
- поддержание заданных высот и скорости полета (путевой либо воздушной),
- сбор и передачу телеметрической информации и параметрах полета и работе целевого оборудования,
- программное управление устройствами целевого оборудования.

Все это позволяет обеспечить большую мобильность и оперативность измерений при невысокой стоимости эксплуатации БПЛА.

Основные преимущества технологии измерений параметров АПС с помощью БПЛА мультикоптерного типа:

- прямые контактные измерения метеорологических и турбулентных характеристик АПС;
- возможность оперативных кратковременных измерений характеристик АПС в заданных точках атмосферы (на высотах от 0 до 4000 метров);
- высокое пространственное и временное разрешение;
- хорошая помехозащищенность;
- возможность измерения вертикальных профилей метеорологических, турбулентных и экологических характеристик АПС посредством контролируемого подъема (спуска) БПЛА по заданной программе;
- небольшие вес и габариты устройства;
- относительно невысокая цена.

Основные недостатки технологии измерений параметров АПС с помощью БПЛА мультикоптерного типа:

- небольшая длительность измерений (20 – 40 минут);

- относительно низкая грузоподъемность несущей платформы (требуется создание специализированных измерительных комплексов, имеющих малый вес, небольшие габариты и низкое энергопотребление).

В главе 3 представлены результаты выполненной при участии и под руководством автора разработки технологии измерений параметров АПС с помощью портативной метеорологической станции, установленной на БПЛА мультикоптерного типа [80].

Данный измерительный комплекс использован в составе автоматизированных систем ЭММ АПС (см. главу 5 настоящей работы).

1.4 Концепция измерительно-вычислительной системы для исследований новых алгоритмов, методов и технологий контроля АПС

Приведенные выше системы метеорологического и экологического мониторинга, отличаясь друг от друга назначением, функциональными особенностями и техническими характеристиками, обладают схожими возможностями:

а) производят мониторинг метеорологических и экологических характеристик окружающей среды только в точках установки датчиков (системы, имеющие в своем составе мобильные станции, обладают несколько большей гибкостью за счет возможности оперативной смены точек измерения);

б) используют метеорологические приборы различных типов, позволяющие производить измерения стандартного набора средних значений метеорологических характеристик;

в) используют стандартные промышленно выпускаемые газоанализаторы, каждый из которых специализирован для измерения концентрации одного или нескольких загрязняющих атмосферу газов;

г) используют различные каналы передачи данных от измерительных постов в центр усвоения и обработки информации

д) имеют систему визуализации данных, в том числе и ВЕБ-ГИС систему.

Тем не менее, существующие на сегодняшний день системы контроля экологического и метеорологического состояния АПС не могут в полной мере удовлетворить требования хозяйствующих субъектов, вооруженных сил и специальных формирований страны к объему и качеству этого вида информации.

Основным недостатком существующих систем является их ограниченная функциональность, нацеленность на решение определенного круга задач и невозможность использования их для реализации новых алгоритмов, методов и технологий контроля АПС, таких как осуществление сверхкраткосрочного метеорологического прогноза, восстановление полей значений метеорологических характеристик на контролируемой территории и за ее пределами. Входящие в состав АИИС приборы экологического мониторинга (газоанализаторы) позволяют контролировать ограниченный список газов, а расширение этого списка ведет к необходимости введения в систему дополнительных датчиков, зачастую построенных на разных физических принципах, что затрудняет их интеграцию в единый измерительный комплекс, существенно увеличивает его стоимость и затрудняет обслуживание.

Другим существенным недостатком рассмотренных выше систем ЭММ является то, что даже в отечественных АИИС применяются, в основном, измерительные приборы и комплексы зарубежного производства (см. таблицы 1.1÷1.8). Это обстоятельство является существенным препятствием создания достаточно плотной измерительной сети (из-за высокой стоимости измерительных приборов и их обслуживания), а также ограничивает возможность использования существующих АИИС для обеспечения специальных задач метеорологического мониторинга (для контроля стратегических территорий и объектов военного и специального назначения).

Для обеспечения эффективного и безопасного функционирования объектов хозяйства и оборонного комплекса страны требуется создание новых методов, технологий и алгоритмов, позволяющих решать задачи контроля пространственных полей значений метеорологических параметров, их

горизонтальных и вертикальных профилей, а также более точного сверхкраткосрочного прогноза мезомасштабной метеорологической и экологической ситуации. Разработка и последующее функционирование этих технологий требует создания новых измерительно-вычислительных систем, обладающих более широкими информационными возможностями.

Одной из основных целей работы автора являлось создание измерительно-вычислительной системы для обеспечения экспериментальных натурных исследований новых алгоритмов, методов и технологий контроля АПС на основе новых инструментальных средств, обладающих необходимыми для этого функциональными возможностями.

Для реализации этой цели на основе проведенного выше анализа существующих систем подобного назначения определена концепция построения разрабатываемой системы и требования к ее функциональным возможностям, а именно:

а) архитектура построения ИВС должна включать в себя стационарные измерительные посты, мобильный измерительный комплекс и центр усвоения и обработки информации;

б) стационарные измерительные посты должны быть размещены на контролируемой территории на расстояниях, определяемых топографическими особенностями местности;

в) стационарные измерительные посты должны осуществлять непрерывный и синхронный контроль метеорологических характеристик приземной атмосферы и передавать эти данные в режиме реального времени в центр усвоения и обработки информации;

г) мобильный измерительный комплекс должен обеспечивать возможность оперативного измерения метеорологических характеристик на заранее не оборудованной метеорологическими постами местности и, тем самым, позволять оперативно изменять конфигурацию контролируемой территории, а также проводить контрольные измерения в ее произвольных точках;

д) мобильный измерительный комплекс должен быть оборудован

газоаналитической аппаратурой для анализа загрязнений атмосферного воздуха;

е) мобильный измерительный комплекс должен быть оснащен техническими средствами для измерения вертикальных профилей метеорологических характеристик АПС;

ж) мобильный измерительный комплекс должен осуществлять синхронные со стационарными постами измерения метеорологических и экологических характеристик АПС и передавать эти данные в режиме реального времени в центр усвоения и обработки информации;

з) входящие в состав стационарных постов и мобильного измерительного комплекса технические средства контроля метеорологических и экологических характеристик атмосферы должны обладать функциональными возможностями и метрологическими характеристиками, обеспечивающими реализацию новых методов, технологий и алгоритмов восстановления мезомасштабных полей значений метеопараметров АПС и сверхкраткосрочного временного прогноза их изменений;

и) ИВС должна быть оснащена программным обеспечением различного уровня, позволяющим осуществлять функционирование системы в автоматическом (автоматизированном) режиме.

Данная концепция построения ИВС легла в основу создания новой измерительно-вычислительной системы ЭО ИВС, описанной в главе 5 настоящей работы [42]. Практическая реализация ЭО ИВС осуществлялась на основе применения в ее составе новых специально разработанных отечественных измерительных приборов и программно-аппаратных комплексов, построенных с использованием новых технических решений. В п.1.2 главы 1 приведен краткий обзор существующих технических средств контроля метеорологических и экологических характеристик атмосферы и сделаны выводы о возможности их использования в разрабатываемой ЭО ИВС, определены типы измерительных приборов для ЭО ИВС, обоснованы направления разработки новых приборов.

1.5 Выводы по главе 1

1.5.1 Основные выводы из результатов работ, описание которых приведено в главе 1:

1) Проведен обзор наиболее известных на сегодня систем мезомасштабного ЭММ АПС, проанализированы их структура и состав, определены возможности и недостатки существующих систем для решения задач комплексного контроля и прогнозирования состояния АПС.

2) На основе проведенного анализа сформулирована концепция и определена архитектура автоматизированной измерительно-вычислительной системы (ИВС) для исследований новых алгоритмов, методов и технологий контроля АПС.

3) Проведен обзор технических средств, на основе которых реализованы существующие системы мезомасштабного ЭММ АПС, определены их достоинства и недостатки с точки зрения возможности использования в составе разрабатываемой ИВС.

4) Определены типы метеорологических и газоаналитических приборов и комплексов, на основе которых может быть сформирована новая ИВС, сформулированы основные требования к их функциональным возможностям.

1.5.2 Представленные в главе 1 результаты работ приведены в восьми авторских публикациях [30, 42, 46, 62, 63, 72, 74, 80].

1.5.3 Описанные в главе 1 результаты получили дальнейшее развитие в главах 2, 3, 4, 5 настоящей работы, где представлены результаты разработки новой автоматизированной системы ЭММ АПС и входящих в ее состав автоматических измерительных приборов и комплексов.

2 Оптические и акустические приборы и комплексы для измерений характеристик приземной атмосферы

2.1 Метод акустической термоанемометрии и его использование в задачах контроля АПС

2.1.1 Физические основы метода акустической термоанемометрии

Акустический метод измерения температуры и скорости газового (воздушного) потока – метод акустической термоанемометрии – основан на известной зависимости групповой скорости звука от температуры воздуха и скорости его движения (скорости ветра)

$$\mathbf{U} = c\mathbf{n} + \mathbf{v}, \quad (2.1)$$

где $\mathbf{U}$ – вектор групповой скорости звука, $\mathbf{n}$ – нормаль к фазовому фронту волны, $\mathbf{v}$ – вектор скорости ветра, c – скорость распространения звука в неподвижном воздухе) [81]. Температура воздуха T_K (в градусах Кельвина) связана со скоростью звука (в идеальном газе) известным соотношением [82]:

$$c = \sqrt{\frac{\chi R}{\mu} T_K}, \text{ м/с}, \quad (2.2)$$

где $\chi = c_p/c_v$ – соотношение теплоемкостей при постоянном давлении и постоянном объеме; R – универсальная газовая постоянная; μ – молекулярный вес газа. Для сухого воздуха при нормальных условиях $\chi = 1,402$, $\mu = 28,96$, $R = 8,315 \cdot 10^7$ эрг/град и, следовательно, вместо (2.2) можно использовать формулу

$$c = 20,067 \sqrt{T_K}, \text{ м/с}. \quad (2.3)$$

Если дополнительно учитывать зависимость c от отношения упругости водяного пара к атмосферному давлению e/p_a , получим:

$$c = 20,067 \sqrt{T_\epsilon}, \text{ м/с}, \quad (2.4)$$

где $T_\epsilon = T_K(1 + 0,3192 e/p_a)$ – виртуальная акустическая температура. Влияние e может быть учтено здесь из относительной влажности воздуха E через

соотношения $e = 6,107^{m-2} \cdot E$; $m = 7,665 T / (243,33 + T)$; T – температура воздуха в градусах Цельсия [83].

Практическая реализация ультразвукового метода основана на измерении времени t_i прохождения акустического импульса между парами электроакустических преобразователей (ЭАП), разнесенных на известные расстояния L вдоль выбранных направлений i (рис. 2.1).



Рисунок 2.1 - Принцип метода ультразвуковой термоанемометрии

Поскольку вектор скорости ветра $\mathbf{v}$ характеризуется значениями его трех ортогональных компонент v_x , v_y и v_z , то для алгоритмического выделения вкладов ветра и температуры в полученные значения U_i требуется иметь минимум 4 канала распространения ультразвука в воздухе, отличающихся по ориентации в пространстве. Конкретный вид алгоритмов определяется геометрической схемой пространственного расположения излучателей и приемников акустических сигналов.

Для отдельных компонент скорости ветра v_x (рис. 2.1), получим соотношения:

$$t_1 = L / (c + v_x) \quad (2.5)$$

$$t_2 = L / (c - v_x)$$

где c – скорость звука в воздухе, L – расстояние между излучателем и приемником. Из этих соотношений можно определить компоненту скорости ветра v_x и скорость звука c :

$$v_x = 0,5L(t_2 - t_1) / t_1 t_2 \quad (2.6)$$

$$c = 0,5L / (t_1 + t_2) / t_1 t_2$$

Располагая излучатели и приемники ультразвука по трем взаимно перпендикулярным направлениям, можно аналогично определить и другие компоненты скорости ветра v_y и v_z .

Температура воздуха T определяется из соотношения:

$$T = \{20,067(X_1 t_2 + X_2 t_1) / (2 t_1 t_2)\}^2. \quad (2.7)$$

Вследствие малой инерционности измерений (стандартные значения здесь составляют $10^{-1} \div 10^{-2}$ с) из данных измерений непосредственно вычисляются различные параметры температурной и ветровой турбулентности для АПС [84, 85]. Вычисления производятся по известным из теории атмосферной турбулентности формулам [86]. В частности, для определения структурных постоянных температурных флуктуаций C_T^2 , ветровых флуктуаций C_V^2 , флуктуаций акустического показателя преломления C_{na}^2 , флуктуаций оптического показателя преломления C_{no}^2 используются соотношения [87, 88]:

$$\begin{aligned} C_T^2 &= \langle [T'(t + \Delta t) - T'(t)]^2 \rangle (\langle V_m \rangle \Delta t)^{-2/3} \\ C_V^2 &= \langle [u'(t + \Delta t) - u'(t)]^2 \rangle (\langle V_m \rangle \Delta t)^{-2/3} \\ C_{na}^2 &= C_T^2 / (2 \langle T_k \rangle)^2 + C_V^2 / \langle c \rangle^2 \\ C_{no}^2 &= \{8 \cdot 10^{-5} \langle P \rangle / \langle T_k \rangle^2\}^2 C_T^2 \end{aligned} \quad (2.8)$$

где V_m – модуль среднего вектора скорости ветра; Δt – временной интервал между измерениями мгновенных метеовеличин; T_k – температура воздуха; c – скорость звука; P – атмосферное давление.

2.1.2 Технические аспекты реализации метода акустической термоанемометрии в задачах контроля метеорологических и турбулентных характеристик приземной атмосферы

2.1.2.1 Использование метода акустической термоанемометрии в задачах контроля метеорологических и турбулентных характеристик АПС имеет ряд существенных преимуществ по сравнению с традиционными методами измерений. К ним относятся:

- высокая чувствительность измерений метеопараметров (до 0,01 м/с по скорости ветра и до 0,01 градуса по температуре);
- малая инерционность измерений (до 80 мгновенных значений метеопараметров в секунду);
- отсутствие влияния радиационных помех от прямых солнечных лучей на измерение температуры воздуха;
- высокая эксплуатационная надежность измерительной системы вследствие отсутствия механических вращающихся элементов в датчике скорости ветра;
- малый вес и габариты измерительной системы;
- низкий уровень энергопотребления;
- полная автоматизация процесса измерения и обработки метеоданных, предоставление результатов измерения метеопараметров в удобном для интерпретации графическом виде в реальном масштабе времени.

Высокая частота измерения мгновенных значений скорости ветра и температуры позволяет проводить вычисления в реальном масштабе времени несколько десятков производных значений метеопараметров, характеризующих турбулентность атмосферы в точке измерения, другие динамические и статистические ее параметры.

Акустический метод измерения скорости и температуры реализуется посредством ультразвуковых термоанемометров, причем для осуществления функции измерения температуры необходимо использовать 3D-термоанемометры

(3D-УТА), обеспечивающие измерение трех ортогональных компонент скорости ветра [45].

Основными проблемами, которые нужно решить при технической реализации метода, являются:

- необходимость создания достаточно жесткой конструкции, удерживающей в пространстве ультразвуковые излучатели и приемники и не допускающей изменения расстояния между ними в процессе эксплуатации, при этом конструкция должна обладать высокой «ветровой прозрачностью» (минимально искажать проходящий сквозь нее ветровой поток);

- создание эффективных электроакустических преобразователей (излучателей и приемников ультразвуковых импульсов), способных долговременно функционировать в широком диапазоне температур (от минус 70 до плюс 50 °С), в условиях воздействия неблагоприятных погодных факторов (высокая влажность, дождь, снег, обледенение и пр.);

- разработка электронно-акустических устройств, позволяющих осуществлять измерения метеорологических характеристик с высокой частотой (до 80 – 160 Гц).

Выполнение перечисленных выше требований является нетривиальной конструкторской и технологической задачей, так как ряд факторов носят взаимоисключающий характер (например, требования «ветровой прозрачности» и механической прочности конструкции и др.).

Для решения этой задачи автором предложены и исследованы несколько вариантов конструкций 3D-термоанемометра, использующих бистатистическую акустическую схему [89] (рис. 2.2).

За счет использования дополнительной пары «излучатель – приемник» реализация этой схемы не требует периодического переключения ЭАП из режима «излучение» в режим «прием», при этом четыре преобразователя работают только на периодическое излучение акустических импульсов, а четыре других выполняют функции приемников.

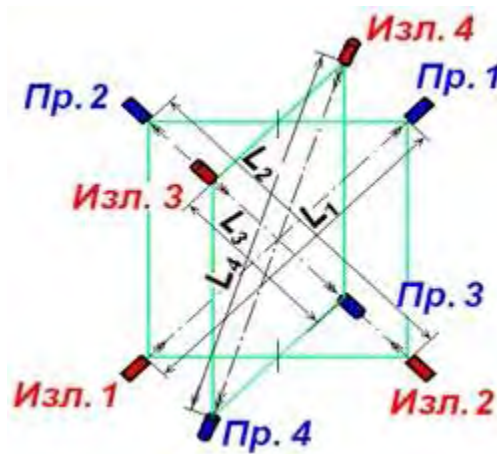


Рисунок 2.2 - Акустическая схема ультразвукового термоанемометра

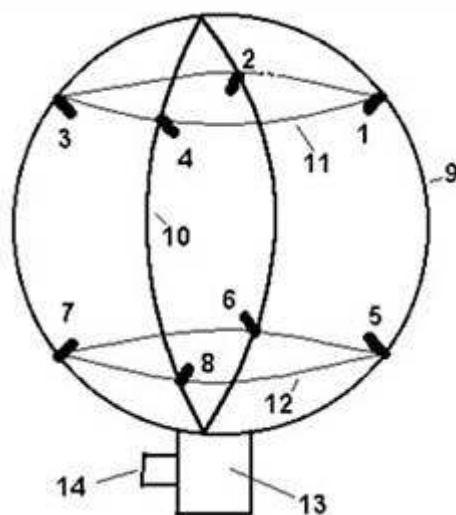
Применение схемы с отдельными излучателями и приемниками ультразвуковых импульсов позволяет исключить влияние переходных процессов, происходящих в ЭАП-излучателе после ударного возбуждения его электрическим импульсом и сократить время готовности электроакустического ЭАП-приемника к приему акустического сигнала (экспериментально установлено, что длительность реверберационных колебаний в разработанном для 3D-УТА ЭАП-излучателе, составляет 200-300 мкс при длительности фронта первого импульса, по которому ведется отсечка времени пролета сигнала измерительной зоны термоанемометра, 2-4 мкс [90]. Таким образом, достигается высокая частота посылки ультразвуковых импульсов (до 80 – 160 Гц), что увеличивает надежность работы прибора и расширяет его возможности по измерению турбулентных характеристик атмосферы.

Система уравнений для вычисления значений компонент скорости ветра u_x , u_y , u_z и скорости звука c для такой конфигурации измерительной головки ультразвукового термоанемометра имеет вид (в скобках указаны номера соответствующего излучающего и принимающего ЭАП, см. рис. 2.3):

$$\begin{aligned}
 L_1/t_1 &= c + u_z \cos \alpha + u_x \sin \alpha & (7-1 - \text{для канала №1}); \\
 L_2/t_2 &= c + u_z \cos \alpha - u_x \sin \alpha & (5-3 - \text{для канала №2}); \\
 L_3/t_3 &= c - u_z \cos \alpha + u_y \sin \alpha & (4-6 - \text{для канала №3}); \\
 L_4/t_4 &= c - u_z \cos \alpha - u_y \sin \alpha & (2-8 - \text{для канала №4}).
 \end{aligned}
 \tag{2.9}$$

где L_i ($i=1, 2, 3, 4$) – расстояния между соответствующими парами излучателей и приемников, α – угол между акустическими осями пар ЭАП и горизонтальной (вертикальной) плоскостью (в данной конструкции $\alpha = 45^\circ$ для всех пар ЭАП) [91].

2.1.2.2 Основу конструкции 3D-УТА ДСВ-15 образуют два стальных кольца, расположенных во взаимно ортогональных плоскостях и имеющих две точки пересечения (рис. 2.3). Четыре пары электроакустических преобразователей (каждая пара представляет собой акустически согласованные излучатель и приемник ультразвуковых импульсов) располагаются на кольцах в точках пересечения их с кубом, вписанным в образованную кольцами сферу. Акустические оси всех пар электроакустических преобразователей проходят через центр этой сферы, при этом измерительный объем ограничивается ее поверхностью. Основанием колец служит стальной цилиндрический корпус, в котором расположены электронные блоки термоанемометра [91].



а



б

Рисунок 2.3 - Термоанемометр ДСВ-15: а – схема: 1, 3, 6, 8 – акустические излучатели; 2, 4, 5, 7 – акустические приемники, 9, 10, 11, 12 – элементы несущей арматуры, 13 – электронный блок, 14 – соединительный разъем;

б – внешний вид

Расположение электроакустических преобразователей в пространстве указанным образом обеспечивает возможность измерения трех компонент вектора скорости ветра и величины скорости звука в воздухе, при этом сферическая конструкция несущей арматуры (отсутствие несущих элементов консольного типа) обеспечивает высокую механическую прочность при относительно высокой «ветровой прозрачности» в пределах угла атаки ветра $\pm 45^\circ$ относительно горизонтальной плоскости. Такое решение является оптимальным, так как в реальной атмосфере в абсолютном большинстве метеоситуаций величина горизонтальной составляющей вектора скорости ветра существенно превосходит величину его вертикальной составляющей, и основные ветровые потоки ограничены этим углом атаки. Сравнительный анализ 3D-УТА конструкций зарубежных аналогов [45] показывает, что конструкция термоанемометра ДСВ-15, обладает весьма высокой жесткостью к большим ветровым нагрузкам (более 20 м/с).

Последующие требования по увеличению жесткости конструкции 3D-УТА и уменьшению ее размеров, возникшие при создании УАМС специального назначения, потребовали создания модернизированной конструкции. Она отличается наличием дополнительных силовых элементов в виде двух «широтных» колец, симметрично расположенных относительно «экваториальной» плоскости конструкции, и переносом точек крепления ЭАП на эти «широтные» кольца в центр образованных ими дуг окружности (рис. 2.4) [3]. Новая конструкция отличается повышенной жесткостью (в частности, допускает падение с высоты 1 метр на бетонную поверхность).

2.1.2.3 Критическим элементом ультразвукового термоанемометра, определяющим его технические и эксплуатационные характеристики, является ЭАП, осуществляющий излучение и прием акустических импульсов [92, 93]. ЭАП должен отвечать следующим основным требованиям:

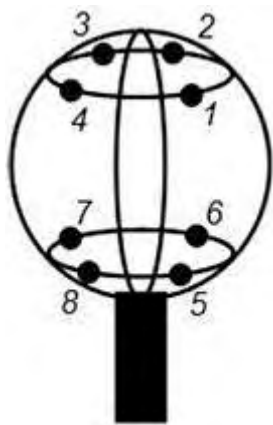


Рисунок 2.4 - Модернизированная конструкция 3D-УТА УТАМ-75:

а – геометрическая схема: 1, 3, 6, 8 – излучатели ультразвуковых импульсов; 2, 4, 5, 7 – приемники ультразвуковых импульсов; *б* – внешний вид

- для обеспечения необходимой погрешности и чувствительности измерений ЭАП должен обеспечивать генерацию короткого акустического импульса с высокой крутизной переднего фронта;
- для обеспечения необходимого измерительного объема ЭАП должен обеспечивать амплитуду генерируемого акустического импульса, достаточную для уверенной его регистрации при измерительной базе $10 \div 20$ см;
- для обеспечения требуемой инерционности ЭАП-излучатель и ЭАП-приемник должны иметь высокие коэффициенты затухания реверберационных колебаний акустических сигналов;
- ширина диаграммы направленности ЭАП-излучателя должна быть достаточной для предотвращения эффекта сноса сигнала с апертуры ЭАП-приемника ветровым потоком, вектор которого перпендикулярен направлению распространения акустического импульса;
- ЭАП должен сохранять работоспособность в температурном диапазоне от -50 °С до $+50$ °С (а в специальных случаях до -70 °С) при скоростях ветра $40 \div 60$ м/с в условиях воздействия влажности до 100 %, конденсированных осадков в виде

дождя или снега, быть устойчивым к обледенению, выдерживать механические нагрузки, характерные для режима его эксплуатации;

- ЭАП должен иметь минимальные геометрические размеры для уменьшения влияния на измеряемый ветровой поток.

На рисунке 2.5 приведена структурная схема ЭАП. Он состоит из трех основных элементов – пьезокерамической пластины 3, выполняющей функцию преобразователя электрических импульсов в акустические (излучатель) или наоборот (приемник), протектора 5, согласовывающего волновые характеристики пьезокерамики и воздуха, а также демпфера 2, предназначенного для гашения реверберационных колебаний, возникающих после окончания действия возбуждающего колебания импульса и уширения резонансной кривой ЭАП. Качество зондирующего сигнала и сигнала приемника определяется частотными и спектральными характеристиками электроакустического тракта ЭАП, представляющего собой совокупность механических узлов и сред, резко отличающихся по акустическим свойствам. Границы раздела являются генераторами акустических помех со значительными амплитудами.

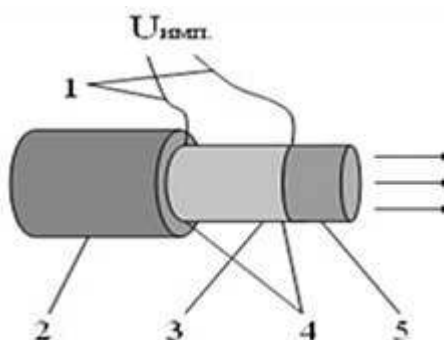


Рисунок 2.5- Электроакустический преобразователь: 1 – выводы электродов, 2 – демпфер, 3 – пьезоэлемент, 4 – электроды, 5 – протектор

Эффективность передачи и приема акустических импульсов обеспечивается за счет выбора оптимальных частот ультразвуковых колебаний, согласования пьезоэлемента с контролируемой средой, гашением реверберационных колебаний [94].

Автором решалась задача создания ЭАП, способного эффективно функционировать в составе УАМС (до настоящего времени такие пьезоакустические преобразователи в России не производились, и в отечественных разработках УТА использовались ЭАП зарубежного производства) [95].

При создании ЭАП решалась задача оптимизации режимов работы и свойств материалов пьезоэлемента, протектора и демпфера. Также определялись конструкция и материалы, обеспечивающие надежную фиксацию ЭАП в посадочном гнезде поддерживающей арматуры и не шунтирующие при этом акустический сигнал.

Активным элементом ЭАП, преобразовывающим электрические импульсы в механические колебания и обратно, является пьезоэлемент. Наиболее распространенным пьезоэлементом, используемым для излучения и приема ультразвуковых колебаний, является пьезокерамика различных типов. В табл. 2.1 приведены параметры пьезокерамики ЦТС-19, на основе которой разрабатывался ЭАП для генерации акустических колебаний частотой $80 \div 160$ кГц (производителем пьезокерамических элементов является ООО «АВРОРА-ЭЛМА», Россия).

Таблица 2.1- Пьезокерамический элемент ЭАП

Материал	Плотность, ρ , кг/м ³	Скорость звука, V , м/с	Импеданс, Z , кг/м ² с	Геометрические размеры, $\varnothing \times h$, мм
Пьезокерамика ЦТС-19	$7,60 \cdot 10^3$	$2,95 \cdot 10^3$	$22,4 \cdot 10^6$	12×10

Для согласования пьезоэлемента с акустической нагрузкой используется протектор – промежуточный слой, который находится между пьезоэлементом и контролируемой средой. Протектор непосредственно контактирует с внешней средой (атмосферным воздухом) и служит также для защиты пьезоэлемента от воздействия агрессивных факторов атмосферы. Протектор должен удовлетворять следующим требованиям:

- величина импеданса $Z_N = \sqrt{Z_1 Z_2}$, где Z_N , Z_1 , Z_2 – акустические импедансы протектора, пьезопластины и воздуха соответственно;
- стойкость к атмосферным осадкам, повышенной влажности, солнечной радиации, широкий интервал температур (от плюс 55 до минус 70 °C);
- механическая прочность и возможность обработки материала.

Таким требованиям удовлетворяют легковесные композиционные материалы с полым сферическим наполнителем (производство ЗАО «НПП «Аквасинт» им. академика В.А.Телегина» (Россия)), параметры которых приведены в табл. 2.2.

Таблица 2.2 - Протектор ЭАП

Материал	Плотность, ρ , кг/м ³	Скорость звука, V, м/с	Импеданс, Z, кг/м ² с	Геометрические размеры, Ø×h, мм
ЭДС-450TE	440÷480	2300	$1,1 \cdot 10^6$	12×5
ЭДС-7АП	480÷520	2 600	$1,3 \cdot 10^6$	12×5

Для устранения реверберационных колебаний в ЭАП, уменьшения его собственных шумов и получения коротких ультразвуковых импульсов, близких по форме к видеоимпульсам, применяют демпфирование ЭАП. Для этого пьезоэлемент приклеивают к массивному телу – демпферу, который изготавливают из материала, обладающего акустическим импедансом близким по значению к импедансу пьезоэлемента, а также большим коэффициентом затухания ультразвуковых волн на рабочей частоте. Жесткая связь пьезоэлемента с демпфером приводит к тому, что после окончания действия возбуждающего электрического (в излучателе) или принимаемого ультразвукового (в приемнике) импульса свободные колебания пьезоэлемента быстро затухают, причем тем быстрее, чем меньше разница между акустическими импедансами демпфера и пьезопластины. Большой коэффициент затухания обеспечивает отсутствие сигналов, отраженных от противоположной поверхности демпфера, то есть уменьшает уровень собственных шумов преобразователя (главной причиной этих шумов является длительная реверберация ультразвуковых колебаний в демпфере

из-за недостаточно высокого коэффициента затухания ультразвука в материале демпфера или малых размеров последнего по отношению к длине волны).

Предел уменьшения длительности ультразвуковых импульсов, излучаемых полуволновыми пьезоэлементами с механическими демпферами теоретически составляет один период колебаний собственной частоты пьезопластины. Этот предел достигается в случае равенства импедансов демпфера и пьезопластины.

Импедансом, близким к импедансу пьезопластины, обладает ряд металлов и сплавов. Но использование металлов в качестве демпферов ограничено малым коэффициентом затухания ультразвука, который не могут компенсировать даже специальными рассеивателями, установленными на противоположенной стороне демпфера. Кроме того, сильное различие температурных коэффициентов расширения металла и пьезокерамики ограничивает температурный диапазон работоспособности преобразователя [96, 97, 98].

В разработанном ЭАП в качестве материала для демпфера использована эпоксидная смола ЭД-20, смешанная с наполнителем из мелкодисперсного порошка вольфрама (табл. 2.3). Применение такого материала технологично и позволяет в широких пределах варьировать его акустический импеданс путем изменения весового соотношения смолы и вольфрамового порошка.

Таблица 2.3 - Демпфер ЭАП

Материал	Плотность, ρ , кг/м ³	Скорость звука, V , м/с	Импеданс , Z (кг/м ² с)	K , дБ	Геометрические размеры, $\varnothing \times h$, мм
Смесь смолы с порошком вольфрама	$10,3 \cdot 10^3$	2450	$27,4 \cdot 10^6$	50÷60	12×30

K – коэффициент затухания акустических сигналов,

На рис. 2.6 приведены конструкция и внешний вид разработанного ЭАП.

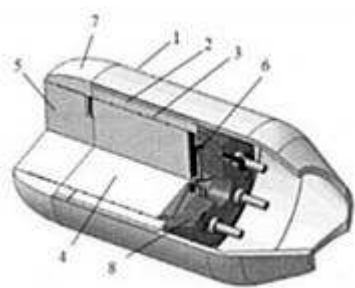
*а**б*

Рисунок 2.6 - Электроакустический преобразователь: *а* – конструкция: 1 – корпус, 2 – акустический изолятор, 3 – нагревательный элемент системы принудительного подогрева ЭАП (см. п. 2.1.3, рис. 2.45), 4 – пьезоэлемент (ЦТС-19), 5 – протектор (ЭДС-450ТЕ), 6 – демпфер (ЭД-20 + W), 7 – герметик, 8 – контактная плата; *б* – внешний вид

2.1.2.4 Функционирование 3D-УТА обеспечивает электронная схема, приведенная на рис. 2.7 [99].

Работа согласованных пар ЭАП-излучатель – ЭАП-приемник организована последовательно по циклической схеме. Частота одного цикла (последовательного срабатывания всех 4-х пар ЭАПов) составляет от 10 Гц до 80 Гц (устанавливается программным способом при настройке 3D-УТА).

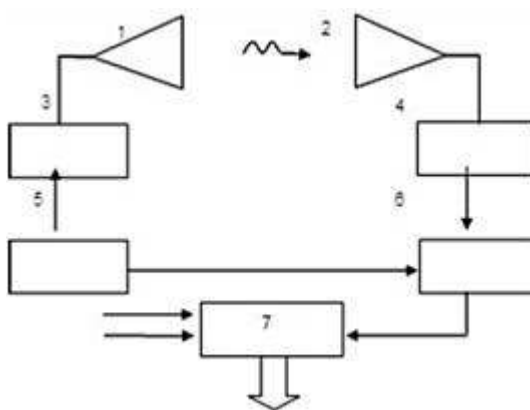


Рисунок 2.7 - Блок-схема одного канала акустического термоанемометра: 1 – излучатель акустических импульсов, 2 – приемник акустических импульсов, 3 – формирователь импульсов, 4 – усилитель-ограничитель, 5 – задающий генератор, 6 – измеритель временных интервалов, 7 – интерфейс

Излучатель акустического импульса 1 возбуждается электрическим импульсом, поступающим из формирователя 3. После прохождения измерительного объема акустический импульс регистрируется приемником 2, электрический сигнал с которого формируется усилителем-ограничителем 4 и поступает на измеритель временных интервалов 6. Тактовый генератор 5 запускает блок питания 3 и подает тактовые импульсы с частотой 32 МГц на измеритель временных интервалов 6, где происходит счет числа тактовых импульсов с момента запуска излучателя 1 до прихода ультразвукового импульса на приемник 2. Интерфейс 7 преобразует параллельный код в последовательный и организует опрос измерителя временных интервалов 6. Информация в последовательном коде передается на блок вычисления метеопараметров (ПК или специализированный процессор).

Для более точного определения времени прихода акустического импульса на ЭАП-приемник, необходимо иметь достаточно хорошее отношение сигнал/шум на его входе. Амплитуда поступающего на ЭАП-приемник акустического сигнала зависит от многих факторов: мощности генерируемого ЭАП-излучателем сигнала, расстоянием между ЭАП-излучателем и ЭАП-приемником, состоянием воздушной среды в акустическом канале (скорость ветра, турбулентность, температура и пр.). Существенное влияние на величину сигнала, генерируемого ЭАП-излучателем и поступающего, в конечном счете, на ЭАП-приемник оказывает амплитуда возбуждающего ЭАП-излучатель электрического импульса (причем, этот параметр можно изменять в достаточно широких пределах). На рис. 2.8 приведены результаты измерений, иллюстрирующие влияние амплитуды возбуждающего электрического импульса на отношение сигнал/шум при скорости ветра 50 м/с. На рис. 2.9 приведена экспериментально полученная зависимость величины сигнала на ЭАП-приемнике от величины возбуждающего ЭАП-излучатель электрического импульса, на основании которой выбиралось оптимальное значение его амплитуды.

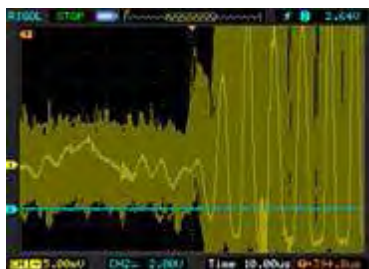


Рисунок 2.8 - Сигнал на ЭАП-приемнике при различных значениях амплитуды возбуждающего ЭАП-излучатель электрического импульса (скорость ветра 50 м/с)

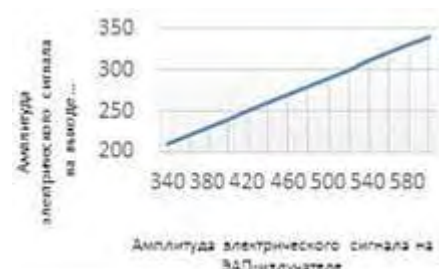
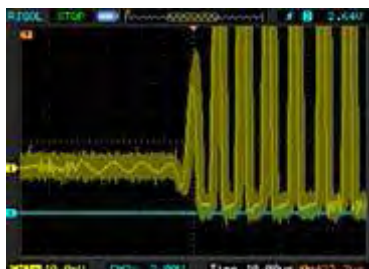


Рисунок 2.9 - Зависимость амплитуды сигнала на ЭАП-приемнике от величины возбуждающего электрического импульса

Разработанный с использованием выше приведенных технических решений 3D-УТА обладает техническими характеристиками, позволяющими эффективно использовать термоанемометр в составе автоматических метеорологических станций для контроля метеорологических и турбулентных характеристик АПС [100] (табл. 2.4).

Таблица 2.4 - Основные технические характеристики 3D-УТА

Метеорологическая величина	Контролируемый параметр	Значение
Скорость ветра (горизонтальная составляющая)	чувствительность	0,01 м/с
	инерционность	до $6,25 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$
	диапазон измерений	от 0 до 50 м/с
Скорость ветра (вертикальная составляющая)	чувствительность	0,01 м/с
	инерционность	до $6,25 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$
	диапазон измерений	от минус 15 до плюс 15 м/с
Температура воздуха	чувствительность	0,01°C
	инерционность	до $6,25 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$
	диапазон измерений	от минус 40 до плюс 55°C

2.1.3 Программное обеспечение УАМС

2.1.3.1 Разрабатываемые УАМС представляют собой программно-аппаратные комплексы, функциональные возможности которых определяются их программным обеспечением. В УАМС АМК-03 (см. п. 2.3.2 настоящей работы) могут использоваться два специально разработанных пакета программного обеспечения АМК-СОФТ-4 [101] и МЕТЕО 3.0 [102].

Программа АМК-СОФТ-4 является составной частью программно-аппаратного комплекса УАМС АМК-03, и обеспечивает измерения в реальном времени следующих метеопараметров:

- горизонтальная и вертикальная скорость ветра
- азимутальное направление ветра
- температура и влажность воздуха
- атмосферное давление.

Кроме того, программно-аппаратный комплекс позволяет проводить оценку скорости звука в воздухе. Измерения проводятся не реже 10 раз в секунду. Результаты измерений передаются в объединяющий коммутатор, обеспечивающий возможность подключения до 4-х измерителей. Объединяющий коммутатор передает измеренные данные со всех подключенных измерителей в персональный компьютер (ПЭВМ) через последовательный порт (соединение стандарта RS-232). Программа АМК-СОФТ-4 принимает пакеты первичных данных со всех измерителей, обрабатывает их, рассчитывая мгновенные значения метеопараметров, выполняет усреднение результатов расчета за требуемый временной интервал, осуществляет визуализацию результатов на экране персонального компьютера.

Схема, поясняющая алгоритм работы программы АМК-СОФТ-4, приведена на рисунке 2.10.

Интерфейс пользователя программы АМК-СОФТ-4 состоит из двух частей (рис. 2.11).

Панель (1) служит для отображения и изменения основных настроек программы. Эта часть доступна пользователю всегда при выполнении программы.

Панель (2) представляет собой набор из трех закладок «Результаты измерений», «Графическое представление», «Показания датчиков», обеспечивающих возможность выбора режима визуализации результатов измерений. Выбор той или иной закладки осуществляется пользователем. (Основной закладкой в программе АМК-СОФТ-4 считается закладка «Результаты измерений»).

Одной из функций элемента 1 является отображение состояния измерителей, подключенных к коммутатору. После запуска программы все четыре индикатора, объединенных в группу «Изделие №_» являются недоступными. Это обозначает, что программа не имеет информации о подключенных измерителях.

После запуска измерений (команда «Начать измерения» (6)) индикаторы, соответствующие активным (передающим данные) измерителям становятся доступными. Центральная часть такого индикатора меняет цвет с серого на белый.

Индикатор, имеющий младший номер из доступных, отмечается как выбранный. Это состояние индикатора отображается черной точкой в его центре. Результаты измерений метеопараметров выбранным индикатором выводятся на основной закладке «Результаты измерений».

Пользователь может менять номер выбранного измерителя, активируя доступный индикатор группы «Изделие №_». Недоступные (серые) индикаторы этой группы соответствуют каналам коммутатора, к которым не подключены измерители.

В верхней части окна программы АМК-СОФТ-4 расположены шесть элементов управления, служащих для отображения и изменения основных параметров программы (рис. 2.12).

Программа АМК-СОФТ-4 выполняет усреднение вычисляемых 10 раз в секунду метеопараметров по заданному скользящему временному интервалу. Время усреднения задается оператором с помощью элемента «Время усреднения» (2). После запуска программы время усреднения по умолчанию устанавливается равным 1 мин.

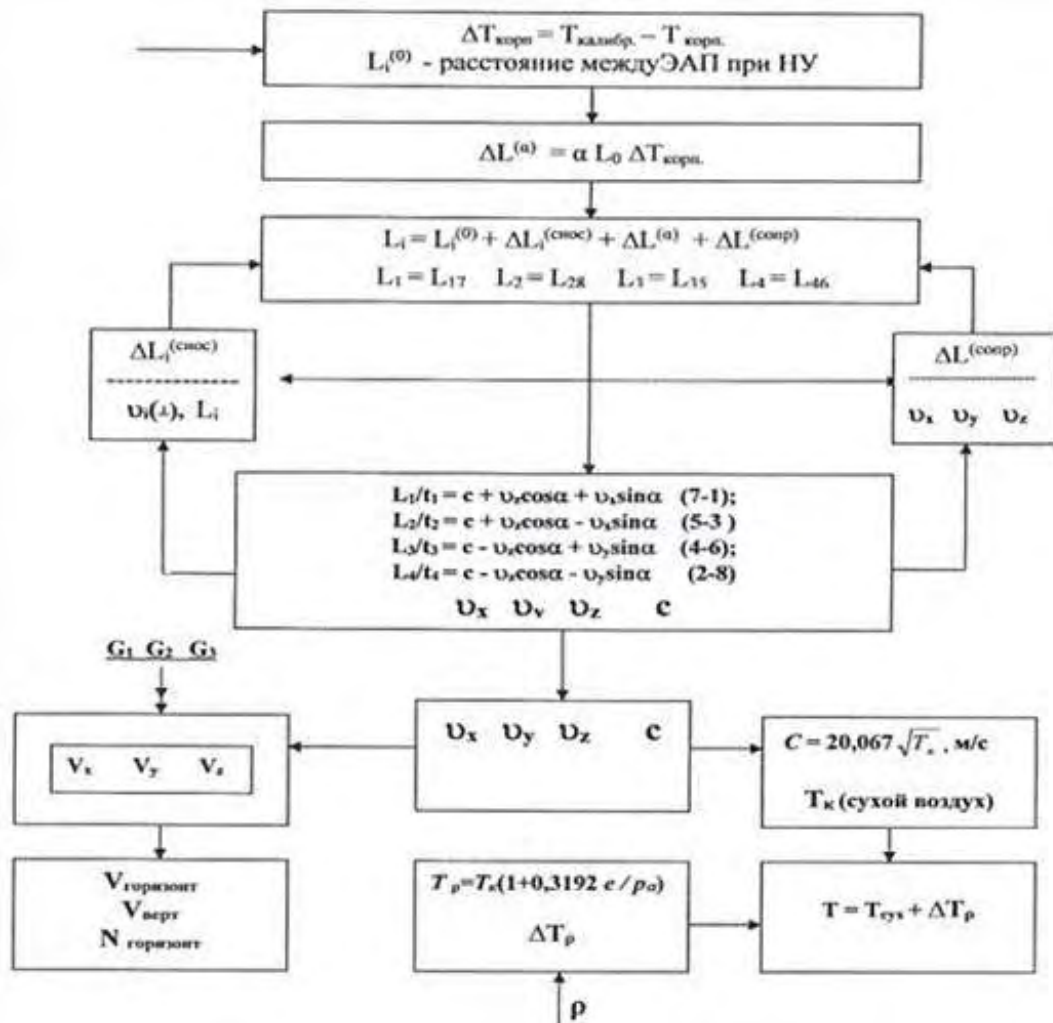


Рисунок 2.10 - Алгоритм работы компьютерной программы АМК-СОФТ-4

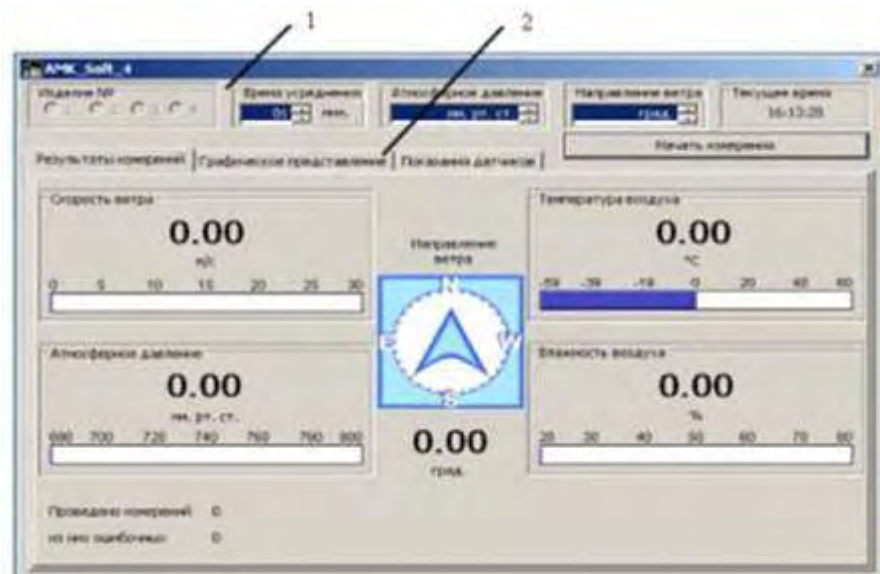


Рисунок 2.11 - Общий вид интерфейса пользователя программы АМК-СОФТ-4: (1) – панель основных параметров; (2) – закладки панелей визуализации результатов измерений



Рисунок 2.12 - Интерфейс пользователя программы АМК-СОФТ-4:
элементы управления параметрами

Время усреднения в программе может принимать дискретные значения в диапазоне от 1 мин до 10 мин с шагом 1 мин.

Следующие два элемента управления (3 и 4) предназначены для выбора единиц измерения и направления ветра.

Элемент «Атмосферное давление» позволяет установить в качестве единиц измерения атмосферного давления «мм. рт. ст.» или «кПа». (по умолчанию в программе устанавливается «мм. рт. ст.»).

Элемент «Направление ветра» предоставляет выбор между «град.» и «дел. угломера» (по умолчанию устанавливается «град.»).

Элемент «Текущее время» (помечен цифрой 5) служит для отображения значения текущего времени. Формат отображения – ЧЧ:ММ:СС, где ЧЧ – часы, ММ – минуты, СС – секунды.

Команда «Начать измерения» (6) служит для запуска и остановки процесса измерения и расчета метеопараметров - запускаются процедуры установления связи с коммутатором, процедуры определения количества подключенных к коммутатору измерителей и процедуры запроса и получения калибровочных параметров измерителей. На время выполнения этих процедур останавливается индикация текущего времени в элементе

Если программе АМК-СОФТ-4 не удастся установить связь с коммутатором, или к коммутатору не подключен ни один измеритель, то программа выдает на экран информационное сообщение об ошибке.

Закладка «Результаты измерений» служит для отображения результатов расчета усредненных значений метеопараметров, графического отображения мгновенных флуктуаций измеряемых величин, индикации количества проведенных измерений и количества сбоев в работе метеокомплекса, произошедших с момента запуска программы АМК-СОФТ-4. Закладка содержит четыре однотипных элемента для отображения текущих значений скорости ветра, температуры воздуха, атмосферного давления и относительной влажности воздуха (1, 2, 3 и 4). (рис. 2.13).

Числовое значение в центре каждого из элементов отображает результат расчета среднего значения метеопараметра. Ниже выводится единица измерения. Нижнюю часть каждого из элементов занимает графический индикатор, показывающий мгновенные флуктуации метеопараметра. В нижней части элемента «Направление ветра» (5) выводится среднее значение азимутального угла направления ветра (относительно направления на Север) и единицы его измерения. Верхняя часть элемента «Направление ветра» графически представляет информацию о мгновенных флуктуациях направления ветра. Чувствительность графического индикатора составляет 5 градусов.

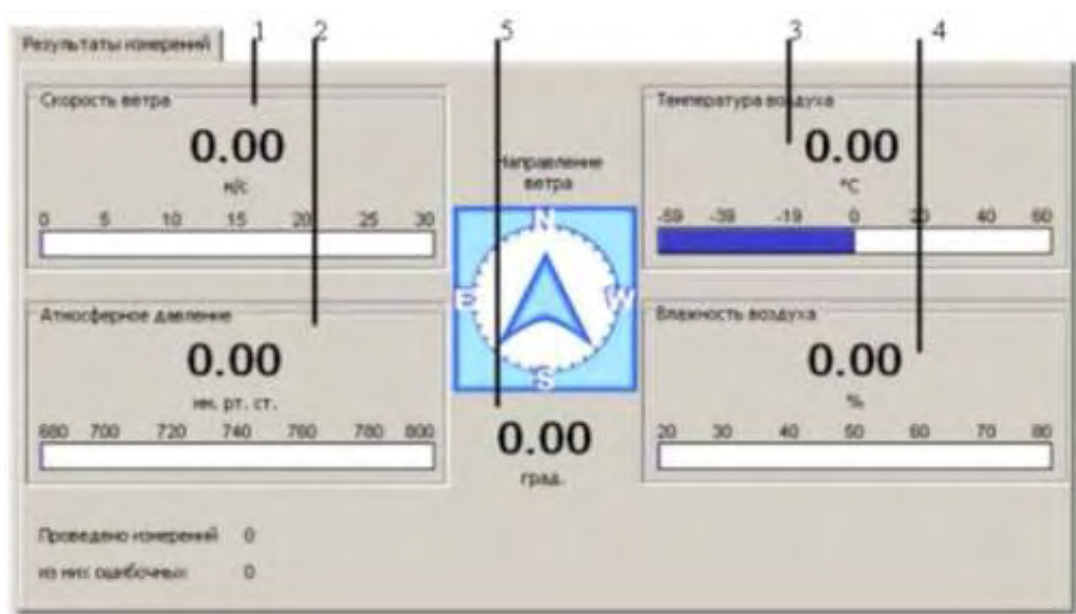


Рисунок 2.13 - Интерфейс пользователя программы АМК-СОФТ-4: элементы закладки «Результаты измерений»

Все элементы закладки «Результаты измерений» выводят значения метеопараметров, измеряемых выбранным пользователем измерителем. В нижней части закладки «Результаты измерений» выводятся количество проведенных замеров с момента запуска программы АМК-СОФТ-4 и количество аппаратных сбоев (эти измерения названы ошибочными), обусловленных неверными показаниями какого-либо датчика измерителя или прерыванием связи между ПЭВМ и измерителями.

Закладка «Графическое представление» программы АМК-СОФТ-4 служит для графического отображения временной развертки значений температуры воздуха, направления ветра, горизонтальной и вертикальной скоростей ветра, измеряемых всеми подключенными измерителями (рис. 2.14).

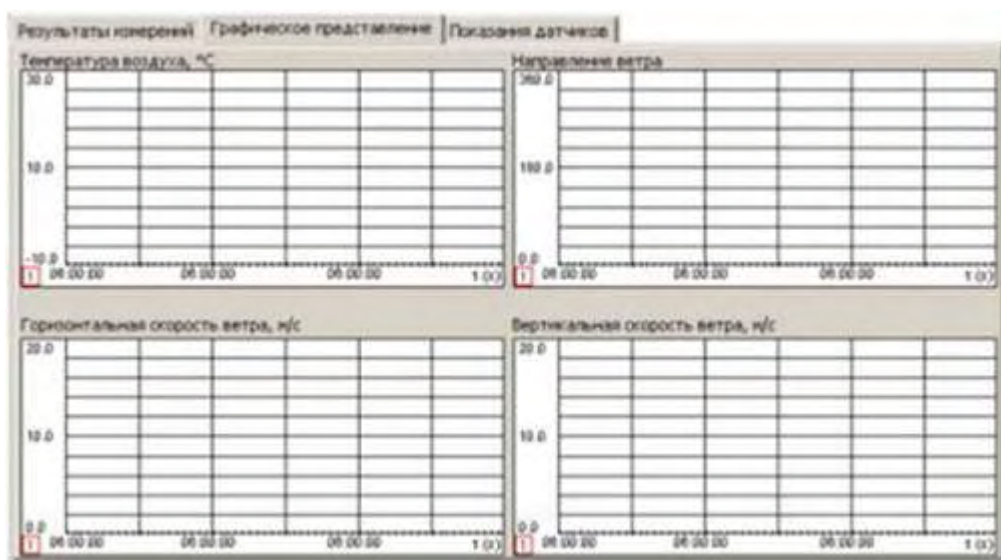


Рисунок 2.14- Интерфейс пользователя программы АМК-СОФТ-4: элементы закладки «Графическое представление»

Диапазон временной развертки составляет 1 мин. По горизонтальной оси каждого элемента отложены временные метки с шагом в 1 сек. Подписи под временной осью соответствуют текущему времени проведения измерений. Динамический диапазон каждого элемента меняется в процессе измерений и соответствует разбросу измеряемой величины. Графики значений, полученных с каждого подключенного измерителя отображаются своим цветом. В левом

нижнем углу каждого элемента выводится цифра, соответствующая номеру выбранного измерителя. Цвет цифры соответствует цвету кривой на графике для данного измерителя. Текущий момент времени на каждом из графиков представляется движущейся белой линией.

На закладке «Показания датчиков» программы АМК-СОФТ-4 расположены два элемента, служащие для табличного вывода дополнительной информации об измеряемых подключенными измерителями величинах (рис. 2.15).

Данные, выводимые в элементе Контроль УТА, позволяет проводить предварительную диагностику состояния подключенных измерителей. В первые 4 строки таблицы, называемые X1, X2, X3, X4, выводятся первичные данные, измеряемые ультразвуковыми датчиками. Эти величины соответствуют времени распространения ультразвукового сигнала в каждом из четырех ультразвуковых каналов каждого измерителя. Эти времена измеряются в периодах частоты тактового генератора (частота тактового генератора является одним из калибровочных параметров измерителя и, как правило, составляет 32 МГц). Каждый столбец таблицы соответствует одному из подключенных измерителей.

Результаты измерений					Графическое представление					Показания датчиков				
Контроль УТА					Датчики									
	И1	И2	И3	И4		И1	И2	И3	И4		И1	И2	И3	И4
X1						Р								
X2						Я								
X3						С								
X4						Тх								
E1 (%)						G1								
E2 (%)						G2								
E3 (%)						G3								

Рисунок 2.15 - Интерфейс пользователя программы АМК-СОФТ-4

В три нижние строки таблицы выводится информация о сбоях при измерении метеопараметров. В строку E1 выводится количество сбоев в ультразвуковых трактах измерителей, измеряемое в процентах к общему числу

измерений. Сбои в ультразвуковых трактах могут быть обусловлены как неисправностью датчиков или электрических цепей измерителя, так и ударными воздействиями на измеритель. В строку E2 выводится количество сбоев датчика давления, измеряемое в процентах к общему числу измерений. В строку E3 выводится количество сбоев датчика влажности, измеряемое в процентах к общему числу измерений.

Второй элемент «Датчики» служит для вывода ряда дополнительных метеопараметров, рассчитываемых в программе АМК-СОФТ-4 по результатам измерений. Каждый столбец таблицы соответствует одному измерителю. Ячейки каждой строки содержат следующую информацию:

P – мгновенные значения атмосферного давления в мм рт. ст.;

R – мгновенные значения относительной влажности воздуха в %;

C – мгновенные значения скорости звука в воздухе в м/с;

Tk – мгновенные значения температуры корпуса датчика влажности в град. Цельсия;

G1 – мгновенные значения угла отклонения направления «Юг-Север» измерителя (горизонтальная ось измерителя, проходящая через дугу с отметкой «Север») от плоскости горизонта в градусах;

G2 – мгновенные значения угла отклонения направления «Запад-Восток» измерителя (горизонтальная ось измерителя, проходящая через дугу без отметки «Север») от плоскости горизонта в градусах;

G3 – мгновенные значения угла отклонения вертикальной оси измерителя от нормали к плоскости горизонта в градусах.

2.1.3.2 Компьютерная программа МЕТЕО 3.0 [102], применяемая в ряде модификаций АМК-03, обеспечивает управление работой УАМС и выполняет в режиме реального времени следующие функции (рис. 2.16):

- вычисление мгновенных значений компонент вектора скорости ветра относительно сферической системы координат, связанной с конструкцией 3D-УТА, и пересчет их в истинные значения горизонтальной и вертикальной

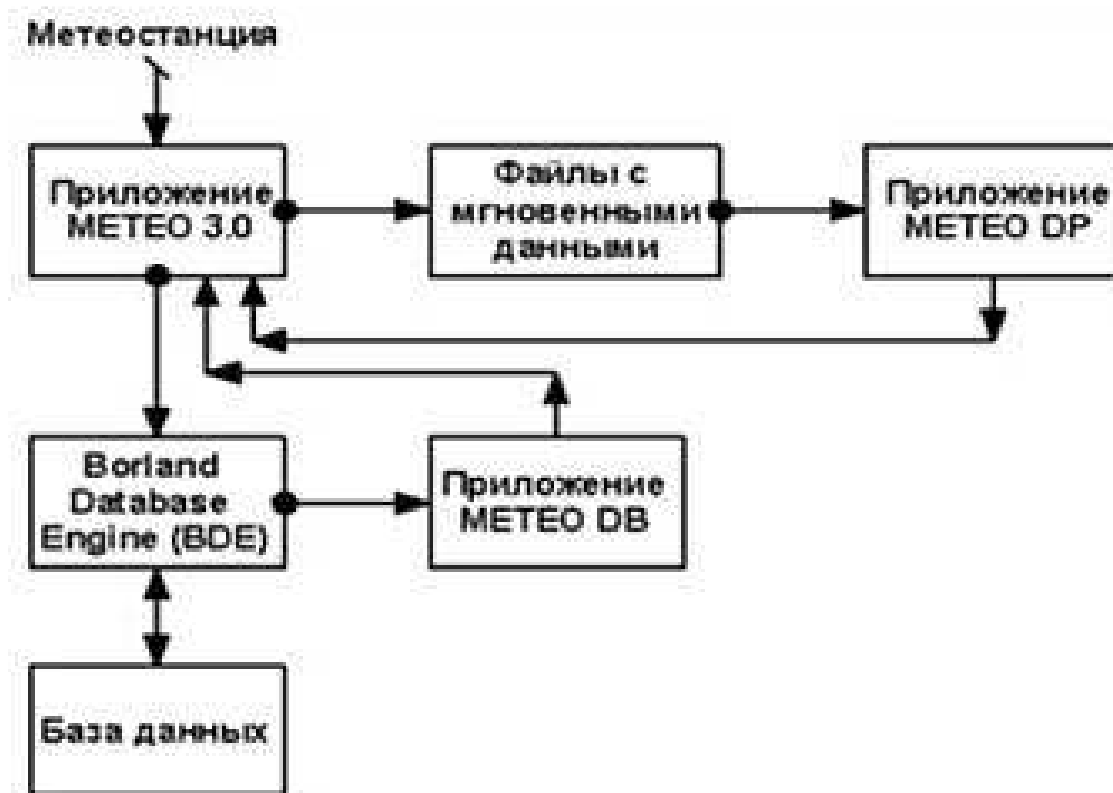


Рисунок 2.16 - Структура компьютерной программы «METEO 3.0» с приложениями «METEO DB» (база данных) и «METEO DP» (анализ данных)

составляющей скорости ветра и его направления с учетом ориентации конструкции 3D-УТА по углу места и азимуту;

- вычисление мгновенных значений температуры воздуха из измеренной скорости звука с учетом данных о влажности воздуха и атмосферном давлении;
- вычисление средних значений метеорологических параметров с задаваемым оператором временем усреднения;
- поддержка системы автоматического и непрерывного тестирования и диагностики технического состояния составных частей изделия и устройства в целом с выдачей соответствующей информации оператору;
- фильтрация ложных значений измеренных метеопараметров, возникающих за счет различного рода ошибок и сбоев измерительной системы;
- вычисление стандартных статистических характеристик метеорологических полей (среднеквадратические отклонения, коэффициенты асимметрии, эксцесса, корреляции и др.);

- вычисление турбулентных характеристик метеорологических полей;
- автоматическое сохранение результатов измерений на жестком диске компьютера в виде файлов 4-х типов с задаваемым регламентом во времени;
- поддержка технологии DDE передачи своих выходных данных другим Windows-приложениям непосредственно через оперативную память компьютера;

Метеорологические параметры, вычисляемые программным приложением «METEO 3.0» по данным 3D-УТА:

- V – средняя скорость горизонтального ветра, м/с;
- V_{min} – минимальная скорость мгновенного горизонтального ветра, м/с;
- V_{max} – максимальная скорость мгновенного горизонтального ветра, м/с;
- $\sigma[V]$ – стандартное отклонение скорости горизонтального ветра, м/с;
- D – среднее направление горизонтального ветра, градусы (или в Д.У.);
- $\sigma[D]$ – стандартное отклонение направления ветра, градусы;
- w – средняя скорость вертикального ветра, м/с;
- $\sigma[w]$ – стандартное отклонение скорости вертикального ветра, м/с;
- W – модуль среднего вектора скорости ветра, м/с;
- α – угол наклона к горизонту среднего вектора скорости ветра, градусы;
- V_s – среднее значение южной компоненты скорости ветра, м/с;
- V_e – среднее значение восточной компоненты скорости ветра, м/с;
- T_{rmin} – минимальная средняя температура воздуха, °C;
- T_{rmax} – максимальная средняя температура воздуха, °C;
- T_{min} – минимальная средняя температура воздуха, °C;
- T_{max} – максимальная средняя температура воздуха, °C;
- V_{min} – минимальная скорость мгновенного горизонтального ветра, м/с;
- V_{max} – максимальная скорость мгновенного горизонтального ветра, м/с.
- T – средняя температура воздуха, °C;
- $\sigma[T]$ – стандартное отклонение температуры, °C;
- r – относительная влажность воздуха, %;
- e – упругость (давление) водяного пара, гПа;

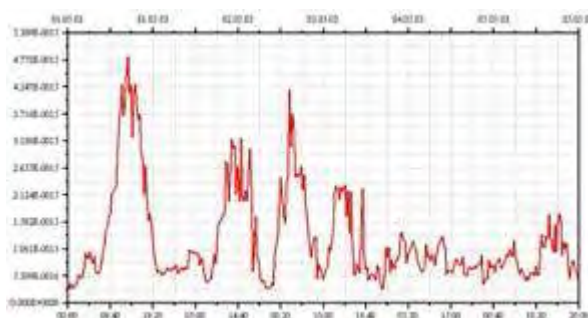
- E_d – дефицит влажности, гПа;
- T_d – температура точки росы, °C;
- q – абсолютная влажность воздуха, г/м³;
- m – массовая концентрация влаги, о/оо;
- P – атмосферное давление, гПа (или мм рт. ст.);
- ρ – плотность воздуха, г/м³.

На рис. 2.17 приведен вид окон отображения текущих средних и мгновенных значений температуры воздуха, скорости и направления горизонтального ветра и скорости вертикального ветра.

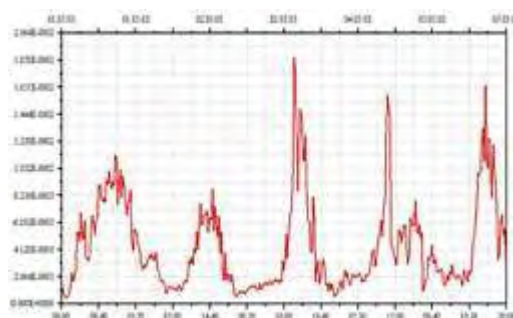


Рисунок 2.17 - Примеры графического отображения текущих средних и мгновенных значений температуры воздуха, скорости и направления горизонтального ветра и скорости вертикального ветра по результатам измерений АМК-03 (ПО «МЕТЕО 3.0»).

Высокая частота измерений мгновенных значений скорости ветра и температуры, осуществляемая 3D-УТА, позволяет определять турбулентные характеристики атмосферы (рис.2.18) [102].



а) Структурная постоянная флуктуаций оптического показателя преломления C_n^2



б) Структурная постоянная ветровых флуктуаций C_v^2

Рисунок 2.18 - Примеры графического отображения турбулентных характеристик атмосферы по результатам измерений АМК-03 (программные приложения «METEO DB» и «METEO DP»)

2.2 Оптический метод измерения осадков и его использование в задачах контроля АПС

2.2.1 Физические основы оптического метода измерения осадков

2.2.1.1 Метод определения характеристик осадков теневым методом основан на получении и анализе теневых изображений отдельных частиц атмосферных осадков, проходящих при естественном падении через специально сформированный световой поток и отбрасывающих тень, являющуюся результатом рефракции, отражения, дифракции и поглощения (рис. 2.19) [104].

С помощью оптической системы (коллиматора) полученное теневое изображения формируется на чувствительной поверхности многоканального фотоприемника. При прохождении падающих частиц осадков через плоскопараллельный световой поток, происходит изменение освещенности элементов линейного сенсора. Размер тени, отбрасываемой частицей, и скорость ее перемещения по чувствительным элементам фотоприемника являются исходными данными для определения типа и вычисления параметров осадков (рис. 2.20) [105].

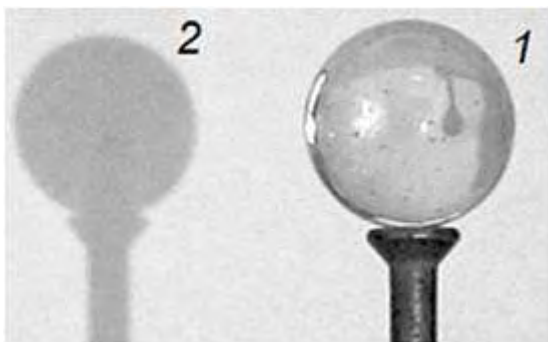


Рисунок 2.19 - Формирование тени прозрачного шара: 1 – прозрачный шарик на стойке; 2 – тень шарика и стойки (свет падает справа)

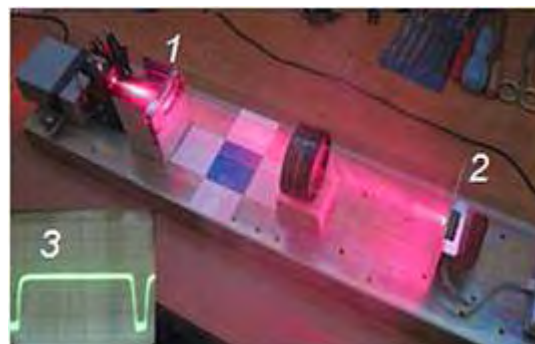


Рисунок 2.20 - Макет лазерного дисдрометра: 1 – лазерный излучатель; 2 – фотоприемник; 3 – осциллограмма, фиксирующая попадание шара в световой поток (провалы)

Для формирования виртуальной измерительной площадки с помощью лазерного источника и оптической системы создают тонкий плоскопараллельный однородный световой поток и направляют его на многоэлементный фотоприемник – линейный сенсор с высокой частотой опроса. Свободно падающие частицы осадков, проходящие через световой поток, затеняют определенное количество элементов линейного сенсора. Размер сечения теневого изображения частицы определяют по количеству затененных светочувствительных элементов известного размера. Размер затененного участка сначала увеличивается (кадры $a \div c$ рис. 2.21), затем уменьшается до нуля (кадры $d \div f$ рис. 2.21).

Благодаря тому, что скорость опроса чувствительных элементов линейного сенсора (или частота сканирования $W_{\text{сенс}}$) существенно превышает скорость падения частицы осадков v , осуществляется многократное сканирование сечения пролетающей частицы, что позволяет восстановить ее форму, вычислить объем и скорость (рис. 2.22).

Размеры виртуальной измерительной площадки определяются линейными размерами оптического канала и могут варьироваться изменением расстояния между формирующими его оптическими системами.

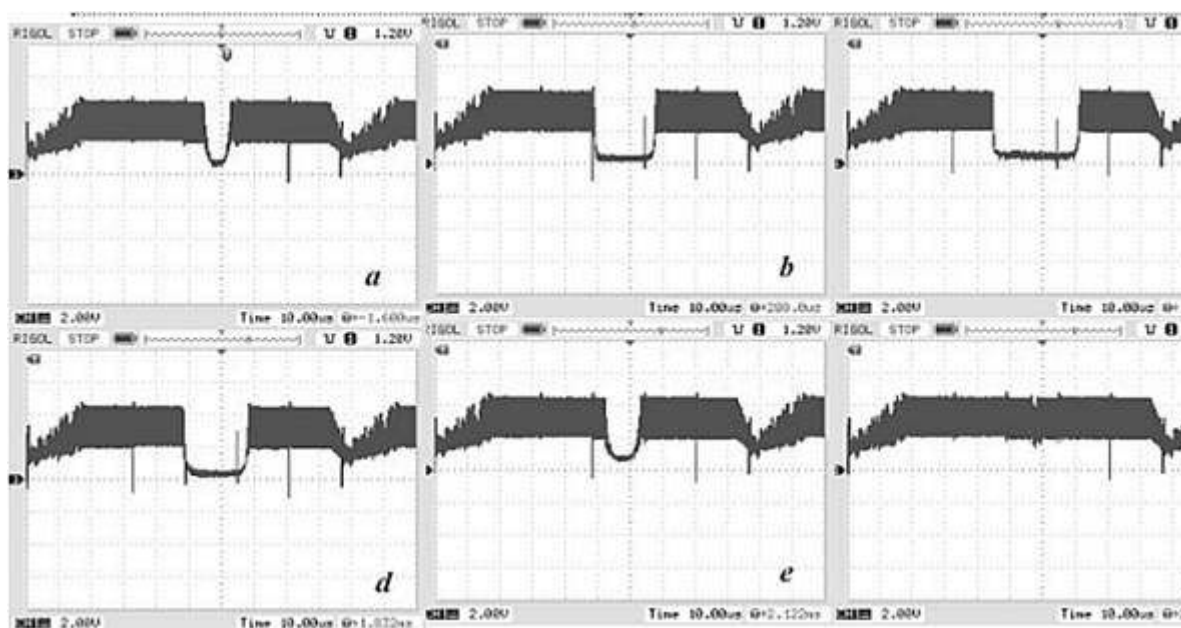


Рисунок 2.21 - Вид последовательных кадров опроса линейки многоканального фотоприемника при прохождении частицы осадков через световой поток

При этом размер измерительной площадки должен быть достаточно велик, чтобы своевременно определять время начала выпадения осадков и детектировать изменение интенсивности их выпадения, но и одновременно достаточно мал, чтобы гарантировать индивидуальность измерения каждой отдельной частицы и не вносить ошибок из-за совмещения теней частиц на фотоприемнике [106].

Таким образом, размер измерительной площадки определяет чувствительность устройства и диапазон интенсивности осадков, в котором оно может функционировать: для увеличения чувствительности размер площадки нужно увеличивать, для работы в условиях интенсивных осадков – уменьшать. На практике это можно реализовать как аппаратным способом – реальным изменением линейного размера площадки, так и программным – изменением количества пикселей линейного сенсора, сигналы с которых учитываются при обработке.

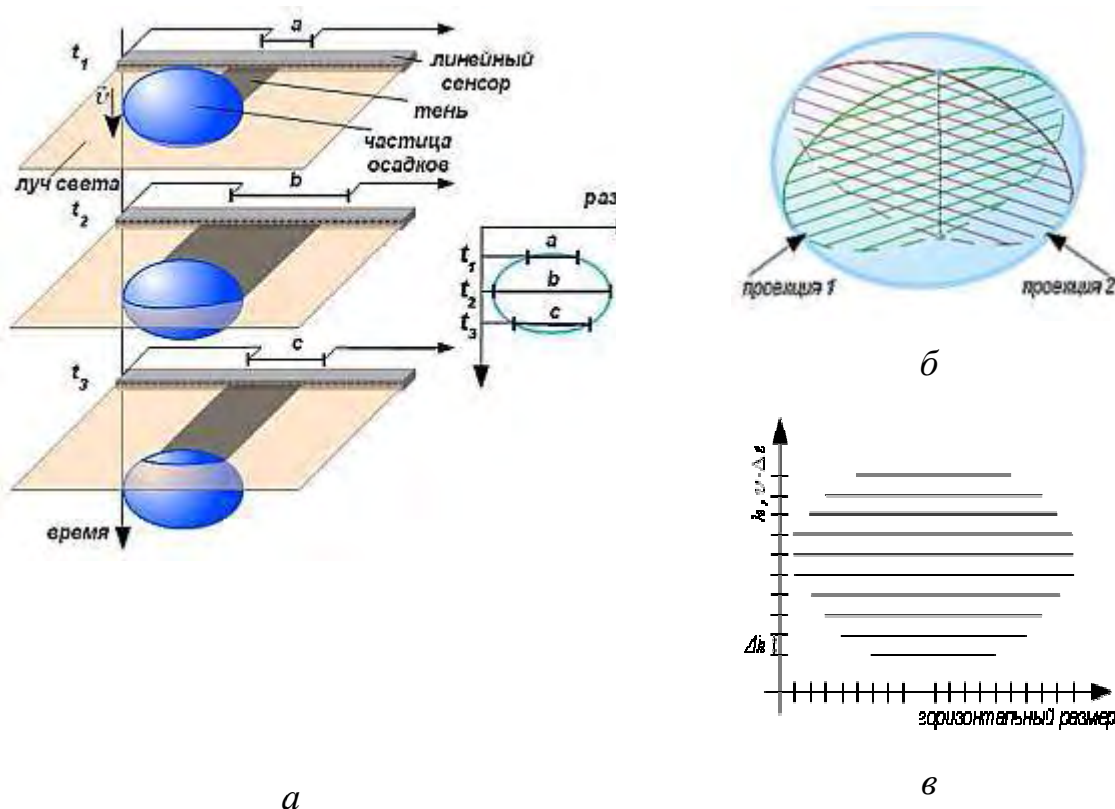


Рисунок 2.22 - Определение параметров частиц осадков теньвым методом: *а* – регистрация последовательности сечений мгновенных теневых изображений частицы осадков; *б* – восстановление формы и определение объема частицы осадков; *в* – определение скорости v капли дождя по времени прохождения ее тени через измерительную площадку

2.2.1.2 Определение типа осадков методом получения и анализа теневых изображений частиц, осуществляется на основании соотношения их размеров и скоростей падения (рис. 2.23) [107, 108].

Скорость падения определяется характеристиками осадков и атмосферы: плотностью ρ , массой m и формой частиц, числом Рейнольдса Re и коэффициентом лобового сопротивления C_D [64]. Для определения скоростей падения частиц часто применяются данные экспериментальных зависимостей и аналитические выражения. Существуют выражения, позволяющие уменьшить ошибку для определения скоростей до 0,4%, т.е. до величины ниже точности измерений.

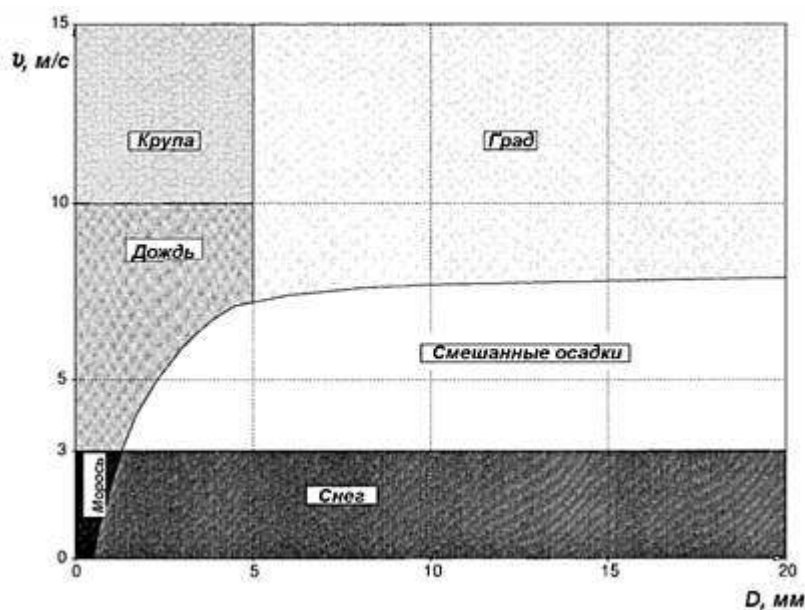
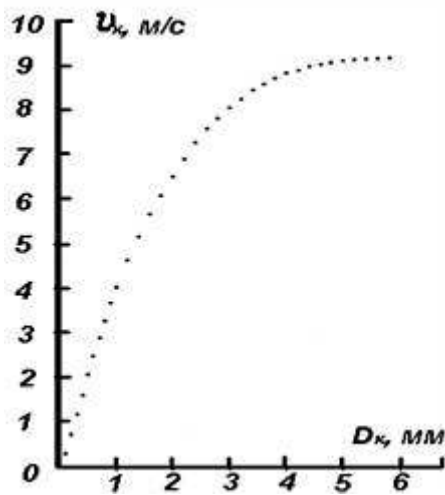


Рисунок 2.23 - Определение типа выпадающих атмосферных осадков на основе информации о размере и скорости падения

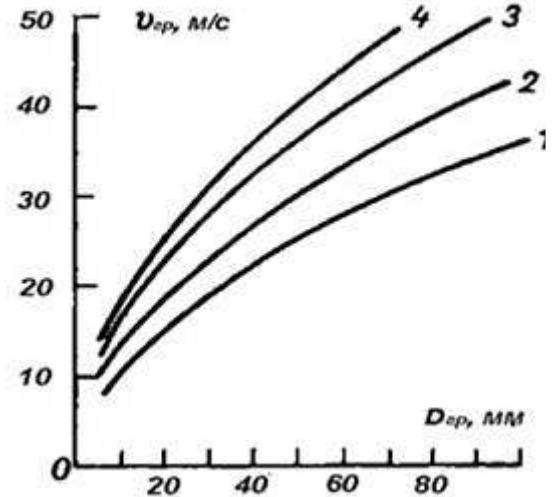
На рис. 2.24 приведены экспериментально полученные значения скорости падения капель дождя [109] и вычисленные значения скоростей падения градин [110] плотностью $0,7 \text{ г/см}^3$ (рис. 2.24,б) для различных высот, исходя из предположения, что коэффициент лобового сопротивления градин $C_D = 0,5$.

Для уменьшения ошибок при определении типа осадков необходимо учитывать значения средней температуры столба воздуха между изобарическими поверхностями 1000 и 850 гПа. При температуре воздуха меньше плюс 3°C выпадают только твердые осадки, при температуре воздуха больше плюс 3°C — только жидкие осадки. В диапазоне температур от минус 3°C до плюс 3°C наблюдаются осадки в виде дождя, снега или снега с дождем. Град выпадает при положительных температурах воздуха и сопровождается жидкими осадками [111, 121].

2.2.1.3 С помощью теневое метода можно определять структурные характеристики осадков [112, 258]. Рассмотрим горизонтальную площадку S со сторонами a и b , через которую проходят частицы осадков, например, капли дождя (рис. 2.25).



а



б

Рисунок 2.24 - Зависимость скорости падения частиц осадков от их эквивалентного диаметра: а – для капель дождя; б – для градин: 1 – на уровне моря, 2 – на высоте 3000 м, 3 – на высоте 5000 м, 4 – на высоте 9000 м

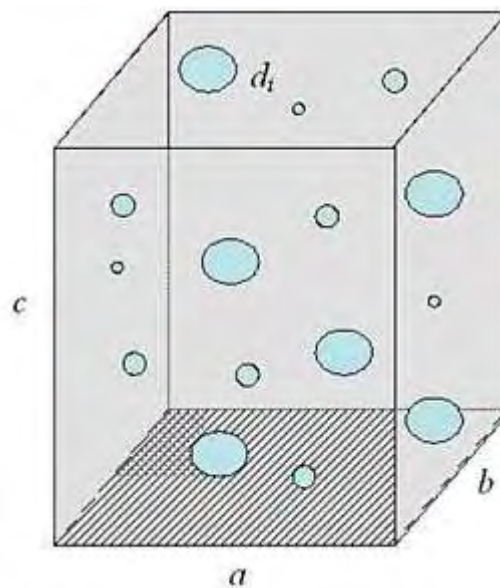


Рисунок 2.25 - Схематичное представление распределения частиц осадков по размерам

Поскольку капли размером более 1 мм имеют форму, отличающуюся от сферической, то их размер обычно характеризуется эквивалентным диаметром $d_{\text{э}}$, то есть диаметром сферической капли, содержащей тот же объем воды. За время регистрации Δt_p капли размером d_i под действием силы тяжести пройдут

расстояние $c = \Delta t_p \cdot v$. Таким образом, функция распределения частиц осадков в единице объема воздуха по эквивалентным диаметрам $\rho(d_3)$ и концентрация частиц N определяется следующими выражениями [113]:

$$\rho(d_3) = \frac{1}{S \Delta t_p d_i} \sum_{j=1}^n \frac{1}{v_j}$$

$$N = \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} \rho(d_3) dd \quad (2.10)$$

2.2.1.4 Определение интегральных характеристик жидких осадков (дождя) требует получения данных об объеме частиц, проходящих через измерительную площадку. Первым приближением вычисления объема частицы является допущение о том, что регистрируемые частицы являются сферичными каплями воды. Тогда объем частицы определяется следующим выражением:

$$V = \frac{\pi(k_{\max} l)^3}{6}, \quad (2.11)$$

где, $k_{\max}$ – максимальное количество затененных светочувствительных элементов линейного сенсора, зарегистрированное для данной частицы осадков, l – среднее значение горизонтального размера светочувствительного элемента. Таким образом, произведение $k_{\max} l$ в данном случае определено как эквивалентный диаметр d_3 данной частицы.

Интенсивность осадков I (мм/ч) и сумма осадков Q (мм) определяются из соотношений [111]:

$$I = 6\pi \times 10^{-4} \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} \rho(d_3) \rho(d_3^3) V(d_3) dd_3, \quad (2.12)$$

где $V(d_3)$ – скорости падения частиц в зависимости от эквивалентного диаметра; $\rho(d_3)$ – функция распределения по среднему d_3 ;

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} I(t) dt, \quad (2.13)$$

где t_1 и t_2 время начала и окончания выпадения осадков.

Для учета эффекта отклонения формы падающей частицы дождя от сферической (деформации из-за сопротивления воздуха) определяют поправку вертикального размера, исходя из известного соотношения осей деформированных частиц осадков [109].

Для различных задач физики атмосферного приземного слоя и задач зондирования атмосферы актуальны также значения водности осадков W (г/м³), удельного сечения осадков B_y (км⁻¹) и радиолокационной отражаемости Z (мм⁶/м³):

$$W = \frac{\pi \rho \cdot 10^{-3}}{6} \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} \rho(d_3) d_3^3 dd_3, \quad (2.14)$$

$$B_y = \frac{\pi \cdot 10^{-3}}{2} \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} \rho(D) D^2 dD, \quad (2.15)$$

$$Z = \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} \rho(D) D^6 dD, \quad (2.16)$$

где $\rho(D)$ – функция распределения по среднему видимому диаметру.

В случае выпадения града, наносимый ущерб характеризуется удельной энергией C (Дж/м²):

$$C = \frac{5\pi\rho_B}{6} \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} \rho(d_3) d_3^3 V^2(d_3) dd_3, \quad (2.17)$$

где ρ_B – плотность воды (г/см³).

2.2.2 Технические аспекты реализации теневого метода измерения

осадков в задачах метеорологического контроля приземной атмосферы

2.2.2.1 Функциональная схема устройства, реализующего теневой метод определения характеристик атмосферных осадков представлена на рис. 2.26 [112].

Блок источника излучения содержит лазер и оптическую систему (коллиматор) [114]. Тонкий плоскопараллельный световой поток от источника излучения попадает на линейный сенсор приемника излучения.

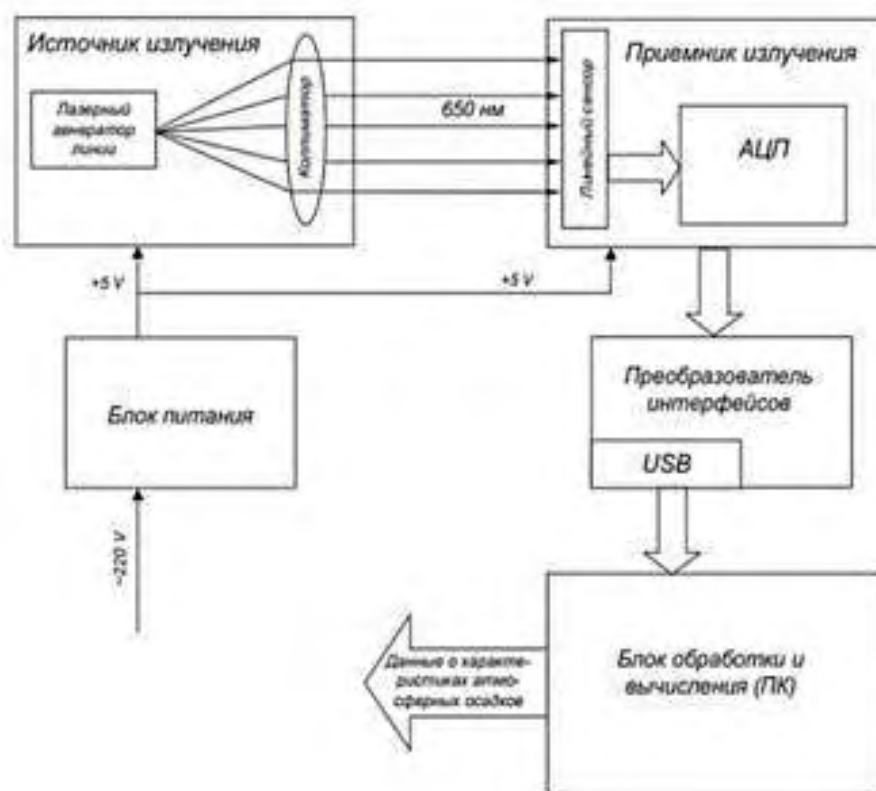


Рисунок 2.26 - Функциональная схема технической реализации метода получения и анализа теневых изображений частиц осадков

Сигнал с выходов линейного сенсора передается в АЦП для формирования измерительной информации. АЦП осуществляет следующие функции:

- а) снимает сигнал с линейного сенсора,
- б) проводит первичную фильтрацию шумов,
- в) преобразует сигнал со светочувствительных элементов линейного сенсора в бинарный с помощью компаратора;
- г) формирует информационные пакеты с количеством и положением затененных чувствительных элементов линейного сенсора для каждого сечения;
- д) проводит фильтрацию кадров, не содержащих измерительной информации;
- е) формирует и передает контрольный сигнал непрерывности работы;
- ж) осуществляет передачу измерительных данных на преобразователь интерфейсов для передачи в блок обработки и вычисления данных (персональный компьютер – ПК).

Используемый линейный сенсор должен обеспечивать измерение характеристик частиц осадков в максимально широком диапазоне реально возможных размеров и скоростей падения с достаточно высоким разрешением. Вертикальный размер луча приблизительно равен 1 мм, но его эффективная величина определяется высотой чувствительной области линейного фотоприемника (рис. 2.27). Она располагается в максимуме интенсивности развертки лазерного луча и составляет 0,06 мм, что позволяет без потери точности дальнейших оценок считать измерительные каналы бесконечно тонкими.

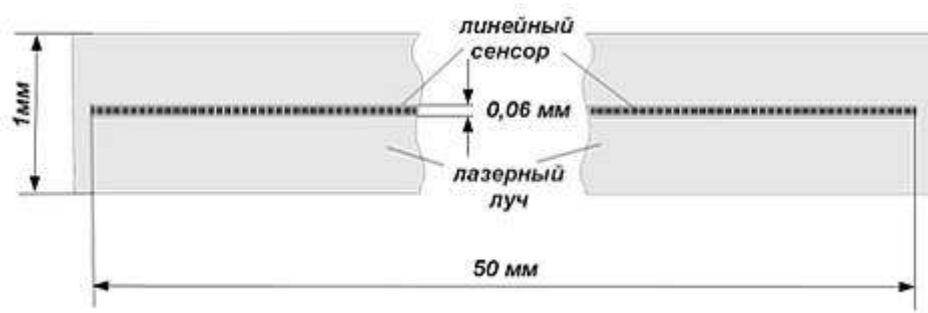


Рисунок 2.27 - Схема размещения линейного сенсора в сечении лазерного луча

2.2.2.2 Требование к минимальной частоте сканирования линейного сенсора определяется диапазоном размеров и скоростей падения анализируемых частиц осадков. Применяемый многоэлементный сенсор должен гарантированно фиксировать прохождение тени от капли, характеризующейся любым значением скорости и диаметра в установленном интервале. Определить минимальные требования к частоте сканирования можно на основе известных экспериментальных зависимостей конечной скорости падения частиц осадков от их размера (см. рис. 2.24). Из этих данных следует, что отношение скорости частицы к ее диаметру максимально в диапазоне размеров до 1 мм. В этом диапазоне можно приближенно считать, что скорость линейно зависит от диаметра и может быть рассчитана по формуле:

$$v(D) = A \cdot D, \quad (2.18)$$

где коэффициент A равен $4 \cdot 10^3 \text{ (с}^{-1}\text{)}$.

Используя данное соотношение, можно оценить минимальное время прохождения частицы с диаметром D и скоростью v через измерительную плоскость

$$T_{\text{мин.}} = D / v = D / (A \cdot D) = A^{-1} = 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ (с)}. \quad (2.19)$$

Следовательно, частота обработки всего линейного массива фоточувствительных элементов должна иметь величину не менее 10 кГц. Этим требованиям удовлетворяют высокопроизводительные многоэлементные линейные сенсоры (линейные матрицы) *TSL-1406*, имеющие 768 чувствительных элементов общим размером около 50 мм и обеспечивающие частоту сканирования порядка 18 кГц.

2.2.2.3 Лазерный источник должен обладать мощностью, достаточной для обеспечения экспозиции насыщения светочувствительных элементов линейного сенсора при максимальных частотах сканирования (20 кГц).

Требуемую мощность лазерного источника $P_{\text{ист}}$ можно оценить из соотношения:

$$P_{\text{ист.}} = P_{\text{лин.}} \cdot S_{\text{пуч.}} / S_{\text{лин.}} / \tau_{\text{проп.}} \quad (2.20)$$

где $P_{\text{лин}}$ – мощность насыщения линейного сенсора, $S_{\text{пуч.}} / S_{\text{лин.}}$ – отношение площади пучка к фоточувствительной площади сенсора, $\tau_{\text{проп.}}$ – коэффициент пропускания света оптической системой.

При реальных условиях (экспозиция насыщения применяемого линейного массива оптических сенсоров - 155×10^{-9} Дж/см², фоточувствительная площадь линейного сенсора из 768 чувствительных элементов - $3,1 \cdot 10^{-2}$ см², время экспонирования - 50 мкс, площадь сечения луча ($S_{\text{пуч.}}$), падающего на линейный сенсор, - 0,50 см²) $P_{\text{ист}}$ составит около 2,7 мВт.

Таким образом, в качестве источника можно использовать полупроводниковый лазер LG-H650-8-5 с мощностью непрерывного излучения 8 мВт и длиной волны 650 нм. Данный лазерный модуль имеет встроенный коллиматор, состоящий из просветленных стеклянных линз и дает пучок излучения средней расходимости в вертикальной плоскости (≤ 1 мрад) с углом раскрытия 110°, угол расходимости коллимированного светового потока в

пределах размеров и плоскости измерительной площадки не больше чем $\beta=0,06^\circ$. Напряжение питания 5 В и низкий рабочий ток (≤ 50 мА) обеспечивают возможность длительной работы от автономных источников питания.

2.2.2.4 Основным элементом оптического измерителя осадков является его измерительная площадка – ограниченная плоскость пространства, в которой происходит измерение параметров частиц осадков. В работе реализована схема адаптивной измерительной площадки, меняющей свой эффективный размер в зависимости от интенсивности осадков.

Адаптивная измерительная площадка позволяет регулировать чувствительность прибора (путем увеличения эффективного размера площадки при низкой интенсивности осадков), увеличивать динамический диапазон измерений (путем уменьшения эффективного размера площадки при высокой интенсивности осадков), а также оптимизировать поток информации, выдаваемый многоканальным линейным сенсором. (Последнее является актуальной проблемой в связи с тем, что при высокой интенсивности осадков поток этой информации резко увеличивается и перегружает канал связи и вычислительный процессор, ограничивая тем самым функциональные возможности прибора).

Принцип работы адаптивной измерительной площадки пояснен на схеме рис. 2.28 [6].

Принцип работы измерителя осадков, использующего теневой метод, заключается в том, что оптическое излучение от источника преобразуют в параллельный световой пучок и посылают на линейный сенсор, при этом проходящие через него частицы осадков, вызывают затенения светочувствительных элементов линейного сенсора, с выхода которого соответствующий аналоговый сигнал передается в блок аналого-цифрового преобразования.

В процессе измерения блок адаптации измерительной площадки отслеживает объем измерительной информации $S_{\text{и}}$, передаваемой в единицу времени. Если эта величина приближается к верхнему пороговому значению,

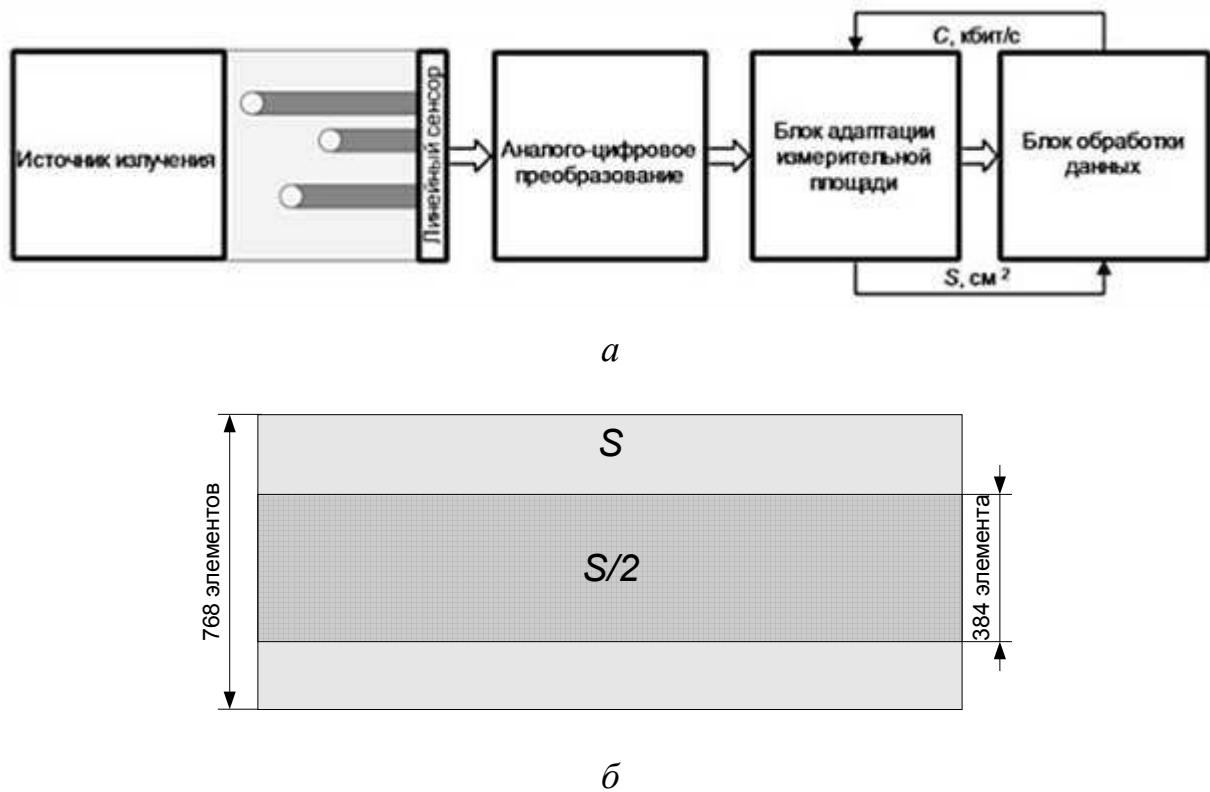


Рисунок 2.28 - Принцип работы системы адаптации измерительной площадки:

a – блок-схема; *б* – изменение эффективного размера измерительной площадки за счет изменения числа рассматриваемых пикселей многоканального линейного сенсора

устанавливаемому на 20 % ниже пропускной способности канала связи C_k , блок адаптации измерительной площадки уменьшает ширину измерительного канала за счет исключения из рассмотрения части светочувствительных элементов на краях линейного сенсора. Это приводит к уменьшению измерительной площади и соответствующему уменьшению объема генерируемых данных.

Процедуру уменьшения измерительной площади повторяют до тех пор, пока скорость генерации измерительных данных не опустится ниже установленного порога. Информация об изменении величины измерительной площади передают в блок обработки данных для введения поправок в процедуры расчета интегральных параметров осадков.

При уменьшении интенсивности осадков, приводящем к падению скорости генерации измерительных данных ниже 20 % пропускной способности канала связи (нижний порог), блок адаптации измерительной площади осуществляет увеличение ширины измерительных каналов вплоть до максимально возможной, если это не приводит к превышению верхнего порога.

Таким образом, скорость генерации измерительных данных изменяют в пределах от 20 до 80% от пропускной способности канала связи с блоком вычисления и сохранения данных, обеспечивая его эффективное использование канала, при этом, исключая его перегрузку.

2.2.3 Оптические измерители осадков ОДИО и ОПТИОС

2.2.3.1 На основе приведенных выше технических решений разработаны экспериментальные образцы измерительных устройств [115]. Двухканальный измеритель ОДИО [7] (рис. 2.29) имеет два идентичных оптических канала, ортогонально расположенных в пространстве. Они образуют две виртуальных измерительных площадки, ограниченных шириной оптических лучей и их проекцией друг на друга. Измерительные каналы (виртуальные измерительные площадки) разнесены по вертикали относительно друг друга на расстояние 5 мм.

ОДИО позволяет проводить измерения теневых изображений частиц осадков одновременно в двух ортогональных проекциях, скорость частиц определяется по времени прохождения зазора между площадками.

Оптический двухканальный измеритель осадков ОДИО представляет собой программно-аппаратный комплекс, функционирование которого обеспечивают специализированные компьютерные программы: «Программа первичной обработки сигналов для блока измерений оптико-электронного осадкомера (ПОС)» [116] и программа расчета параметров осадков «OPTIOScore» (рис. 2.30) [117].

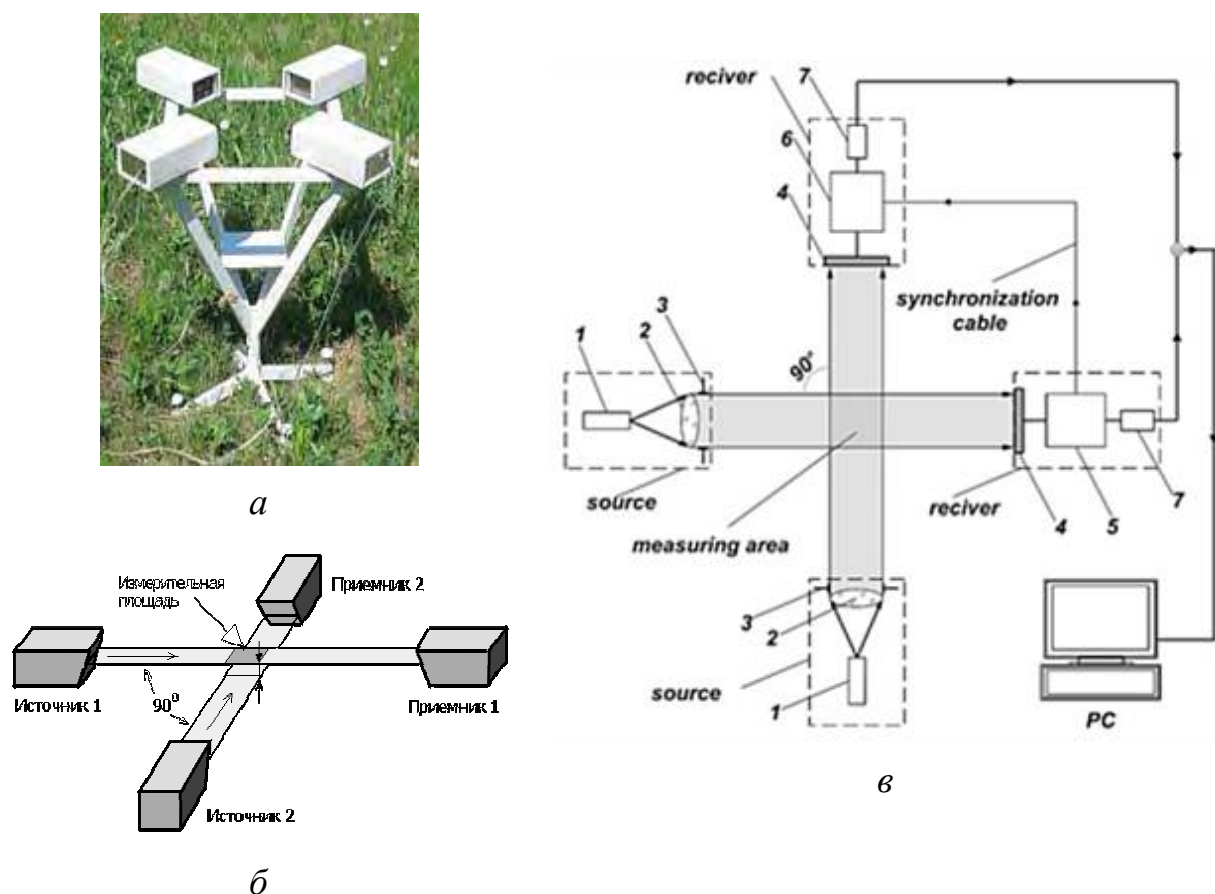


Рисунок 2.29 - Двухканальный оптический измеритель осадков ОДИО: *а* – внешний вид; *б* – структурная схема; *в* – функциональная схема: 1 – диодный лазер ($\lambda = 0.69$ мкм), 2 – коллиматор, 3 – защитное стекло, 4 – многоканальный фотоприемник, 5, 6 – микропроцессорный блок управления, выходной интерфейс

Первоначальное формирование измерительной информации происходит в момент преобразования сигналов с выходов линейного сенсора в информационные пакеты с данными о количестве и размерах сечений каждой зарегистрированной частиц осадков. Блок формирования измерительной информации находится под управлением микроконтроллера ATmega1280, выполняющего программу «ПОС». Программа регистрирует получение аналогового видеосигнала с выходов линейного сенсора, проводит фильтрацию шумов светочувствительных элементов, осуществляет управление преобразованием аналогового сигнала в бинарный код. Программа «ПОС» также

управляет передачей данных, содержащих в себе номера пикселей с переходом свет-тень и тень-свет, в интерфейсный USB модуль.

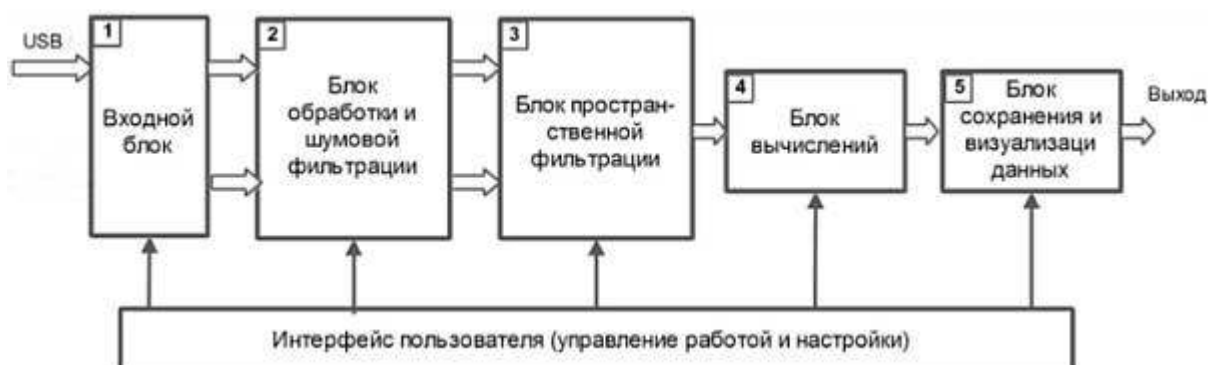


Рисунок 2.30 - Структурная схема программного обеспечения ОДИО

Далее информация поступает в компьютерную программу OPTIOScore расчета параметров осадков. Эта программа работает под управлением операционной системы ПК и осуществляет вычисление размеров частиц, их объемов и сумм осадков на основе разработанных алгоритмов.

Алгоритм функционирования программ приведен на рис. 2.30. Программа «ПОС» получает информацию о затененных пикселях. В блоке 2 проходит первичная обработка информации и фильтрация данных, образовавшихся вследствие регистрации шумов линейного сенсора. В блоке 3 осуществляется фильтрация измерений, произведенных вне измерительной площадки. Далее информация поступает в блок 4, где посредством программы «OPTIOScore» производится вычисление размеров, скоростей частиц и их объемов. По этим данным здесь же вычисляются интегральные характеристики осадков. В блоке 5 осуществляется сохранение данных на жесткий диск и вывод результатов измерений на монитор ПК.

В табл. 2.5 приведены основные технические характеристики ОДИО.

ОДИО предназначался, в основном, для исследований параметров осадков (дождя и снега) и отработки методики натурных измерений.

Таблица 2.5 - Технические характеристики ОДИО

Характеристика	Описание/Значение
Измерительная площадь	Изменяемая: от 25 см ² и меньше
Ширина оптического канала	Изменяемая: от 50 мм и меньше
Вертикальное расстояние между каналами	5 мм
Частота сканирования измерительной площадки	До 30 кГц
Точность измерения размеров частиц (горизонтальное разрешение)	Не ниже 0,05 мм
Относительная погрешность измерения размеров частиц	Не более 5%
Диапазон размеров измеряемых частиц	От 0,3 до 10 мм (и выше)
Относительная погрешность измерения скорости частиц	Не более 3%
Точность измерения количества осадков (предполагаемая)	$\pm 3\%$
Чувствительность по количеству выпавших осадков	Не ниже 2×10^{-4} мм
Возможность регистрации снега	Есть
Рабочий диапазон температур	От минус 20 °С до плюс 60 °С

2.2.3.2 Для использования в составе автоматических метеорологических станций созданы более простые одноканальные модификации измерителя осадков ОПТИОС-01 и ОПТИОС-02 [118, 119]. По сравнению с двухканальным ОДИО эти измерители имеют меньшую стоимость, существенно более просты в настройке, имеют меньшие габариты и вес. Геометрические параметры частиц осадков в ОПТИОС определяются только в одной проекции, но, как показали натурные измерения, проведенные с ОДИО, это не существенно сказывается на погрешности в связи с усреднением результатов измерений по большому ансамблю выпадающих частиц осадков.

ОПТИОС-01 и ОПТИОС-02 имеют аналогичные оптические схемы (рис. 2.31) и отличаются конструктивным исполнением (рис. 2.32).

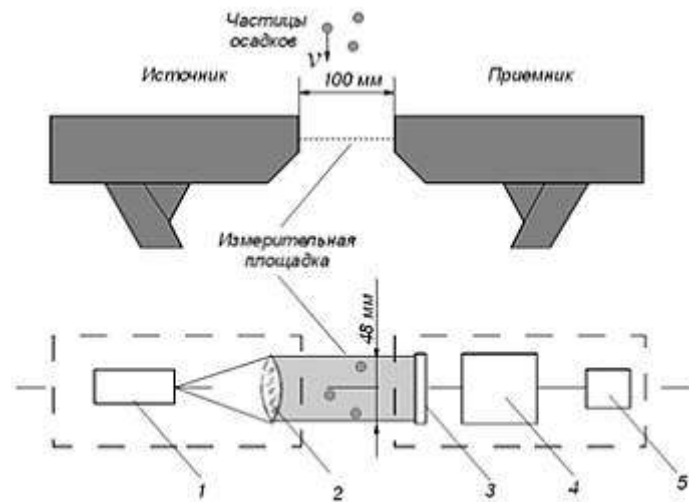


Рисунок 2.31 - Оптическая схема ОПТИОС-02 (ОПТИОС-01):

1 – источник излучения; 2 – линза; 3 – линейный сенсор; 4 – блок формирования измерительной информации; 5 – интерфейсный модуль



а



б



в



г

Рисунок 2.32 - Экспериментальные образцы ОПТИОС-01 и ОПТИОС-02: *а* – ОПТИОС-01; *б* – ОПТИОС-02; *в* – излучатель с оптической системой; *г* – приемник с линейной ПЗС матрицей

В табл. 2.6 приведены основные технические характеристики ОПТИОС-01 (ОПТИОС-02).

Таблица 2.6 - Технические характеристики ОПТИОС-01 (ОПТИОС-02)

Характеристика	Значение
Диапазон размеров частиц осадков	от 0,3 до 10 мм
Погрешность измерения размеров частиц осадков	0,1 мм
Чувствительность по количеству выпавших осадков	не хуже 2×10^{-4} мм
Погрешность измерения количества осадков	не более $\pm 3\%$
Погрешность измерения скорости падения частиц осадков	не более $\pm 3\%$

Для изготовления оптических измерителей осадков под контролем автора разработан комплект эскизной конструкторской документации АМЯ2.839.000, по которому в ООО «Сибаналитприбор» изготовлено 5 экспериментальных образцов осадкомера ОПТИОС. Осадкомер использован в составе автоматизированной информационно-вычислительной системы, предназначенных для мезомасштабного метеорологического и экологического контроля состояния АПС (см. главу 5), а также в составе комплекса аппаратуры для обеспечения безопасности ВПП аэродромов (тема «Броненосец»).

2.2.4 Метрологическое обеспечение и результаты испытаний оптических измерителей осадков

2.2.4.1 Для метрологического обеспечения оптических измерителей осадков ОПТИОС под контролем автора разработана «Программа и методика лабораторных испытаний АМЯ 2.839.000 ПМ», определяющая следующие виды испытаний по показателям назначения:

1) проверка погрешности измерения размеров частиц (горизонтальное разрешение);

- 2) оценка относительной погрешности измерения размеров частиц;
- 3) проверка диапазона размеров измеряемых частиц;
- 4) оценка относительной погрешности измерения скорости частиц;
- 5) оценка точности измерения количества жидких осадков;
- 6) оценка чувствительности по количеству выпавших осадков;
- 7) проверка размера измерительной площадки;
- 8) оценка работы в режиме реального времени

В соответствии с разработанной программой экспериментальных исследований метрологических характеристик теневого метода измерения параметров осадков выполнены работы по определению чувствительности реализующих метод устройств и погрешностей измерения основных структурных и интегральных характеристик дождя: размеров частиц осадков, скорости падения частиц, количества осадков, чувствительности по отношению к количеству осадков [120].

Предварительный анализ результатов исследования теневого метода показал, что основные погрешности определения характеристик атмосферных осадков вносятся несовершенствами компонентов измерительной системы, реализующей метод, особенностями измеряемых объектов и несовершенством математического аппарата и физической модели, применяемой для описания характеристик атмосферных осадков. Основными факторами, вносящими вклад в погрешность измерений, являются [120]:

- а) неоднородность светового потока,
- б) регистрация теней частиц осадков на границе измерительной площадки,
- в) дискретизация измерений теневых изображений частиц,
- г) сложная форма частиц осадков.

Далее приведен более подробный анализ перечисленных факторов и рекомендации по уменьшению их влияния [122, 123].

2.2.4.2 Неоднородность светового потока определяется типом излучателя и качеством оптической системы. Этот фактор определяет качество изображения теней частиц осадков в зависимости от их размера и положением на

измерительной площадке. Даже при точной настройке коллиматора и отсутствии зависимости измерения горизонтального размера от близости или удаления от приемника или излучателя, возможные значения абсолютной погрешности измерения горизонтального размера частиц могут достигать 0,1 мм. Это вызвано наличием aberrаций оптической системы, следствием влияния которых является зависимость результатов измерений от положения частицы относительно края поперечного сечения оптического канала. Уменьшение погрешности, вызванной неоднородностью светового потока, достигается калибровкой, которая заключается в определении зависимости измеряемого размера от положения частиц на измерительной площадке посредством регистрации диаметров калиброванных шаров, взятых в качестве эталонов, и сопоставлением измеренных значений их диаметров с реальными значениями. Поперечное сечение оптического канала условно разбивают по ширине на i участков. Например, для линейного сенсора шириной 50 мм, содержащего 768 светочувствительных элементов, оптический канал целесообразно разбить на $i = 8$ участков: 7 участков, содержащих по 100 светочувствительных элементов (1-100; 101-200; ..., 601-700) и один участок, содержащий 68 элементов (701-768). В ходе калибровки шары отпускают в свободное падение непосредственно над измерительной площадкой так, чтобы их центры проходили вблизи середины интервалов (± 10 светочувствительных элементов). Поскольку в данном случае распределение по результатам измерений случайных величин подчиняется нормальному закону, то для высокой достоверности минимальное количество измерений для каждого участка количество измерений $s \geq 40$. Калибровка заключается в получении величины поправки для каждого из выделенных участков линейного сенсора. Расчет поправки величины диаметра ΔD_i для i -го участка линейного сенсора определяется по формуле:

$$\Delta D_i = D_{\text{ист.}} - \bar{D}_i, \quad (2.21)$$

где $D_{\text{ист}}$ – диаметр эталонного шара; $\Delta\bar{D}_i = \frac{\sum_{j=1}^s D_j}{s}$ – среднее значение по результатам s измерений.

Таким образом, измеренное значение диаметра частиц D с учетом калибровки определяют в зависимости от того участка i в котором частица была зарегистрирована:

$$D = \Delta D_i + D_i^{\text{изм}} \quad (2.22)$$

где $D_i^{\text{изм}}$ – измеренное значение диаметра частицы, попавшей в участок i .

Результат применения способа калибровки для частиц размером 5 мм представлен на рис. 2.33.

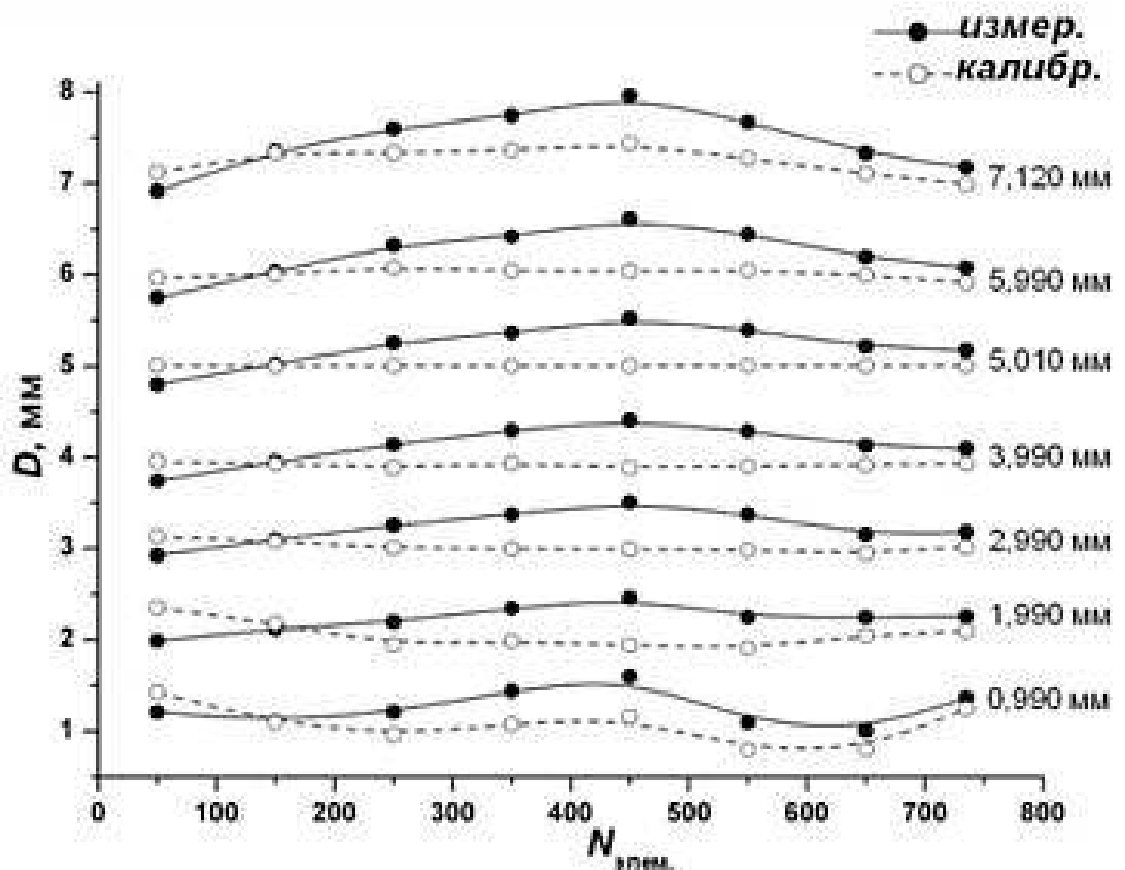


Рисунок 2.33 - Результат измерения эталонных шаров до и после калибровки для частиц $D = 5$ мм

Из рис. 2.33 видно, что для значения размера 5 мм кривая, соединяющая точки калиброванных значений, представляет собой горизонтальную линию, что говорит об успешном завершении калибровки.

При этом по характеру кривых, полученных для шаров других размеров, можно судить о влиянии применения поправочных значений на точность измерения шаров в диапазоне 1-7 мм. Из графика ясно, что данная процедура не обеспечивает высокой эффективности для определения размеров малых частиц осадков (до 2 мм) и крупных частиц (7 мм и более). Таким образом, для увеличения точности измерений, калибровка должна проводиться с учетом размеров частиц, дающих основной вклад в суммарное значение объема выпадающих осадков.

Определение относительной погрешности измерения скорости частиц осуществляется измерением скорости свободного падения эталонных шаров, падающих с известной высоты. Измеренное значение скорости падения рассчитывается по количеству сканов, произведенных линейным сенсором за время прохождения шара через измерительную плоскость. Эталонное значение скорости определяется по формуле для определения скорости свободного падения тела с заданной высоты [124]. Для экспериментального образца ОПТИОС измеренная таким образом относительная погрешность измерения скорости падения не превышает 3 %.

2.2.4.3 Регистрация теней частиц осадков на границе измерительной площадки вносит ошибку в определение размеров частиц осадков, значение которой определяется размером измерительной площадки. С увеличением размера измерительной площадки влияние краевых эффектов снижается. Для определения среднеквадратического отклонения (СКО) ошибки $\sigma_{кр}$, вызванные краевыми эффектами, применяют следующее выражение:

$$\sigma_{кр} = \sigma_i P_i \quad (2.23)$$

где $P_i = S_{кр} / S_o$ – вероятность попадания частицы осадков в краевую область, $S_o = B \cdot L$ – размер измерительной площадки, $S_{кр} = D(B + L - D)$ – площадь

краевой зоны, B , L – длина и ширина измерительной площадки, D – диаметр капли (рис. 2.34).

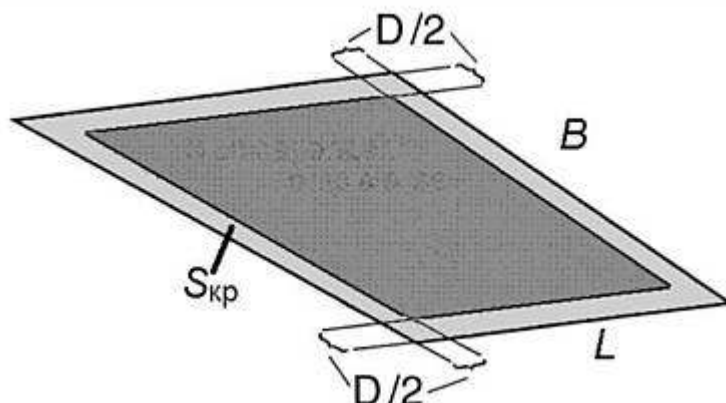


Рисунок 2.34 - Краевые зоны измерительной площадки

При этом допускается условие, что если частица попадает в край площадки, то есть на расстояние $D/2$ от края, то $\sigma_i = 0,5$, иначе $\sigma_i = 0$. Оценочные расчеты показывают, что значение $\sigma_{кр}$ для измерительной площадки меняется от $\sigma_{кр} = 0,02$ для мелких капель дождя до $\sigma_{кр} = 0,18$ в случае крупных твердых частиц осадков. Для устранения влияния краевых эффектов производят отбрасывание частиц осадков, попадающих в область $S_{кр}$ измерительной площадки. Следовательно, для определения плотности частиц по размеру на основании выражения (4.1) необходимо применить функцию зависимости размеров измерительной площадки от регистрируемых частиц осадков вида:

$$S(D) = S_0 - S_{кр}(D) \quad (2.24)$$

2.2.4.4 Дискретизация измерений вносит погрешность квантования как в определение размера частиц осадков, так и скоростей их падения. Данный вид ошибки носит характер инструментальной погрешности, и желаемая точность измерений достигается правильным подбором компонентов прибора. Погрешность измерения размеров частиц определяется, прежде всего, разрешающей способностью:

$$\Delta D = L / n, \quad (2.25)$$

где L – ширина измерительной площадки, n – количество светочувствительных элементов линейного сенсора. Для линейного сенсора, содержащего 768 светочувствительных элементов и оптического канала шириной 50 мм разрешение составляет порядка 65 мкм. Дискретизация измерений влияет на точность определения размеров частиц осадков и зависит от частоты сканирования оптического канала линейным сенсором. Для определения диаметра с максимальной погрешностью 14 % достаточно произвести как минимум два измерения падающей частицы. Для уменьшения погрешности следует применять более скоростные линейные сенсоры.

2.2.4.5 Сложная форма частиц осадков вызывает погрешность измерения количества жидких осадков, поскольку капли дождя размером более 1 мм могут в полете существенно деформироваться. Максимальный вклад в сумму осадков дают капли в диапазоне размеров $D = 1,5 \dots 2$ мм, которые можно считать эллипсоидами вращения. Капли дождя меньших размеров имеют форму близкую к сферической, а более крупные капли, встречаются намного реже. Рассчитаем погрешность измерения объема капель дождя для диаметра $D = 2$ мм, возникающую за счет их деформации. На основании данных [64] отношение вертикального размера капель к горизонтальному для $D = 2$ мм составляет $a/b = 0,9$. Примем горизонтальный размер b , равный большим осям эллипсоида вращения и диаметру сферы равный диаметру D . Тогда относительную погрешность определения объема капель без учета деформаций капель можно определить по формуле:

$$\delta = \frac{|V_c - V_э|}{V_{cp}}, \quad (2.26)$$

где $V_c = \frac{\pi b^3}{6}$ – объем сферической капли, $V_э = \frac{4}{3} \pi \frac{a}{2} \frac{b^2}{4}$ – объем деформированной капли, $a = 0,9b$, V_{cp} – среднее арифметическое значение V_c и $V_э$.

Результаты вычислений показывают, что максимальная погрешность измерения объемов деформированных капель может достигать 10 %. Для

устранения данной погрешности необходимо производить учет деформации частиц осадков с применением соотношения, полученного эмпирическим путем [109]:

$$(a/b) = 11,03 - 0,124 D \quad (2.27)$$

2.2.4.6 Лабораторные испытания осадкомера по определению минимальной чувствительности и погрешности измерения количества осадков выполнялись с использованием дозирующего устройства, позволяющего направлять на измерительную площадку отдельные серии капель воды фиксированного объема [125] (рис. 2.35).

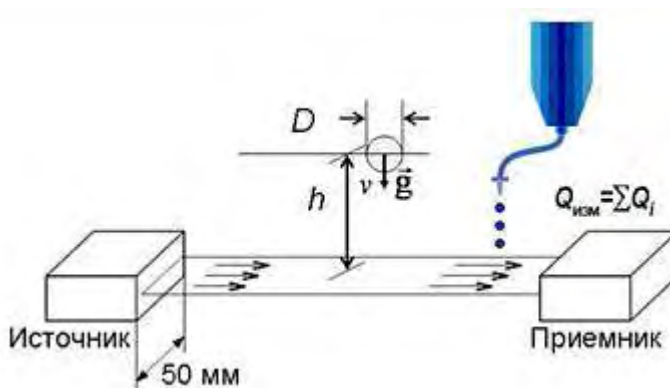


Рисунок 2.35 - Схема проведения лабораторных испытаний ОПТИОС

Проверка чувствительности по количеству осадков заключалась в проверке возможности регистрации самой мелкой частицы из измеряемого диапазонная частиц. Осадкомер ОПТИОС уверенно регистрировал частицы осадков диаметром менее одного миллиметра, что соответствует чувствительности по количеству осадков 10^{-4} мм. Величина относительной погрешности ОПТИОС по измерению количества осадков не превысила 3%.

2.2.4.7 Натурные испытания позволили выявить основные погодные факторы, влияющие на метрологические характеристики теневого метода, и оценить их вклад в погрешность реализующего метод устройства [127] (для обработки результатов сравнительных испытаний осадкомера ОПТИОС и

DavisRainCollector использовалась специально разработанная компьютерная программа) [125].

В условиях реальных натурных измерений осадков для классических осадкомеров, в конструкции которых имеется приемное отверстие с воронкой, основными факторами, приводящими к погрешности измерений, являются:

- «ветровой недоучет» – погрешность, вносимая деформацией ветрового поля над приемным отверстием осадкомера (погрешность, в зависимости от погодных условий, может составлять от 2 до 50%);
- потери жидкости за счет смачивания поверхности сборника осадков (погрешность, в зависимости от погодных условий, может составлять от 2 до 10%);
- потери жидкости за счет испарения (погрешность, в зависимости от погодных условий, может составлять до 4%);
- разбрызгивание или набрызгивание капель (погрешность, в зависимости от погодных условий, может составлять до 2 %) [128].

Натурные испытания осадкомера ОПТИОС проводились в летнее и зимнее время на метеорологической площадке ИМКЭС СО РАН (рис. 2.36).

Программное обеспечение ОПТИОС [117] позволяет по результатам измерений объемов отдельных капель V_k рассчитывать интенсивность дождя I и сумму выпавших осадков Q :

$$I = \frac{\sum_{k=1}^K V_k}{S T}, \quad (2.28)$$

$$Q = \frac{\sum_{k=1}^K V_k}{S}, \quad (2.29)$$

где K – количество капель, прошедшее сквозь измерительную площадь S , T – время выпадения осадков.

На рис. 2.37 представлены результаты сравнительных испытаний ОПТИОС и осадкомера DavisRainCollector 26-27 августа 2013 г.



Рисунок 2.36 - Натурные испытания ОПТИОС с референтными приборами (осадкомер М-99 и DavisRainCollector) на метеорологической площадке ИМКЭС СО РАН: *а* – ОПТИОС-01 (лето); *б* – ОПТИОС-02 (лето и зима)

Во время события «дождь 1» осадкомер М-99 не зарегистрировал факта выпадения осадков. За то же время измерений ОПТИОС зарегистрировал около 0,05 мм осадков, выпадающих со средней интенсивностью около 0,1 мм/ч в течение 33 мин.

Во время события «дождь 2» измерения с помощью ОПТИОС проводились в течение около 4,5 мин, при этом было зарегистрировано 0,67 мм осадков, при средней интенсивности 9 мм/ч. Измерения М-99, производимые в течение 45 мин (включая 5 минут измерений с помощью ОПТИОС), показали интенсивность около 13 мм/ч. Расхождение в показаниях измерителей объясняется изменением интенсивности осадков с течением времени (рис. 2.37).

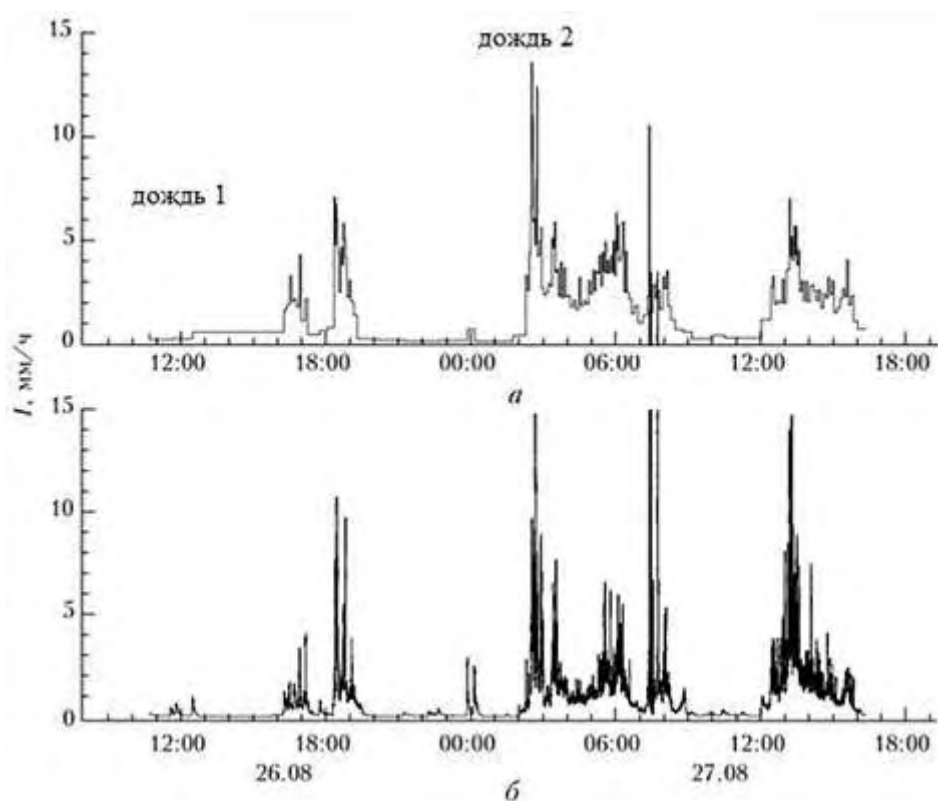


Рисунок 2.37 - Интенсивность осадков: *а* – референтный прибор (челночный осадкомер DavisRainCollector), *б*– ОПТИОС

Минимальная чувствительность измерений к количеству регистрируемых осадков оценивалась в соответствии с распределением Маршала-Пальмера с использованием соотношения

$$\rho(D) = N_0 e^{-\lambda D}, \quad (2.30)$$

где $N_0 = 0,08 \text{ см}^{-4}$ при любой интенсивности, а $\lambda = 41R^{-0,21} \text{ см}^{-1}$, где R – интенсивность дождя в мм/час.

На рисунке. 2.38 приведены результаты измерений распределения капель дождя по размерам.

Таким образом, при интенсивности дождя 0,02 мм/час в каждом кубическом метре находится около 50 капель. Принимая во внимание однородность распределения капель в пространстве, можно предположить, что для того, чтобы через измерительную площадь равную 50 см^2 прошла хотя бы одна частица, достаточно, чтобы на один квадратный метр поверхности выпало 800 частиц.

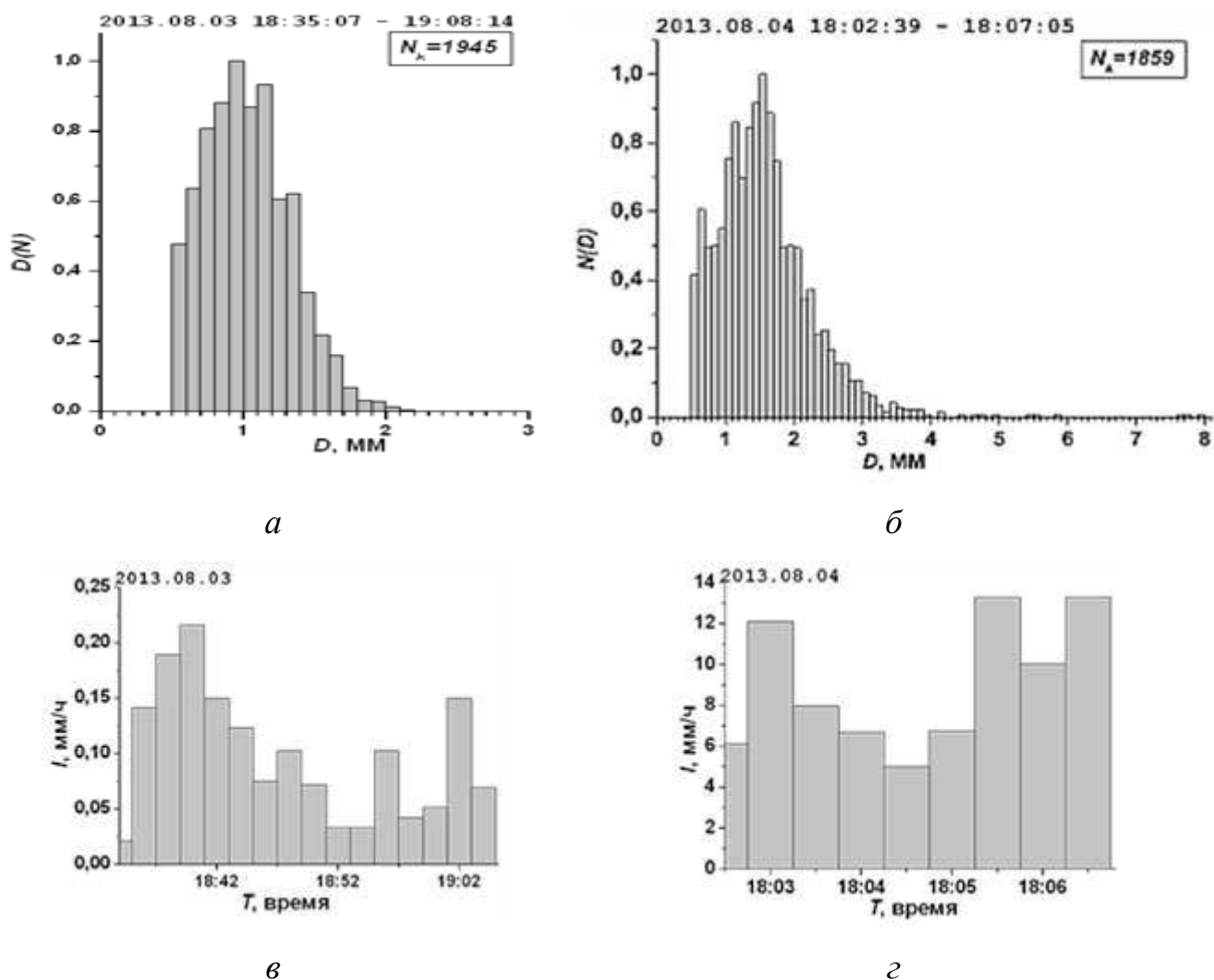


Рисунок 2.38 - Результаты натурных испытаний ОПТИОС: *a* – распределение по размерам капель дождя малой интенсивности («дождь 1»); *б* – распределение по размерам капель дождя средней интенсивности («дождь 2»); *в* – изменение интенсивности во времени для «дождя 1»; *г* – изменение интенсивности для «дождя 2»

Это условие эквивалентно требованию достижения этой поверхности всеми каплями, содержащимися при дожде интенсивностью 0,02 мм/час в восьми кубических метрах, (то есть поверхности должны достигнуть даже самые медленные капли, падающие с высоты 8 метров). Известно, что самыми медленными частицами осадков являются самые маленькие, размер которых при дожде составляет 0,5 мм [1]. Терминальная скорость падения таких частиц приблизительно равна 2 м/с. Таким образом, требуемое количество капель

гарантированно достигнет измерительной площади прибора, обеспечив регистрацию начала осадков, менее чем через 5 секунд после начала дождя. Количество воды A , которое выпадет с каплями, содержащимися в этих восьми кубических метрах, можно рассчитать используя соотношение

$$N = \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} \rho(D) dD, \quad (2.31)$$

следующим образом:

$$A = 8 \cdot 10^6 \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} v(D) \rho(D) dD. \quad (2.32)$$

При подстановке получаем: $A = 8 \cdot 10^6 \int_{0,03}^{10} 0,524 \cdot D^3 \cdot 0,08 \exp(-41 \cdot 0,02^{-0,21} \cdot D) dD$

dD , где $v(D)$ – объем капли диаметром D в кубических сантиметрах.

Таким образом, объем воды, приходящийся на 1 квадратный метр поверхности, приблизительно составит $A \approx 0,02 \text{ см}^{-3}$, чувствительность ОПТИОС к измерению количества осадков составит величину порядка $2 \cdot 10^{-4} \text{ мм}$.

Зимние испытания ОПТИОС проводились при следующих условиях: температура воздуха – от минус 4,7 °С до минус 5,9 °С, скорость ветра – от 2 до 5 м/с, длительность измерений – 20 мин [130]. На рис. 2.40 – 2.43 представлены некоторые результаты измерений характеристик снегопада, демонстрирующие возможности разработанного осадкомера. С помощью этих измерений определены характерные формы и размеры снежинок, получены и проанализированы зависимости скорости падения снежинок от их размера и пр.

Представленные результаты лабораторных и натурных испытаний ОПТИОС показывают широкие возможности разработанного прибора. В настоящее время он подготавливается к сертификационным испытаниям в Росстандарте.

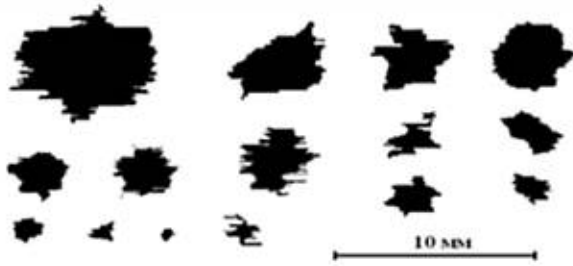


Рисунок 2.40 - Теневые изображения
снежинок

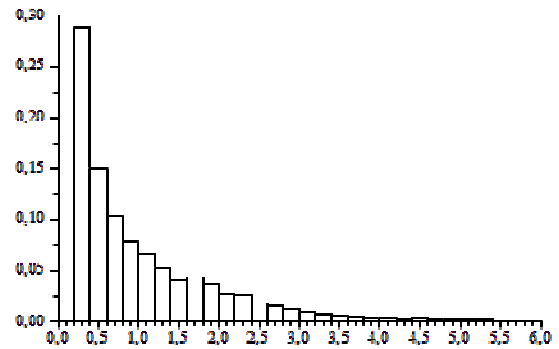


Рисунок 2.41 - Распределение
снежинок по размерам

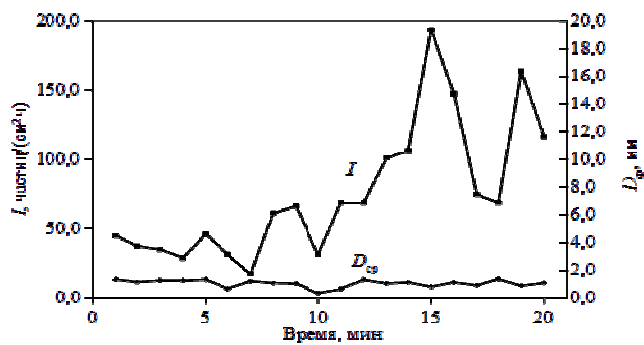


Рисунок 2.42 - Изменение интенсивности I и
изменение среднего размера снежинок D_{cp} за
время измерений

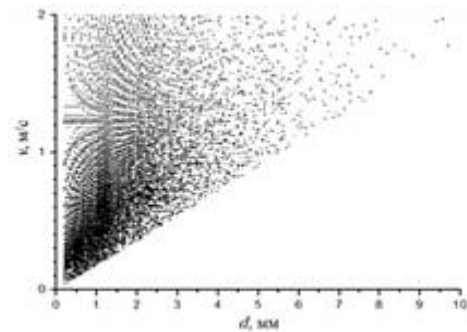


Рисунок 2.43 - Скорость
падения снежинок в
зависимости от размера

2.3 Ультразвуковые автоматические метеорологические станции нового поколения

2.3.1 Стационарные ультразвуковые автоматические метеорологические станции

2.3.1.1 На основе результатов разработки ультразвуковых термоанемометров, представленных в п.2.1.1, под руководством автора разработаны стационарные ультразвуковые [131, 132] автоматические метеорологические станции (УАМС): АМК-01, АМК-02. Они послужили

прототипами УАМС АМК-03, которая освоена в серийном производстве) [133, 134].

Измерительный блок АМК-03 представляет собой 3D-УТА ДСВ-15 (или УТАМ-75) (см. рис. 2.3 и 2.4) с интегрированными в него сенсорными датчиками влажности воздуха (НН-4602, компания Honeywell, США) и атмосферного давления (РКМА-016, СКТБ ЭлПА, Россия).

Наличие в составе АМК-03 электронного компаса и датчиков углов наклона метеомачты обеспечивает возможность измерения в автоматическом режиме скорости горизонтального и вертикального ветра и его направления.



Рисунок 2.44 - УАМС АМК-03: внешний вид и структурная схема

Распределенная система обогрева обеспечивает функционирование УАМС в критических погодных условиях – при низких температурах окружающей среды, а также в условиях обледенения, налипания мокрого снега и т.п. Работа системы основана на осуществлении подогрева электронных плат УАМС (до обеспечения рабочей температуры внутри блока не ниже минус 30 °С) и незначительного подогрева электроакустических преобразователей до температуры, обеспечивающей их штатную работу (см. рис. 2.45). Ультразвуковой метод измерения температуры воздуха в отличие от контактных методов, в которых

необходимо устанавливать режим термодинамического равновесия между датчиком и контролируемой средой, допускает возможность принудительного нагрева элементов измерительного устройства (в частности, ЭАП), при этом не вносится ошибка измерения температуры, обусловленная этим нагревом.

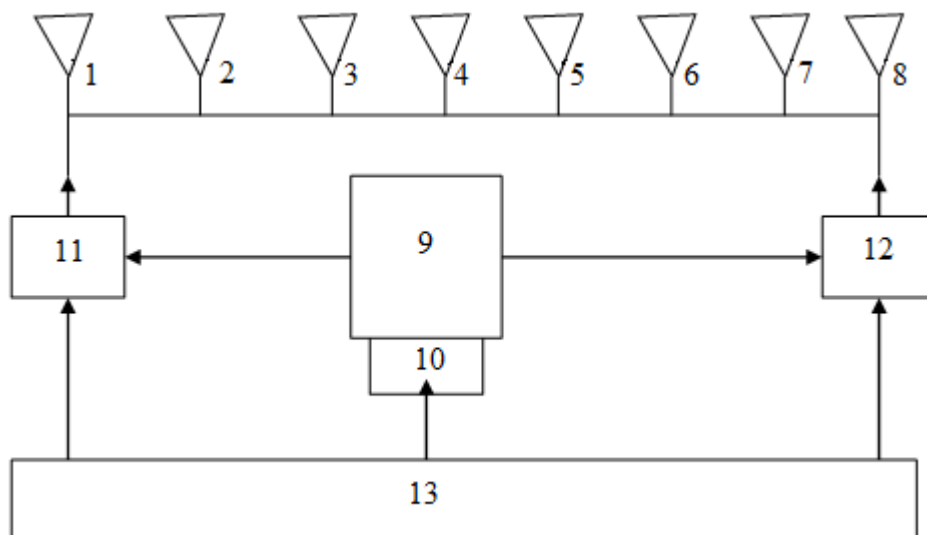


Рисунок 2.45 - Блок-схема распределенной системы обогрева УАМС АМК-03: 1÷8 – нагреватели ЭАП, 9 – управляющий микроконтроллер, 10 – датчик температуры, 11 – электронный ключ, 12 – ручной ключ, 13 – блок питания нагревательных элементов

Система обогрева имеет два основных режима работы: режим компенсации низких температур и антиобледенительный режим. В первом режиме система обогрева включается автоматически при включении УАМС в целом, при этом специальный контактный датчик 10 контролирует температуру внутри корпуса УАМС. Если температура ниже минус 30°C, с датчика поступает сигнал на управляющий процессор 9, и тот направляет команду на электронные ключи 11 и 12, под действием которой ток от источника 13 поступает на нагревательные элементы 1÷8 (в качестве нагревательного элемента ЭАП использована нихромовая спираль, навитая непосредственно на боковую поверхность электроакустического преобразователя (см. рис. 2.6). Выключение обогрева происходит автоматически при достижении температуры внутри блока значения минус 30°C (ключи 11 и 12 закрываются по команде процессора 9).

Во втором режиме включение системы происходит при достижении температуры окружающего воздуха диапазона 0 ± 5 °С и одновременном появлении сбоев в вычисляемом процессором 9 массиве значений температур. При совпадении этих двух факторов процессор 9 выдает на электронный ключ 11 команду включения подогрева электроакустических преобразователей 1÷8. Принцип работы системы следующий: конденсация и последующее замерзание осадков, приводящие к обледенению термоанемометра, происходит именно в указанном температурном диапазоне. Если этот процесс имел место, и интенсивность его была достаточно велика, то в результате ухудшения условий работы электроакустических преобразователей возникают сбои в массиве первичных данных, поступающих на процессор, вплоть до их 100%-ой браковки. Совпадение этих факторов является признаком обледенения термоанемометра и требует включения системы обогрева. При исчезновении одного из этих факторов система автоматически отключается и подогрев электроакустических преобразователей прекращается. В системе предусмотрена также возможность ее принудительного включения оператором (посредством электронного ключа 12) для предотвращения воздействия других схожих редко встречающихся факторов, например, налипания мокрого снега.

В работе экспериментально определялась требуемая мощность нагрева электронного блока и электроакустических преобразователей, а также изучалась возможность искажения температурного поля рабочей зоны термоанемометра, вызванная этим нагревом. В результате этих исследований было установлено:

- а) оптимальная мощность подогрева электронного блока составляет 0,5 Вт;
- б) оптимальная мощность подогрева электроакустических преобразователей составляет 1,0 Вт;
- в) длительная работа системы даже в условиях закрытой термокамеры (в отсутствии обдува термоанемометра) не приводит к искажениям температурного поля рабочей зоны ДСВ-15, превышающих погрешность измерений.

На рис. 2.46 проиллюстрированы результаты испытаний системы распределенного обогрева в условиях обледенения. При сильном обмерзании

ЭАП термоанемометра (рис. 2.46, *а*) вначале увеличивалось число «сбоев», затем первичные данные для расчета значений скорости ветра и температуры воздуха прекращали поступать в процессор устройства. После включения системы обогрева наледь на ЭАП быстро исчезала (рис. 2.46, *б*), и 3D-УТА самостоятельно возвращался в рабочее состояние.

*а**б*

Рисунок 2.46 - Функционирование АМК-03 в условиях обледенения: *а* – блок ДСВ-15 с выключенной системой обогрева (рабочие поверхности ЭАП покрыты льдом); *б* – блок ДСВ-15 после включения системы обогрева (рабочие поверхности ЭАП свободны от льда, на дугах арматуры – остатки инея)

Основные технические характеристики УАМС приведены в табл. 2.7.

Климатическое исполнение метеостанции АМК-03 соответствует требованиям ГОСТ 15150-69 по группе УХЛ (умеренный и холодный климат) и Т (тропический климат), но с учетом описанной выше системы обогрева метеостанция АМК-03 может эксплуатироваться так же в арктических условиях при температурах окружающей среды до минус 70 °С.

Таблица 2.7 - Основные технические характеристики АМК-03

Измеряемая величина	Диапазон измерения	Погрешность измерения
Скорость горизонтального ветра (V)	от 0,1 до 40 м/с	$\pm (0,1 + 0,02 V)$ м/с
Скорость вертикального ветра (w)	от -15 до $+15$ м/с	$\pm (0,1 + 0,02 w)$ м/с
Направление ветра (D)	от 0 до 360°	$\pm 2^\circ$
Температура воздуха (T)	от минус 55 до плюс 50°C	$\pm 0,3^\circ\text{C}$
Относительная влажность воздуха (r)	от 15 до 100 %	$\pm (2,5 \div 5)$ %
Атмосферное давление (P)	от 520 до 800 мм рт. ст.	$\pm 0,8$ мм рт. ст.

Для организации производства УАМС АМК-03 под руководством и при непосредственном участии автора разработан комплект технической и конструкторской документации на изделие «Комплекс автоматизированный измерительный «Автономная метеорологическая станция АМК-03 (технические условия АМЯ2.702.089ТУ, комплект рабочей конструкторской документации АМЯ2.702.089, паспорт АМЯ2.702.089ПС и пр.). На основании разработанной документации в ООО «Сибаналитприбор» (г. Томск) организовано промышленное производство изделий.

2.3.1.2 Трехуровневая стационарная УАМС АМК-03\ЗУ(О) с функцией контроля параметров осадков разрабатывалась с учетом требований Всемирной метеорологической организации (ВМО) и Гидрометцентра России о порядке проведения измерений метеорологических величин, предусматривающих следующие правила:

- измерение скорости и направления ветра производится на высоте 10 – 12 метров над подстилающей поверхностью,
- измерения температуры и влажности воздуха производится на высоте 2-х метров над подстилающей поверхностью;

- измерения параметров осадков производится на высоте 2-х метров над подстилающей поверхностью.

Для реализации этих требований, а также для проведения натурных исследований новых технологий контроля состояния атмосферы, разработан экспериментальный образец УАМС АМК-03\ЗУ(О), в состав которой входят три идентичных измерительных блока ДСВ-15Б, оптический измеритель осадков ОПТИОС, промышленный компьютер типа NEXCOM NISE-2200, контроллер питания, бокс-контейнер, комплект соединительных кабелей и мачта МАРС-3-15 (см. рис. 5.17, б) [134].

Два измерительных блока ДСВ-15Б устанавливаются на мачте МАРС-3-15 непосредственно друг над другом на высотах 2 и 10 м и служат для измерения метеорологических характеристик атмосферы на высотах, соответствующих требованиям Росгидромета. Третий измерительный блок устанавливается на метеомачте на высоте $28 \div 30$ метров и образует совместно с двумя нижними трехуровневую измерительную систему. Дополнительно, измерительная система комплектуется датчиком температуры подстилающей поверхности ДПТ-01. В нижней части мачты устанавливается измеритель осадков ОПТИОС, бокс-контейнер с кабельным коллектором, в который заводится внешнее питание АМК-03\ЗУ(О), а также питающие и информационные кабели от измерительных блоков. Внутри бокса-контейнера размещены контроллер питания и промышленный компьютер NEXCOM NISE-2200, на котором установлено программное обеспечение ("METEO 3.0", «METEO DB», «METEO DP» и «OPTIOScore»). В боксе предусмотрен подогрев установленных в нем устройств при температуре окружающего воздуха ниже минус 20°C (см. рис. 5.20).

Для изготовления УАМС АМК-03\ЗУ(О) под контролем автора разработан комплект эскизной конструкторской документации АМЯ2.702.110, по которому в ООО «Сибаналитприбор» изготовлено 4 экспериментальных образца метеокомплекса. УАМС АМК-03\ЗУ(О) использована в качестве сетевой станции, входящей в состав автоматизированной информационно-вычислительных

системы, предназначенной для мезомасштабного метеорологического и экологического контроля состояния АПС (см. главу 5).

На рис. 2.48÷2.55 приведены некоторые результаты синхронных измерений динамики поведения метеорологических и турбулентных характеристик приземной атмосферы, выполненные УАМС АМК-03\3У(О). Измерения проводились в марте 2016 г. с 11:30 по 15:30 местного времени на высотных уровнях 2, 8 и 28 метров с 10-минутным усреднением и 10-минутным интервалом времени между регистрируемыми отсчетами для метеорологических параметров.

Приведенные рисунки демонстрируют уникальные возможности разработанной УАМС АМК-03\3У(О) и ее программного обеспечения в задачах исследования АПС на разных высотных уровнях.

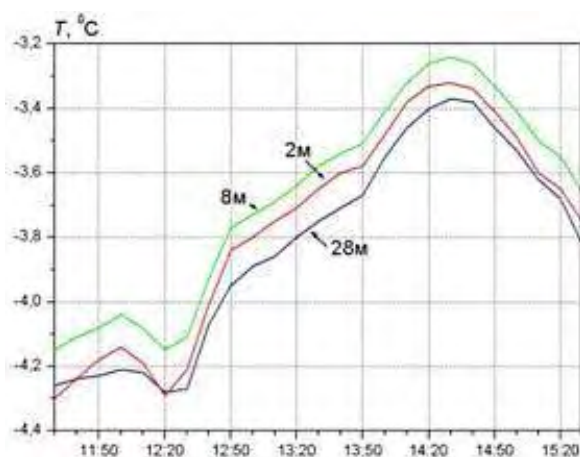


Рисунок 2.48 - Средняя температура воздуха

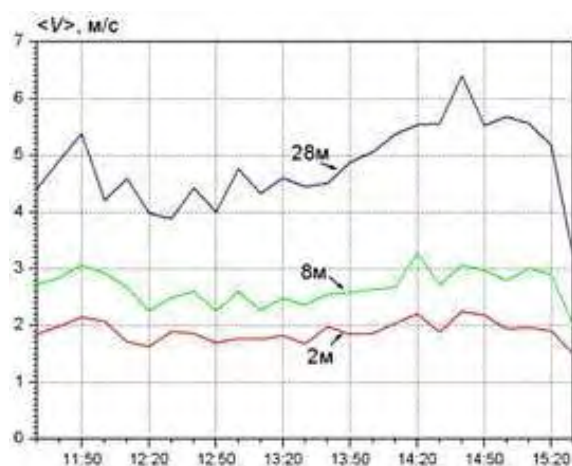


Рисунок 2.49 - Средняя скорость горизонтального ветра

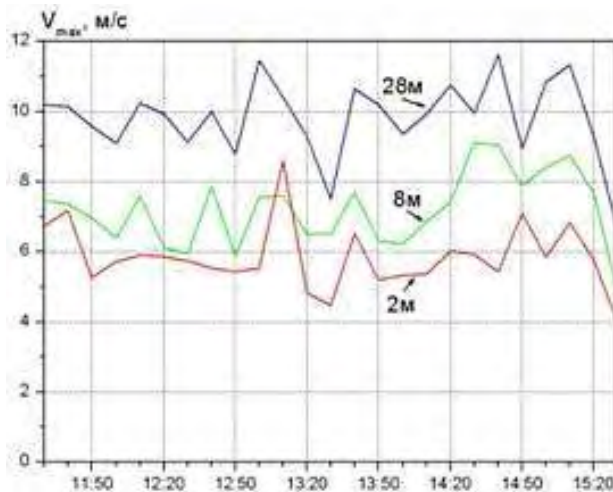


Рисунок 2.50 - Максимальная (за 10 минутный интервал измерений) мгновенная (фактически с 2-х секундным усреднением) скорость горизонтального ветра

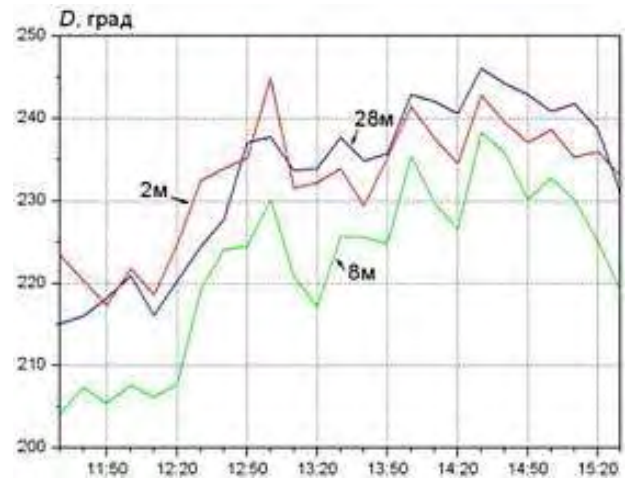


Рисунок. 2.51 - Направление горизонтального ветра (D)

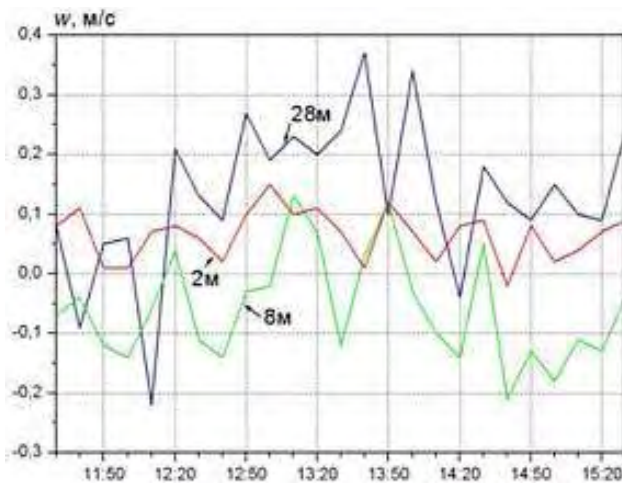


Рисунок 2.52 - Средняя скорость вертикального ветра

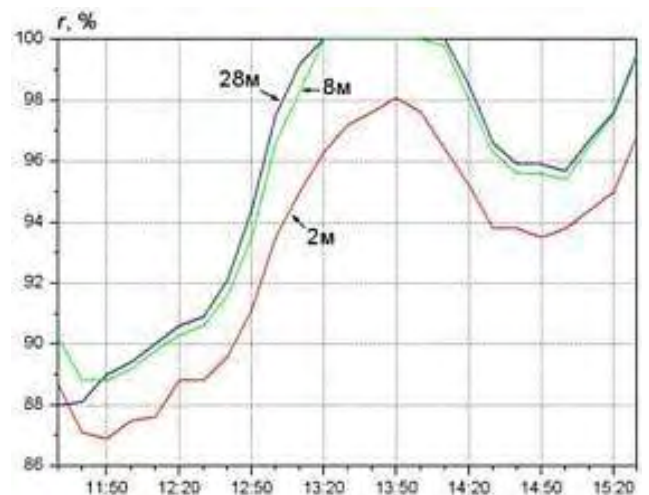


Рисунок 2.53 - Относительная влажность воздуха

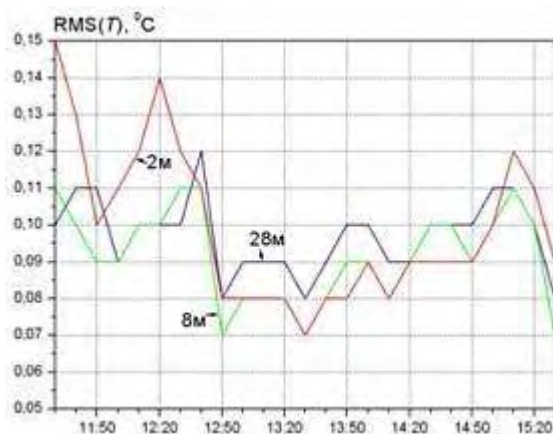


Рисунок 2.54 - Среднеквадратичное отклонение для турбулентных флуктуаций температуры (дает информацию о величине потенциальной энергии атмосферной турбулентности)

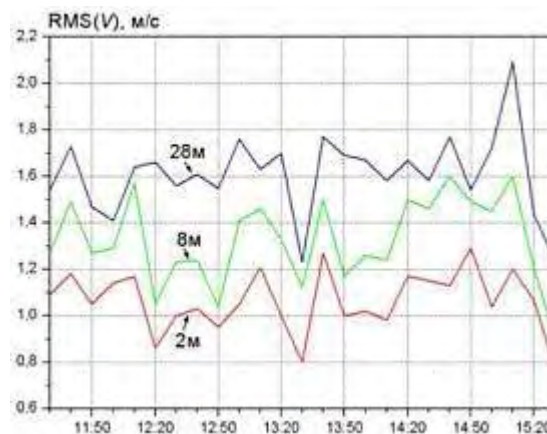


Рисунок 2.55 - Среднеквадратичное отклонение для турбулентных флуктуаций скорости горизонтального ветра (дает информацию о величине кинетической энергии атмосферной турбулентности)

2.3.2 Переносные метеорологические комплексы специального назначения

2.3.2.1 Для осуществления периодических, относительно кратковременных измерений метеорологических и турбулентных характеристик приземного слоя атмосферы в полевых условиях разработаны переносные автоматизированные метеорологические комплексы (ПАМК) [136].

К ПАМК предъявляется ряд специальных требований, связанных с особенностями их эксплуатации:

- 1) повышенная устойчивость к воздействию ударных и вибрационных нагрузок, возникающих при многократной транспортировке и разворачивании (свертывании) метеоконплекса;
- 2) возможность достаточно длительной автономной работы в условиях отсутствия внешних источников электропитания;
- 3) возможность применения на метеорологически не подготовленных площадках: поэтому в его состав должны входить все необходимое оборудование, обеспечивающую установку и пространственную ориентацию измерительных

устройств в соответствии с принятой методикой измерений (метеомачта с комплектом крепежных элементов, система азимутальной ориентации и т.п.);

4) небольшой вес и габариты, позволяющие транспортировать его одним человеком в пешем порядке;

5) специализированные ПАМК военного назначения должны иметь малое время развертывания (свертывания) и минимальное число обслуживающего персонала (не более одного человека).

В силу противоречивости этих требований (в частности, минимизация веса и габаритов при обеспечении условий измерений метеорологических величин, автономность и, при этом, достаточно продолжительная длительность функционирования) создание ПАМК является нетривиальной технической задачей, которая не может быть качественно выполнена на основе комбинирования стандартных средств измерений метеорологических величин (чашечных анемометров, флюгарок, контактных твердотельных термометров, манометров, психрометров и пр.).

Для решения этих задач при разработке ПАМК применены основные технические решения, использованные при создании УАМС АМК-03: ультразвуковой 3D-термоанемометр ДСВ-15 (см. п.2.1.2) и компьютерная программа «МЕТЕО 3.0» [102].

2.3.2.2 Переносной метеокомплекс «ЭКСМЕТЕО» является автономным устройством и предназначен для выполнения измерений на неподготовленных площадках (см. рис. 2.57, 2.58) [138]. В состав метеокомплекса входят:

- ультразвуковой датчик метеопараметров ДСВ-15 (см. рис. 2.3,б);
- комплект датчиков температуры почвы (4 канала) ДТР-15 (рис. 2.57,д);
- блок регистрации датчиков температуры почвы БРТ-10 (рис. 2.57,е);
- пульт управления и индикации ППУ-25 (рис. 2.58,а);
- универсальный блок питания/интерфейс БППИ-01 (рис. 2.58,б);
- блок сбора информации логгер БСИ-11 (рис. 2.58,в);
- GPRS-контроллер передачи данных (2 канала сотовой связи) (рис. 2.57,з);
- GPS-навигатор;

- герметичный транспортный контейнер-укладка (рис. 2.57,б);
- метеомачта разборная ($h = 4\text{м}$) с комплектом крепежной арматуры (рис. 2.3,в);
- аккумуляторная батарея (2 шт.);
- зарядное устройство для аккумуляторной батареи;
- комплект соединительных кабелей;
- комплекты программного обеспечения.

Все измерительные и сервисные устройства укладываются в ударопрочный герметичный транспортный контейнер (рис. 2.57,б). Разборная метеомачта с приспособлениями для ее установки на грунте размещена в отдельной сумке-укладке (рис. 2.57,в).

*а**б**в**г**д**е*

Рисунок 2.57 - Метеокомплекс «ЭКСМЕТЕО»: *а* – развернутое положение; *б* – укладка в транспортном контейнере; *в* – сумка с разборной мачтой; *г* – GPRS-контроллер; *д* – ДТР-15; *е* – БРТ-10



а



б



в

Рисунок 2.58. -Составные части «ЭКСМЕТЕО»: а – пульт ППУ-25; б – блок питания БПИИ-01; в – логгер БСИ-11

Функциональная схема метеокомплекса приведена на рисунке 2.59 [138].

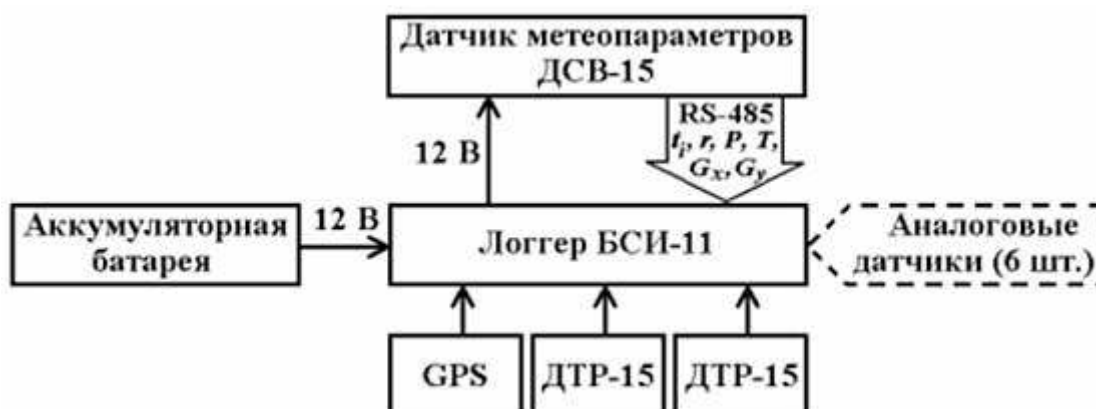


Рисунок 2.59 - Блок-схема мобильного метеокомплекса «ЭКСМЕТЕО»

Блок ДСВ-15 и ДТП-15 выполняют первичные измерения метеорологических параметров (скорость и направление ветра, температура и влажность воздуха, атмосферное давление, температура почвы). Блок регистрации БРТ-10 обеспечивает передачу данных с датчиков ДТП-15 в блок сбора и накопления информации БСИ-11, который осуществляет синхронизацию работы основного блока измерения метеопараметров ДСВ-15, датчиков температуры почвы ДТП-15 и сервисных устройств – GPS-навигатора, GPRS-контроллера и др. GPS-навигатор позволяет осуществлять временную привязку измеряемых метеопараметров и координаты выполнения измерений. GPRS-контроллер обеспечивает возможность передачи измеренных метеоданных в режиме

реального времени на центральный сервер. Блок питания/интерфейс БППИ-01 обеспечивает электропитание измерительного комплекса от стационарной сети переменного тока или от внешнего источника постоянного тока напряжением 12 В.

Переносной автоматизированный метеокомплекс «ЭКСМЕТЕО» входит в состав созданной при выполнении настоящей работы автоматизированной измерительно-вычислительных системы ЭО ИВС, предназначенной для мезомасштабного метеорологического и экологического контроля состояния АПС (см. главу 5).

Переносной метеокомплекс «ЭКСМЕТЕО» включен в отчеты СО РАН и РАН в качестве важнейших научных итогов 2009 года.

Переносной автоматизированный метеокомплект 1Б65 (аналог «ЭКСМЕТЕО») является автономным устройством и предназначен для выполнения метеорологических измерений в полевых условиях. Метеокомплект 1Б65 является изделием военного назначения, принят на снабжение Вооруженных Сил РФ и с 2007 года используется в войсках вместо десантного метеокомплекта ДМК-1. Метеокомплект (рис.2.60) полностью размещается в ранцевом герметичном контейнере, приспособленном для переноски одним человеком. Конструкция изделия способна выдерживать интенсивные механические нагрузки при воздействии:

- синусоидальной вибрации в диапазоне частот от 1 до 80 Гц с амплитудой виброускорения 39 м/с^2 (4g),
 - механических ударов с пиковым ускорением до 59 м/с^2 (6g) при длительности действия ударного ускорения до 4 мс и с ускорением 196 м/с^2 (20g) при длительности действия 0,2 с,
 - механических ударов многократного действия с ускорением 147 м/с^2 (15g) при длительности действия от 5 до 10 мс,
- которые предусмотрены требованиями ГОСТ РВ 20.39.304-98 и допускает возможность парашютного десантирования его совместно с человеком.

В состав метеокомплекта 1Б65 входят:

- ультразвуковой датчик метеопараметров УГИ (аналог ДСВ-15);
- пульт управления и индикации ВиИ (аналог ППУ-25);
- метеомачта разборная ($h = 4\text{м}$) с комплектом крепежной арматуры;
- комплект аккумуляторных батарей (2 шт.);
- зарядное устройство для аккумуляторной батареи;
- комплект соединительных кабелей;
- герметичный транспортный контейнер-укладка;
- комплект базового программного обеспечения «МЕТЕО 3.0».

В изделии 1Б65 весь комплект размещается в одном ранце-контейнере.



а



б



в

Рисунок 2.60 - Метеокомплект 1Б65: *а* –развернутое положение; *б* – укладка в контейнере-ранце; *в* – транспортировка 1Б65 в пешем порядке

Основные эксплуатационные характеристики ПАМК 1Б65:

- высота подъема ультразвукового датчика метеопараметров на метеомачте – 4 м;
- общий вес в транспортном контейнере – не более 18 кг;

- время развертки метеокомплекса из транспортного положения в рабочее – не более 10 мин.
- длительность непрерывной работы от штатного комплекта аккумуляторных батарей – не менее 96 час;
- метеокомплекс обеспечивает работоспособность всех входящих в него блоков и конструктивных элементов в диапазоне температур от плюс 50°C до минус 55°C.

В табл. 2.8 приведены метрологические характеристики разработанных переносных метеокомплектов.

Таблица 2.8 - Метрологические характеристики ПАМК «ЭКСМЕТЕО» и 1Б65

Измеряемая величина		Диапазон измерения	Погрешность измерения
ПАМК «ЭКСМЕТЕО»	ПАМК 1Б65		
Температура почвы (T_n) (4 канала)	-	от минус 20 до плюс 40°C	$\pm 0,2^\circ\text{C}$
Скорость горизонтального ветра (V)		от 0,1 до 30 м/с	$\pm 0,25$ м/с
Скорость вертикального ветра (w)		от минус 15 до плюс 15 м/с	$\pm 0,25$ м/с
Направление ветра (D)		0 ÷ 360°	$\pm 2^\circ$
Температура воздуха (T)		от минус 50 до плюс 50 °C	$\pm 0,3$ °C
Относительная влажность воздуха (r)		от 15 до 100 %	± 5 %
Атмосферное давление (P)		от 520 до 800 мм рт. ст.	$\pm 0,8$ мм рт. ст.

Для организации производства переносных метеорологических комплексов под руководством и при непосредственном участии автора разработан комплект технической и конструкторской документации на изделие «Переносной автоматизированный метеокомплект 1Б65» (технические условия АМЯ2.702.090ТУ, комплект рабочей конструкторской документации АМЯ2.702.090, паспорт АМЯ2.702.090ПС и пр.). Рабочей конструкторской документации присвоена литера О₁. На основании разработанной документации в ООО «Сибаналитприбор» (г. Томск) организовано промышленное производство изделий военного назначения ПАМК 1Б65 и их гражданских аналогов (АМК-03П, ЭКСМЕТЕО).

2.3.3 Бортовые метеорологические комплексы специального назначения

2.3.3.1 Бортовые метеорологические комплексы предназначены для размещения на различных транспортных средствах – автомобилях, бронетранспортерах, кунгах и т.п. [137, 139, 140, 141].

Бортовые модификации дополнительно включают в свой состав метеомачту с электромеханическим приводом подъема/опускания и автоматически открывающийся защитный контейнер, в котором в транспортном положении находится блок измерения метеорологических параметров ДСВ-15. Метеомачта с приводом и защитный контейнер располагаются на крыше транспортера и управляются из его кабины с помощью дополнительного пульта управления. Процесс перехода метеокомплекса в рабочее состояние и возвращения его в транспортное положение полностью автоматизирован и не требует выхода оператора метеокомплекса из кабины транспортера [139].

2.3.3.2 Модификация БМК-01 (рис. 2.61) разработана по заказу ГУВР МО РФ (ОКР «Городище-СО») для работы в составе системы определения дальности звучания звуковещательного комплекса высокой мощности [140]. БМК-01 размещается на крыше десантного отсека бронетранспортера БТР-80 непосредственно позади звуковещательной установки. Для подъема и опускания телескопической метеомачты использован электромеханический привод, основанный на принципе «выталкивающего троса». БМК-01, так же, как и все более поздние модификации бортовых метеокомплексов, имеет встроенную систему контроля углов наклона метеомачты относительно горизонта, позволяющую вычислять значения горизонтальной и вертикальной скорости ветра при произвольных наклонах транспортера (в пределах ± 20 градусов), направление ветра отсчитывается от направления продольной оси транспортера.

Бортовая мобильная система оперативного прогнозирования дальности и качества звукового вещания, в состав которой входит метеокомплекс БМК-01, прошла МВК и государственные испытания и была включена в отчеты СО РАН и РАН в качестве важнейших научных достижений 2003 года.

2.3.3.3 Бортовой метеокомплекс АМК-Б (рис. 2.62) входит в комплектацию изделия ГО.1.26.02 (производство ООО «Центр СК «Вектор», г.Москва), предназначенного для работы в составе комплекса аппаратуры разведки радиохимического и биологического заражения местности (машина РХМ-6, войска РХБЗ) [141].

Наряду с измерением метеорологических величин метеокомплекс АМК-Б позволяет определять параметр «степень вертикальной устойчивости воздуха (ВУВ)», используемый для прогнозирования характера распространения очага химического или биологического загрязнения местности.



Рисунок 2.61 - БМК-01 в составе бортовой системы оперативного прогнозирования дальности и качества звукового вещания. Справа вверху – метеокомплекс с телескопической метеомачтой; справа внизу – пульт управления метеокомплексом

При этом на пульте производится индикация характеристики ВУВ: «ИЗОТЕРМИЯ», «КОНВЕКЦИЯ» или «ИНВЕРСИЯ» и выводятся численные значения термодинамического критерия «ТК» и температурного градиента «ГАММА» (см. п. 5.1.3.1 в главе 5).



Рисунок 2.62- Бортовой метеокомплекс АМК-Б машины разведки радиационной и химической зараженности местности (УРХБЗ МО РФ).

Измерительный блок метеокомплекса установлен на выдвижной метеомачте (высота 2 м)

2.3.3.4 Модификация 1Б65Б разработана по заказу ГРАУ МО РФ для работы в составе системы управления артиллерийским огнем комплекса 1В197 (рис. 2.63) [141]. Метеокомплекс обеспечивает в режиме реального времени контроль метеорологических характеристик в районе артиллерийской позиции и выдачу метеоданных в автоматическом режиме в бортовую ЭВМ машины управления 1В1002. Технические характеристики метеокомплекса 1Б65Б соответствуют требованиям ГОСТ РВ 20.39.304-98 (группа исполнения 1.6.5), что позволяет устанавливать его на различные типы гусеничных и колесных машин военного и гражданского назначения. Устойчивость метеокомплекса 1Б65Б к воздействию вибрационных и ударных нагрузок обеспечивается оригинальной конструкцией измерительного блока, а также автоматической системой контроля функционирования и восстановления метрологических характеристик АСКФ (см. п.2.4 в главе 2).

Основные эксплуатационные характеристики метеокомплекса 1Б65Б:

- высота подъема датчика метеопараметров – 4 метра;
- время перехода из транспортного положения в боевое – не более 3 минут;

- вес метеомачты с приводом разворачивания и датчиком метеопараметров – 70 кг;
- электрическое питание – напряжение 27^{+3}_{-5} В постоянного тока;
- потребляемая мощность: 15 Вт (в режиме измерения метеопараметров), 270 Вт (в режиме разворачивания и свертывания).



Рисунок 2.63 - Бортовой метеорологический комплекс (изделие 1Б65Б)
в составе машины управления 1В1002 комплекса 1В197 (справа -
развернутое состояние комплекса)

Бортовой метеокомплекс 1Б65Б (АМК-03Б – в гражданском исполнении) устанавливается также на колесные машины специального (гражданского) назначения (см. рис. 5.18).

Метеокомплекс АМК-03Б включен в отчет СО РАН в качестве важнейших научных итогов 2008 года.

Для организации производства бортовых метеорологических комплексов под руководством и при непосредственном участии автора разработаны комплекты технической и конструкторской документации на изделия «Бортовой метеорологический комплекс 1Б65Б» (технические условия АМЯ2.702.093ТУ, комплект рабочей конструкторской документации АМЯ2.702.093, паспорт

АМЯ2.702.093ПС и пр.) и «Бортовой метеорологический комплекс АМК-Б» (технические условия АМЯ2.702.092ТУ, комплект рабочей конструкторской документации АМЯ2.702.092, паспорт АМЯ2.702.092ПС и пр.) Рабочей конструкторской документации присвоена литера О₁. На основании разработанной документации в ООО «Сибаналитприбор» (г. Томск) организовано промышленное производство изделий военного назначения 1Б65Б и АМК-Б и их гражданских аналогов.

2.3.4 Метрологическое обеспечение и результаты испытаний УАМС

2.3.4.1 Исследования метрологических характеристик УАМС АМК-03 и его модификаций выполнялись с использованием экспериментальных методов и методов численного моделирования. Экспериментальные исследования подразделялись на лабораторные и натурные.

Для подтверждение основных метрологических характеристик разработанных УАМС АМК-03 выполнялся комплекс лабораторных испытаний. С этой целью было использовано оборудование испытательных баз Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (г. Томск), Института теоретической и прикладной механики СО РАН (г. Новосибирск), ООО «Сибаналитприбор» (г. Томск), ФГУП Сибирский государственный научно-исследовательского института метрологии (г. Новосибирск). Метрологические характеристики тестируемых УАМС определялись методом проведения сравнительных испытаний с эталонными средствами измерений в контролируемых условиях во всем диапазоне изменения определяемых метеорологических параметров [142, 143].

В табл. 2.9 приведен перечень основных видов контрольно-испытательного и измерительного оборудования, используемого для проведения метрологической аттестации метеокомплекса АМК-03 и его модификаций (рис. 2.65), и виды выполняемых на этом оборудовании испытаний.

Таблица 2.8 - Контрольно-испытательное оборудование

№ п\п	Контрольно-испытательное оборудование	Основные технические характеристики	Вид испытаний
1	Труба аэродинамическая Т-324 (Т-201) с дополнительным оборудованием: а) наклонный микроанометр Н-1000 б) психрометр аспирационный МВ-4М в) барометр М67	- максимальная скорость создаваемого потока воздуха – до 100 м/с; - коэффициент турбулентности создаваемого потока воздуха – не более 0,1 %; - коэффициент неравномерности скорости потока воздуха по сечению – не более 0,1 %.	1) Проверка диапазона измерений скорости горизонтального и вертикального ветра. 2) Проверка диапазона измерений направления горизонтального ветра 3) Проверка погрешности измерений скорости горизонтального и вертикального ветра.
2	Платформа угломерная	Угол поворота – до 90°, погрешность установки угла – 0,5°.	
3	Климатермокамера КТК 800	Полезный объем 860 л, диапазон температур – от -70 до +90 °С, диапазон влажности – от 10 до 100 %.	1) Проверка диапазона и погрешности измерения температуры воздуха. 2) Проверка устойчивости к воздействию повышенной и пониженной температуры.
4	Многоканальный прецизионный измеритель/регулятор температуры МИТ 8.10	Диапазон измеряемых температур – от -200 до +500 °С, погрешность измерения температуры - $\pm 0,0035$ °С	
5	Блок дополнительной термостабилизации	Полезный объем - 60 л	
6	Камера тепла и влаги FEUTRON 3626/51.	Емкость - 630 л; диапазон температур – от минус 70 до +100 °С; диапазон влажности – от 10 до 100 %.	1) Проверка диапазона и погрешности измерения относительной влажности воздуха. 2) Проверка устойчивости к воздействию повышенной влажности. 3) Проверка
7	Термогигрометр «ИВА-6Б»	диапазон измерения относительной	

	с датчиком ДВ2ТСМ-3Т-2П-Б,	влажности – от 0 до 100 % в диапазоне температур от - 40 до + 60 °С, погрешность измерения ± 1 %	устойчивости к воздействию конденсированных осадков (роса, иней)
8	Термобарокамера ТВВ-1000	Емкость - 1000 л; диапазон температур – от - 70 до +120 °С, диапазон давлений – от атмосферного до 1 тор.	1) Проверка диапазона и погрешности измерения атмосферного давления. 2) Проверка устойчивости к воздействию атмосферного пониженного давления.
9	Барометр образцовый БОП-1М-1	диапазон измерения абсолютного давления – от 300 до 1100 гПа, погрешность измерения давления - $\pm 0,1$ гПа	
10	Стенд вибрационный ВЭД-200	Частота - от 5 до 5000 Гц, Амплитуда - от 0 до 40 g	Проверка устойчивости к воздействию синусоидальной вибрации.
11	Стенд ударный СУ-1	Амплитуда ускорения - от 10 до 150 g, частота ударов – от 10 до 100 мин ⁻¹ .	Проверка устойчивости к воздействию механических ударов.



Рисунок 2.64 - УАМС АМК-03 в аэродинамической трубе Т-201

Метрологическое обеспечение метеорологических станций представлено разработанной под руководством и при непосредственном участии автора документацией:

1) Автономная метеорологическая станция АМК-03. Технические условия АМЯ2.702.089 ТУ и Методики поверки АМЯ2.702.089 Д1.

2) Изделие 1Б65. Технические условия АМЯ2.702.090 ТУ и Методики поверки АМЯ2.702.090 Д5.

3) Изделие 1Б65Б. Технические условия АМЯ2.702.093 ТУ и Методики поверки АМЯ2.702.093 Д5.

4) Изделие АМК-Б. Технические условия АМЯ2.702.092 ТУ и Методики поверки АМЯ2.702.092 Д5.

По результатам сертификационных испытаний внесены в Государственный реестр средств измерений РФ:

1) Автономная метеорологическая станция АМК-03 (сертификат типа средств измерения РФ RU.C.28.007.A №29530);

2) ПАМК 1Б65 (сертификат типа средств измерения РФ военного назначения RU.C.28.018.B №23068);

3) Бортовой метеокomплекс АМК-Б (в составе изделия ГО.1.26.02) (сертификат типа средств измерения РФ военного назначения RU.C.28.018.B №20777).

2.3.4.2 Отдельные виды метрологических испытаний УАМС, связанные с определением турбулентных параметров реальной атмосферы, с особенностями функционирования УАМС в условиях различных видов осадков, например, ледяного дождя и т.п., не могут быть выполнены в лабораторных условиях. Для выполнения таких исследований проводятся натурные испытания УАМС [144].

Долговременные натурные испытания УАМС АМК-03 проводились с помощью трех случайным образом отобранных изделий (зав.№ 69, зав.№ 104, зав.№ 71). Метеостанции были размещены на метеорологической площадке ИМКЭС СО РАН, на территории научно-исследовательского стационара Института «Курлек» и на метеостанции аэропорта Богашево. Целью натурных

испытаний была проверка надежности метеостанций и времени наработки «на отказ», при этом, дополнительно, испытывалась эффективность системы обогрева элементов УАМС при наличии обледенения.

УАМС были введены в режим непрерывной эксплуатации, в котором отработали около пяти лет без ремонта и технического обслуживания. Метеорологическая информация (частота измерений метеорологических характеристик составляла 10 Гц) от станций поступала по беспроводному каналу связи на сервер ИМКЭС СО РАН и была доступна допущенным пользователям.

На рис. 2.65 и 2.66 в качестве примера, приведены сезонные (поквартальные) данные по преобладающему направлению ветра («роза ветров») и скорости ветра. Диаграммы построены на основе данных измерений УАМС АМК-03 зав.№ 104 на протяжении 2011 года, установленной на метеоплощадке ИМКЭС СО РАН.

Полученные при испытаниях УАМС АМК-03 данные были использованы для решения вопроса оптимального расположения сетевых постов разрабатываемой системы для мезомасштабного экологического и метеорологического мониторинга атмосферного пограничного слоя (см. гл. 5 настоящей работы).

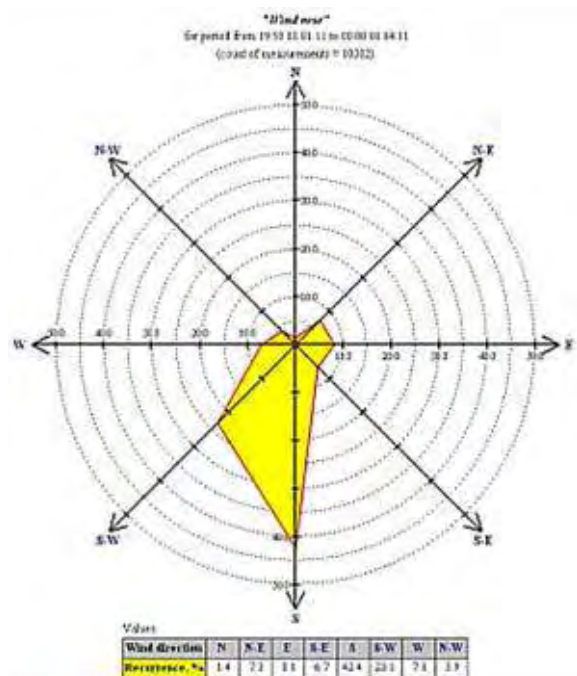
На основе полученных данных сделаны следующие выводы:

- в холодное время года (январь-март и октябрь-декабрь) преобладающими направлениями ветра являются южное и юго-западные направления, сильный ветер имеет, преимущественно, южное, юго-западное, северное и восточное направления;

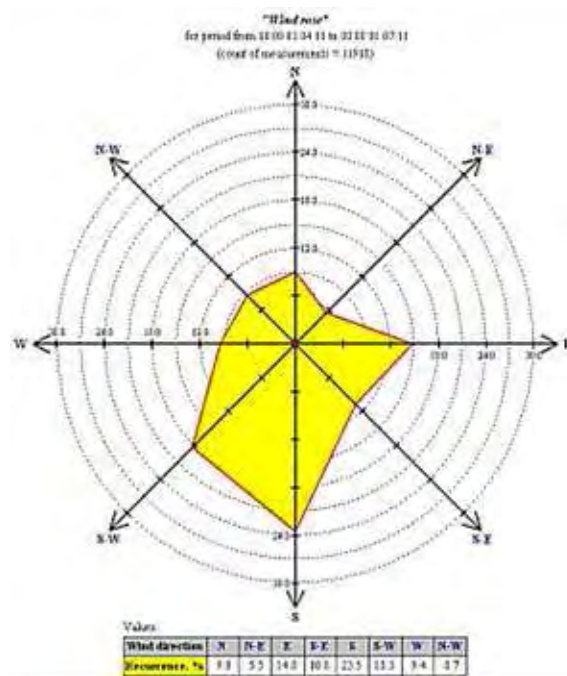
- в теплое время года (апрель-сентябрь) преобладающими направлениями ветра являются южное, юго-западное, северное, восточное и северо-восточное направления, сильный ветер не имеет преимущественных направлений (наименее актуально юго-восточное направление);

- для обеспечения контроля ветровых потоков, характерных для г.Томска, желателен охват всех основных азимутальных направлений при наименьшей актуальности юго-восточного направления, с точки зрения обеспечения контроля

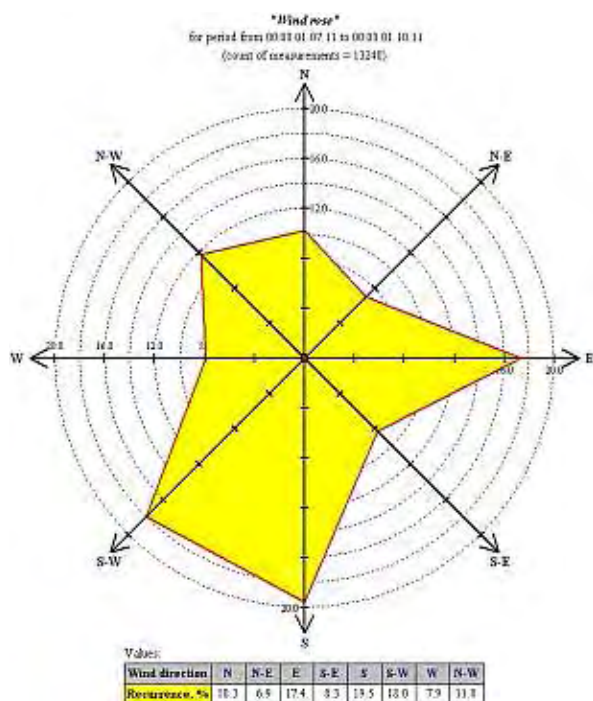
интенсивных ветров в летнее время года (максимальная вероятность возникновения ОМЯ) наибольшую актуальность имеют южное, юго-западное, северное и восточные направления.



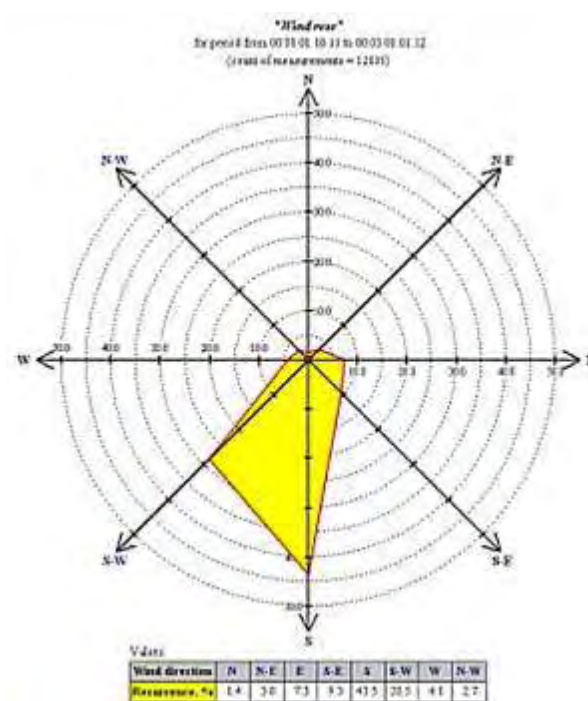
а



б

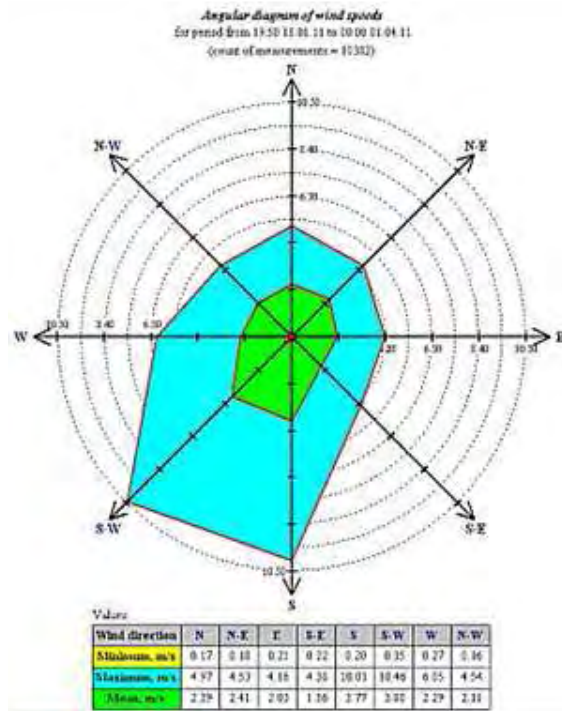


в

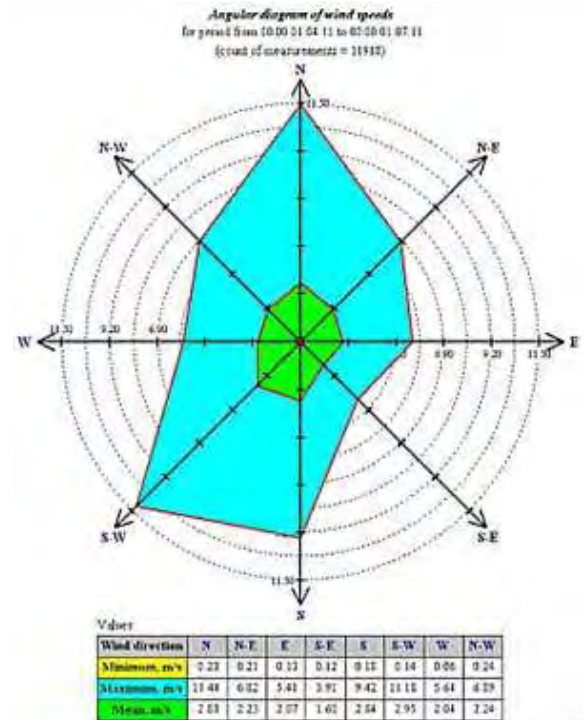


г

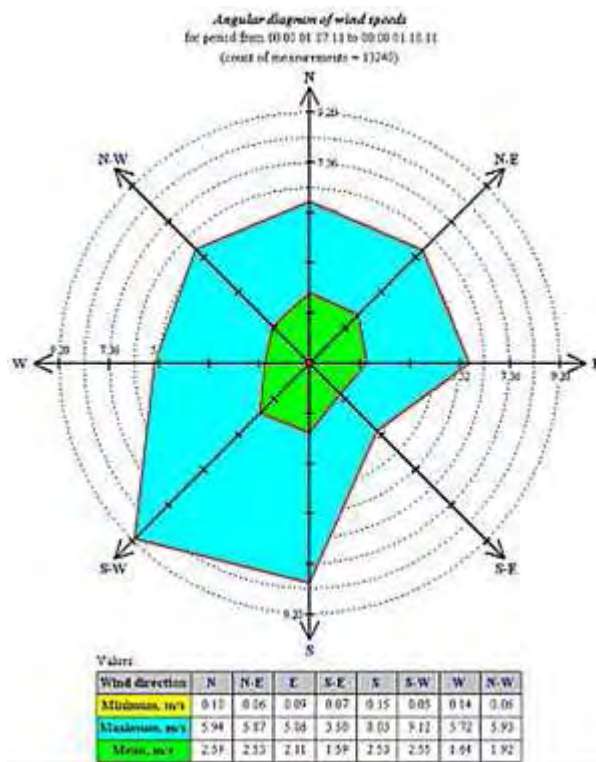
Рисунок 2.65 - Натурные испытания УАМС АМК-03: «Роза ветров» на метеоплощадке ИМКЭС СО РАН, данные за 2011 год (а – 1-й квартал, б - 2-й квартал, в - 3-й квартал, г - 4-й квартал)



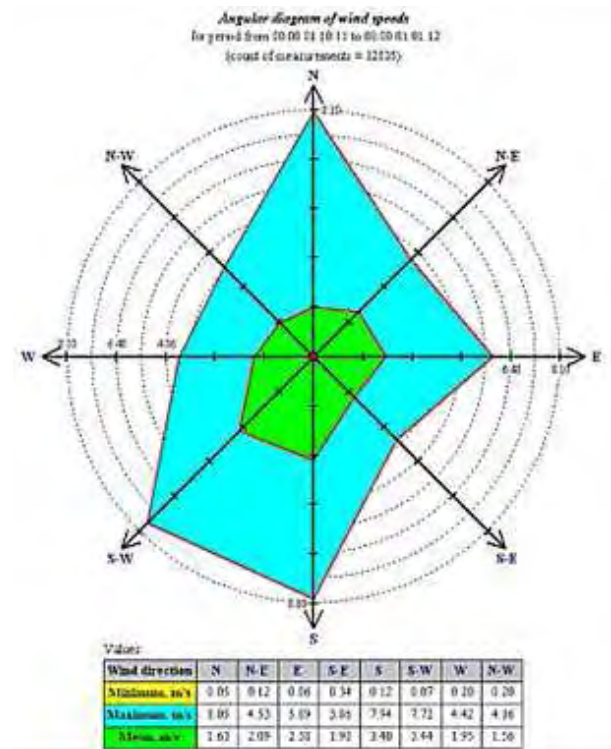
а



б



в



г

Рисунок 2.66 - Натурные испытания УАМС АМК-03: Угловые диаграммы скорости ветра на метеоплощадке ИМКЭС СО РАН, данные за 2011 год (а - 1-й квартал, б - 2-й квартал, в - 3-й квартал, г - 4-й квартал)

Полный массив данных, полученных тестируемыми УАМС АМК-03 за период 2011 – 2016 гг. можно получить по ссылке <http://imces.ru:9005>.

2.3.4.3 На метрологические параметры ультразвукового анемометра имеет прямое влияние «ветровая прозрачность» конструкции, поддерживающей в пространстве излучатели и приемники ультразвуковых импульсов. Под «ветровой прозрачностью» понимают степень уменьшения скорости тестируемого ветрового потока в измерительной зоне 3D-УТА из-за взаимодействия ветрового потока с поддерживающей ЭАП арматурой [145].

Как уже указывалось в п. 2.1.2 главы 2 конструкция 3D-УТА должна быть достаточно жесткой для противостояния ударным и вибрационным нагрузкам и, при этом, вносить минимальные искажения в измеряемый ветровой поток. Ниже приведены результаты исследований «ветровой прозрачности» этих конструкций и определены систематические ошибки измерений, возникающие из-за ветрового затенения измерительной зоны. Данные исследования проводились методом численного моделирования и дополнялись экспериментальными измерениями в аэродинамической трубе.

На рис. 2.66 приведена визуализация результатов расчета эффекта ветрового затенения измерительного объема 3D-УТА для разных конструкций (расчет выполнен методом численного моделирование с помощью компьютерной программы SolidWorks+FloWorks).

На рис. 2.67 показаны восстановленные численным методом профили скорости ветра в измерительном объеме 3D-УТА различных конструкций и коэффициенты затенения.

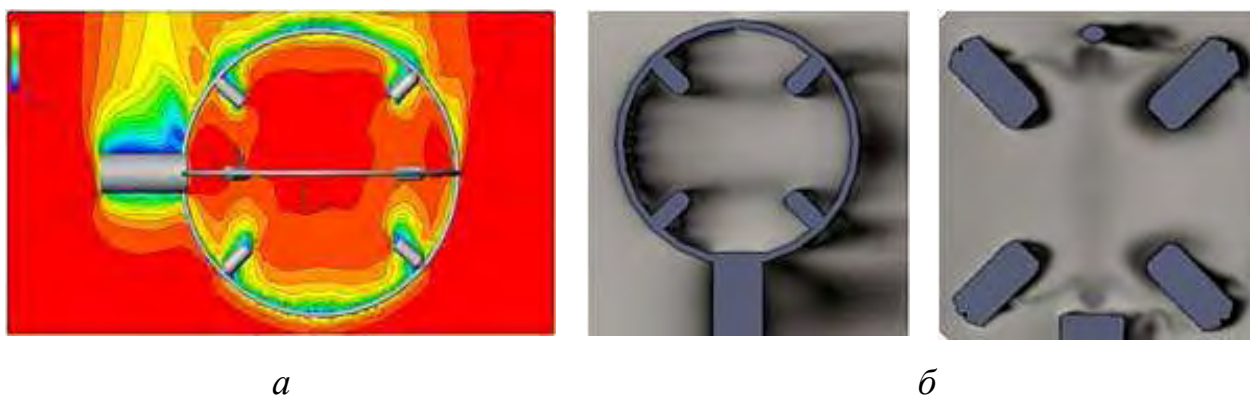


Рисунок 2.66 - Ветровое затенение измерительного объема 3D-УТА – визуализация результатов численного расчета: *а* – ветровые затенения измерительного объема ДСВ-15 (направление ветра снизу-вверх); *б* – ветровые затенения измерительного объема УТАМ-75 (направление ветра слева-направо)

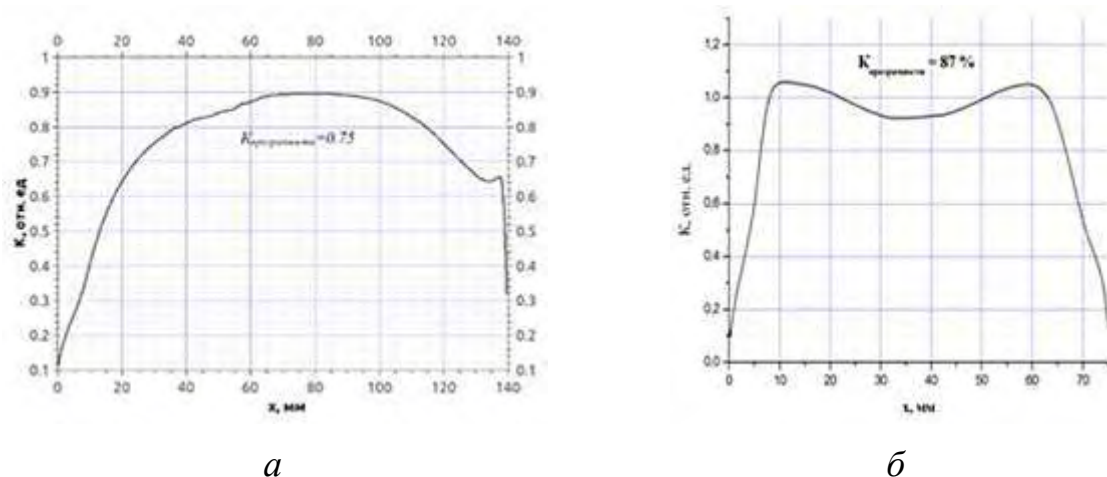


Рисунок 2.67 - Профили скорости ветра в измерительном объеме 3D-УТА различных конструкций (по оси X отложено расстояние от ЭАП-излучателя вдоль акустической оси ЭАП-излучатель – ЭАП-приемник): *а* – в ДСВ-15 (коэффициент затенения $K = 0,75$); *б* – в УТАМ-75 ($K = 0,87$)

Как видно из рисунков, благодаря уменьшению влияния «ветровой тени» вертикальных несущих колец, коэффициент «ветрового затенения» конструкции УТАМ-75 меньше аналогичного коэффициента блока ДСВ-15, кроме того, в новой конструкции этот коэффициент, практически, не зависит от ориентации блока относительно ветрового потока, что существенно облегчает калибровку 3D-УТА и уменьшает ошибку измерений.

2.3.4.4 Транспортное средство, на котором устанавливаются бортовые УАМС, также может оказывать влияние на результаты измерений, в частности, возможно появление ошибки измерений температуры воздуха из-за влияния на измерительную зону 3D-УТА восходящих потоков тепла от нагретой поверхности транспорта. В целом, эта ошибка определяется комплексом внешних факторов (температурой поверхности транспорта, местом установки метеокомплекса, погодными условиями и пр.) и носит случайный характер. Наиболее эффективным способом устранения этого влияния является подъем измерительного блока УАМС на достаточную высоту, при которой этими факторами можно пренебречь. С другой стороны, высота подъема измерительного блока имеет ограничения по эксплуатационным требованиям (бортовой метеокомплекс имеет ограничения по весу и габаритам, времени перевода в режим измерений, а также должен разворачиваться автоматически без выхода экипажа из кабины транспорта).

Методом численного моделирования с помощью компьютерной программы SolidWorks+FloWorks были проведены исследования и определена оптимальная высота подъема измерительного блока бортового метеокомплекса над поверхностью транспорта при различных погодных условиях. При этом задавались следующие параметры моделирования:

- температура окружающей среды – 293,2 К (20 °С),
- температура корпуса транспорта – 353,2 К (60 °С),
- интенсивность турбулентности – 6 %,
- размер турбулентности – 2 м.

Ниже представлены результаты численных расчетов температурных полей над поверхностью транспорта для случаев двух ортогональных ориентаций оси транспорта относительно вектора скорости ветра при полном штиле ($V = 0$ м/с) (рис. 2.68) и при значении скорости ветра 1 м/с (рис. 2.69) (вертикальная скорость конвекционных потоков, идущих от корпуса, составила, в этих условиях, около 0,3 м/с).

Расчеты показали, что при высоте подъема измерительного блока на 4 метра от поверхности транспортного средства, даже при работающем двигателе влияние нагрева поверхности, практически, полностью исключается при любых метеорологических условиях (при больших скоростях ветра снос тепла увеличится).

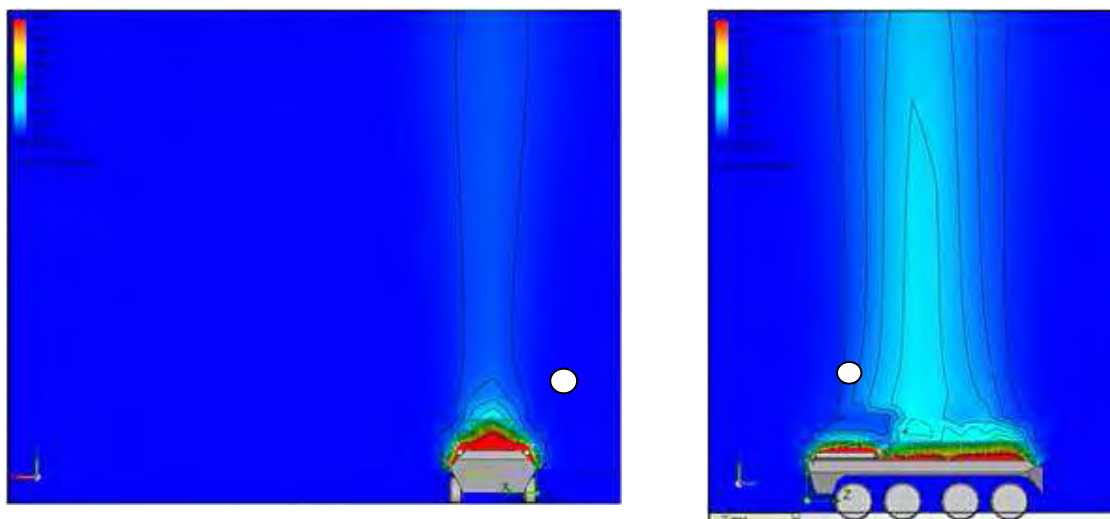


Рисунок 2.68 - Поле температур при скорости ветра $V=0$ м/с (шаг изотерм 0,1 К) (белым кружком обозначен измерительный блок метеокомплекса при высоте подъема 4 метра)

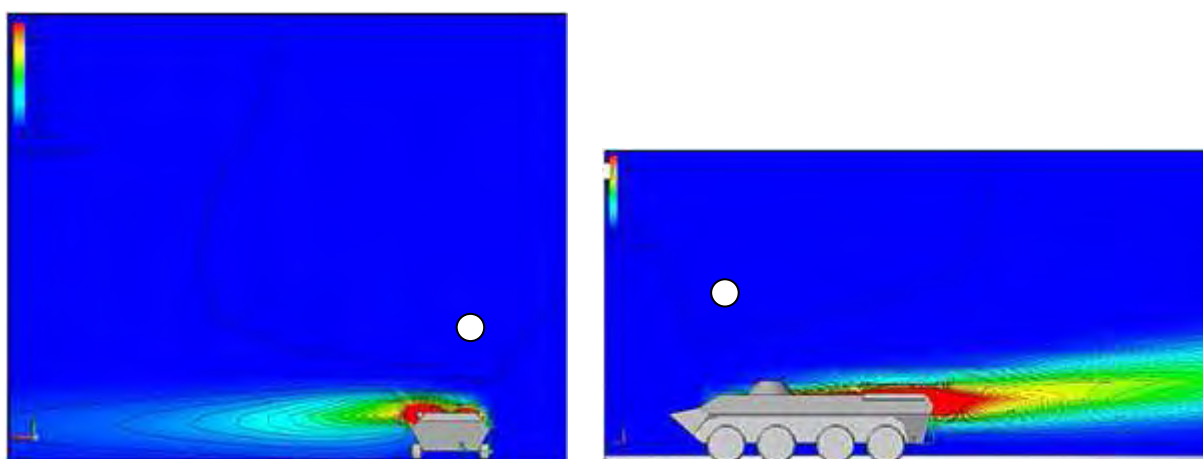


Рисунок 2.69 - Поле температур при скорости бокового ветра $V=1$ м/с (шаг изотерм 0,1 К) (белым кружком обозначено место нахождения измерительного блока метеокомплекса при высоте подъема 4 метра)

2.4 Технические средства для диагностики и повышения метрологической надежности УАМС АМК-03

2.4.1 Портативный комплекс контроля ультразвукового термоанемометра ПККУТ

2.4.1.1 Как отмечалось в п. 2.1.2 настоящей главы, основным эксплуатационным недостатком УТА (а особенно, 3D-УТА) является зависимость метрологических характеристик устройства (погрешности измерений) от стабильности расстояний L_i между акустически согласованными ЭАП-излучателями и ЭАП-приемниками (см. рис. 2.2). Произвольное изменение этих расстояний на относительно небольшую величину (десятые доли миллиметра) приводит к появлению значительной систематической ошибки вычисления скорости звука, и, следовательно, к ошибке определения метеорологических величин – скорости ветра, его направления и температуры воздуха (см. соотношения (2.5) и (2.6)). Наиболее актуальна эта проблема для мобильных (переносных и бортовых) УАМС, подвергающихся интенсивным ударным и вибрационным нагрузкам в процессе транспортировки и эксплуатации (см. пп. 2.3.2 – 2.3.3). Также изменение расстояний L_i происходит из-за колебаний температуры окружающего воздуха (рабочий диапазон УАМС – от минус 70 до плюс 50 °C).

В п. 2.1.2 были описаны технические решения, направленные на увеличение жесткости конструкции 3D-УТА и уменьшению вероятности ее деформации. Тем не менее, актуальной является задача создания специализированного устройства, обеспечивающего возможность поверки метрологических характеристик разработанных 3D-УТА непосредственно на месте их эксплуатации.

Для этих целей был разработан портативный комплекс контроля ультразвукового термоанемометра – ПККУТ (рис. 2.70) [5].

Физической основой использованного в ПККУТ способа контроля является то обстоятельство, что для метода акустической термоанемометрии отсутствие

ветра ($V_{cp} = 0$), является такой значимой (фактически измеряемой) величиной, как и любые другие (в отличие от механических датчиков скорости ветра, где показание $V_{cp} = 0$ может означать и отсутствие ветра, и поломку датчика). Работа ПККУТ основана на использовании принципа «камеры нулевого ветра» [4], который предполагает проведение измерений скорости ветра в специальной закрытой камере, где нет воздушных потоков, т.е. выполняется условие $V_{cp} = 0$.



Рисунок 2.70 - Внешний вид экспериментального образца ПККУТ в переносном кейсе с установленным в нем ультразвуковым термоанемометром (блок УГИ 1Б65)

Кроме того, для контроля функционирования тестируемой УАМС во всем диапазоне значений скорости ветра и температуры воздуха в устройстве реализован режим имитации параметров воздушного потока электронно-акустическим способом.

Поверка метрологических характеристик УТА с помощью ПККУТ осуществляется следующим образом:

1) помещают ультразвуковой анемометр в неподвижную воздушную среду (скорость воздушного потока V_{cp} равна нулю) с произвольно установившейся температурой T_{cp} и включают в режим измерений;

2) сравнивают значения ветра V_{ya} , показанные ультразвуковым анемометром, с истинным значением скорости ветра в воздушной среде V_{cp} ($V_{cp} =$

0): эти значения должны совпадать друг с другом в пределах заданной погрешности измерений ультразвукового анемометра, что означает отсутствие механических деформаций конструкции ультразвукового анемометра и соответствие значений L_i паспортным данным прибора;

3) преобразовывают акустические импульсы, излучаемые ЭАП-излучателями УТА, в электрические, исключая распространение акустического импульса через воздушную среду, – преобразование ведется дополнительными акустическими приемниками, входящими в состав ПККУТ, которые приводят в положение, обеспечивающее непосредственный акустический контакт с ЭАП-излучателями тестируемого УТА;

4) полученные электрические импульсы задерживают на время t_i , устанавливаемое испытателем, при этом время t_i определяется по формуле

$$t_i = \frac{L_i}{20,067 \sqrt{T_{\text{зад}} \pm V_{\text{зад}}}}, \quad (2.33)$$

где i – номер канала ультразвукового анемометра, L_i – расстояние между акустическим излучателем и приемником i -го канала ультразвукового анемометра (паспортные данные), $T_{\text{зад}}$ – значения температуры воздуха, которые задаются испытателем произвольно в пределах рабочего температурного диапазона ультразвукового анемометра, $V_{\text{зад}}$ – значения компоненты скорости ветра, которые задаются испытателем в соответствии с методикой испытаний;

5) преобразовывают задержанные электрические импульсы в акустические и направляют их на ЭАП-приемники соответствующих каналов УТА – преобразование ведется дополнительными акустическими излучателями, входящими в состав ПККУТ, которые приводят в положение, обеспечивающее непосредственный акустический контакт с ЭАП-приемниками тестируемого УТА;

6) сравнивают полученные ультразвуковым анемометром значения компоненты скорости ветра V_{ya} с значениями $V_{\text{зад}}$, заданными испытателем в соответствии с методикой испытаний: значения V_{ya} и $V_{\text{зад}}$ должны совпадать в пределах заданной погрешности измерений ультразвукового анемометра.

2.4.1.2 Конструктивно ПККУТ представляет собой герметично закрывающийся контейнер-кейс с двумя внутренними отсеками (рис. 2.71).

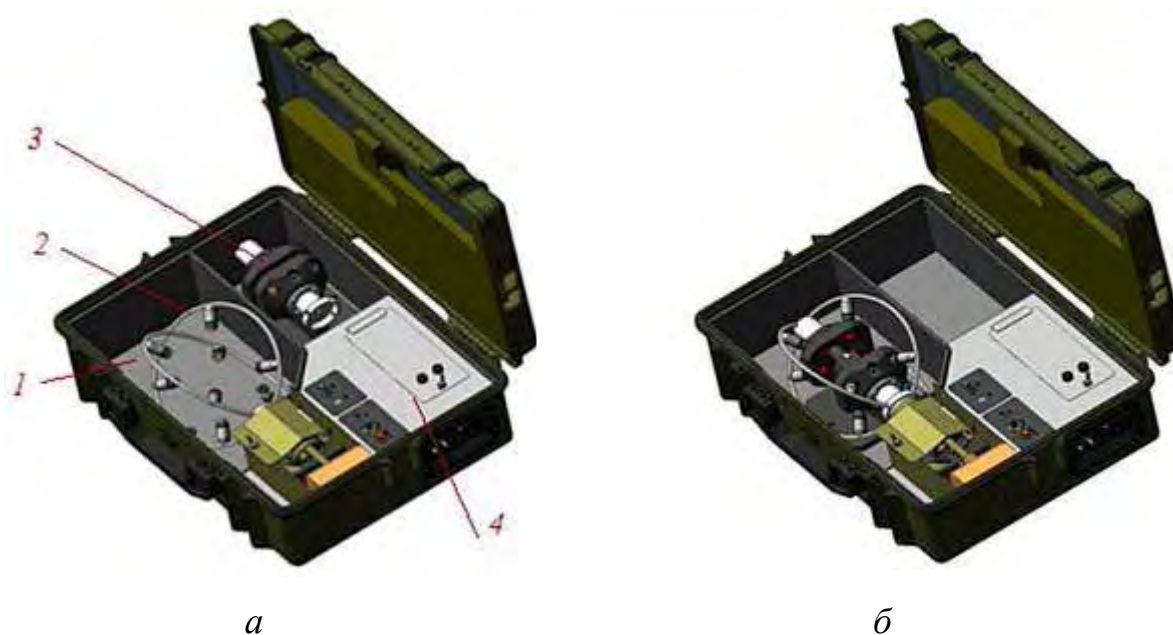


Рисунок 2.71 - Режимы работы ПККУТ: *а* – режим камеры «нулевого» ветра: 1 – отсек камеры нулевого ветра; 2 – поверяемый 3D-УТА; 3 – ЭАБ; 4 – отсек электроники; *б* – режим имитации задержек акустических импульсов

Первый отсек представляет собой камеру нулевого ветра, куда помещают 3D-УТА для проверки деформации конструкции (рис. 2.71, *а*). Во втором отсеке размещается электронно-акустический блок (ЭАБ), предназначенный для имитации параметров воздушного потока (скорости, направления, температуры). При проверке метрологических характеристик во всем диапазоне измерений этих метеорологических величин в 3D-УТА устанавливается ЭАБ (рис. 2.71, *б*).

Этим разработанная конструкция отличается от зарубежного аналога [146], в котором проверка метрологических характеристик УТА проводится на ветровом потоке только с одной заданной скоростью (8 м/с).

На рисунке 2.72 приведена функциональная электрическая схема ЭАБ, предназначенного для контроля 3D-УТА с наиболее распространенной моностатической акустической схемой (в моностатической акустической схеме

для излучения и приема акустических импульсов используются одни и те же электроакустические преобразователи, последовательно переключаемые в режим приема или в режим генерации, а каналы распространения акустических сигналов во встречных направлениях совмещены в пространстве).

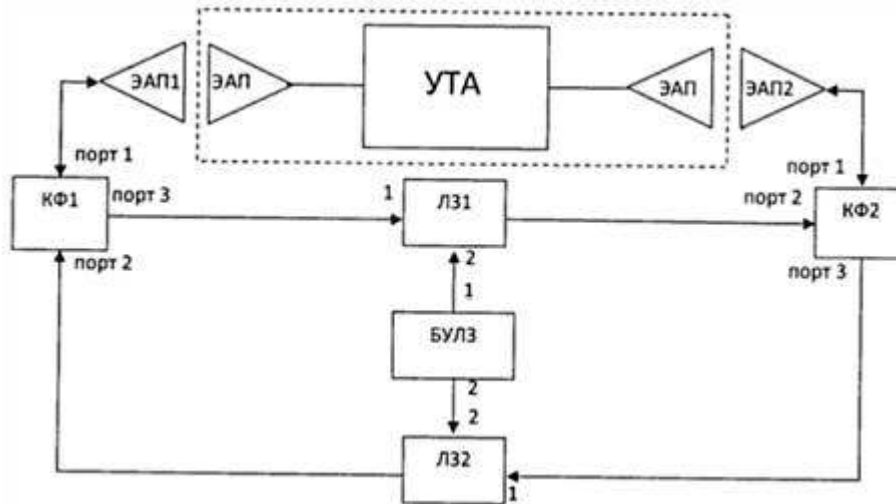


Рисунок 2.72 - Функциональная электрическая схема электронно-акустического блока ПККУТ (для поверки 3D-УТА с моностатической акустической схемой): ЭАП – электроакустические преобразователи тестируемого 3D-УТА; ЭАП1, ЭАП2 – электроакустические преобразователи, входящие в состав ПККУТ; КФ1, КФ2 – коммутаторы-формирователи электрических импульсов, БУЛЗ – блок управления линиями задержки

Работа ПККУТ происходит по следующему алгоритму (на примере двухканального (однокоординатного) ультразвукового анемометра). При увеличении числа каналов в проверяемом 3D-УТА также увеличивается число каналов в ПККУТ.

Для выполнения операции поверки ультразвуковой анемометр помещают в камеру нулевого ветра (рис. 2.71,а), включают его в режим измерений и сравнивают значения ветра V_{ya} , показанные ультразвуковым анемометром, с истинным значением скорости ветра в воздушной среде V_{cp} ($V_{cp} = 0$): эти значения должны совпадать друг с другом в пределах заданной погрешности измерений ультразвукового анемометра.

Затем устанавливают электроакустические преобразователи ЭАП1 (излучатель) и ЭАП2 (приемник) электронно-акустического измерительного блока ЭАБ вплотную к акустическим преобразователям ЭАП ультразвукового анемометра, обеспечивая между ними непосредственный акустический контакт.

При включении ультразвукового анемометра акустические импульсы с одного из его электроакустических преобразователей ЭАП, работающего в режиме излучения, поступают непосредственно на вход электроакустического преобразователя устройства, работающего в режиме приема (например, ЭАП1). Акустический импульс, поступивший на электроакустический преобразователь ЭАП1, преобразуется в электрический сигнал, поступает на порт 1 коммутатора-формирователя КФ1 и направляется им в виде электрического импульса на линейный вход линии задержки ЛЗ1, задерживается ею на заданный интервал времени t_1 и поступает через порт 2 коммутатора-формирователя КФ2 на вход электроакустического преобразователя ЭАП2, где преобразуется в акустический импульс и направляется на второй электроакустический преобразователь ЭАП ультразвукового анемометра, работающего в режиме приема. В следующий момент времени (определяемый тактовой частотой работы ультразвукового анемометра – частотой переключения режимов «генерация/прием» его электроакустических преобразователей) акустический импульс со второго электроакустического преобразователя ЭАП ультразвукового анемометра, работающего теперь в режиме генерации, поступает на вход электроакустического преобразователя ЭАП2. Этот акустический импульс преобразовывается в электрический, поступает на порт 1 коммутатора-формирователя КФ2 и направляется им в виде электрического импульса на линейный вход линии задержки ЛЗ2, задерживается ею на заданный интервал времени t_2 и поступает через порт 2 коммутатора-формирователя Ф1 на вход электроакустического преобразователя ЭАП1, где преобразуется в акустический импульс и направляется на первый электроакустический преобразователь ЭАП ультразвукового анемометра, работающий теперь в режиме приема. При этом

ультразвуковой анемометр производит вычисление значений скорости ветра V_{ya} согласно своей вычислительной программе.

В соответствии с методикой поверки, оператор последовательно вводит в блок управления линиями задержки БУЛЗ значения скорости ветра $V_{зад}$, а также произвольные значения температуры воздуха $T_{зад}$ и значение константы L_i . Значения температуры воздуха $T_{зад}$ должны входить в заданный температурный диапазон работы ультразвукового анемометра, значения L_i , являющиеся расстоянием между электроакустическими преобразователями ЭАП ультразвукового анемометра, как правило, приводятся в паспорте прибора (соответствие значения L_i заводским установкам было установлено на первом шаге испытаний). На основании этих данных процессор блока управления БУЛЗ вычисляет значения времен задержки t_1 и t_2 линий задержки ЛЗ1 и ЛЗ2 по формулам:

$$t_1 = \frac{L_1}{20,067\sqrt{T_{зад} \pm V_{зад}}}, \quad (2.34a)$$

$$t_2 = \frac{L_2}{20,067\sqrt{T_{зад} \pm V_{зад}}} \quad (2.34б)$$

и через выходы 1, 2 выдает соответствующие команды на управляющие входы линий задержки ЛЗ1 и ЛЗ2. После этого оператор производит сравнение значений компоненты скорости ветра V_{ya} , показанных ультразвуковым анемометром, со значениями $V_{зад}$, заданными испытателем в соответствии с методикой испытаний. Значения $V_{ута}$ и $V_{зад}$ должны совпадать в пределах заданной погрешности измерений ультразвукового анемометра.

На рис. 2.73 приведена функциональная электрическая схема ЭАБ, предназначенного для поверки 3D-УТА с бистатической акустической схемой (в бистатической акустической схеме для излучения и приема акустических импульсов используются отдельные электроакустические преобразователи (акустические излучатели и акустические приемники), а каналы распространения акустических сигналов во встречных направлениях разнесены в пространстве). По этой акустической схеме работают 3D-УТА, применяемые в УАМС АМК-03,

АМК-03/3У(О), «ЭКСМЕТЕО», 1Б65, 1Б65Б, АМК-Б и в других модификациях УАМС, разработанных автором (см. п. 2.3).

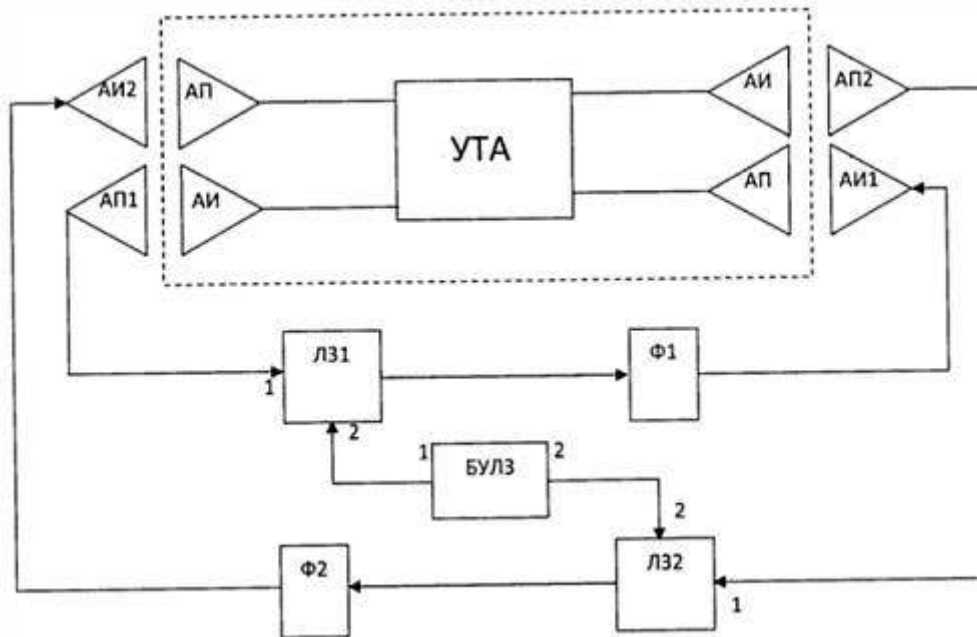


Рисунок 2.73 - Функциональная электрическая схема электронно-акустического блока ПККУТ (для поверки 3D-УТА с бистатической акустической схемой): АП, АИ – акустические приемники и излучатели, входящие в состав тестируемого УТА; АП1, АП2 – дополнительные акустические излучатели, входящие в состав ПККУТ; АИ1, АИ2 – дополнительные акустические излучатели, входящие в состав ПККУТ; Ф1, Ф2 – формирователи электрических импульсов; ЛЗ1, ЛЗ2 – регулируемые линии задержки электрических импульсов; БУЛЗ – блок управления линиями задержки

В этом случае работа ПККУТ происходит по схожему алгоритму (так же, на примере двухканального (однокоординатного) ультразвукового анемометра).

Для выполнения операции поверки ультразвуковой анемометр помещают в камеру нулевого ветра, включают его в режим измерений и сравнивают значения ветра $V_{ya.}$, показанные ультразвуковым анемометром, с истинным значением скорости ветра в воздушной среде $V_{cp.}$ ($V_{cp.} = 0$): эти значения должны совпадать

друг с другом в пределах заданной погрешности измерений ультразвукового анемометра.

Затем устанавливают акустические приемники АП1 и АП2 электронно-акустического измерительного блока ЭАБ вплотную к акустическим излучателям АИ ультразвукового анемометра, обеспечивая между ними непосредственный акустический контакт, а акустические излучатели АИ1 и АИ2 электронно-акустического измерительного блока ЭАБ устанавливают вплотную к акустическим приемникам АП ультразвукового анемометра, также обеспечивая между ними непосредственный акустический контакт.

При включении ультразвукового анемометра акустические импульсы с его акустических излучателей АИ поступают непосредственно на входы акустических приемников АП1 и АП2. В первом канале акустический импульс, поступивший на акустический приемник АП1, преобразуется в электрический, проходит через линию задержки ЛЗ1, поступает на вход формирователя Ф1 и далее - на вход акустического излучателя АИ1, где преобразуется в акустический импульс, который поступает непосредственно на вход акустического приемника АП первого канала ультразвукового анемометра. Аналогично, во втором канале акустический импульс, поступивший на акустический приемник АП2, преобразуется в электрический, проходит через линию задержки ЛЗ2, поступает на вход формирователя Ф2 и далее - на вход акустического излучателя АИ2, где преобразуется в акустический импульс, который поступает непосредственно на вход акустического приемника АП второго канала ультразвукового анемометра. При этом ультразвуковой анемометр производит вычисление значений скорости ветра $V_{\text{ута}}$ согласно своей вычислительной программе.

В соответствии с методикой поверки, оператор последовательно вводит в блок управления линиями задержки БУЛЗ значения скорости ветра $V_{\text{зад}}$, а также произвольные значения температуры воздуха $T_{\text{зад}}$ и значения констант L_1 , L_2 . Значения температуры воздуха $T_{\text{зад}}$ должны входить в заданный температурный диапазон работы ультразвукового анемометра, значения L_1 , L_2 , являющиеся расстояниями между акустическим приемником и излучателем ультразвукового

анемометра для каналов 1 и 2, как правило, приводятся в паспорте прибора (соответствие значений L_1 , L_2 заводским установкам было установлено на первом шаге испытаний). На основании этих данных процессор блока управления БУЛЗ вычисляет по формулам (2.34) значения времен задержки t_1 и t_2 линий задержки ЛЗ1 и ЛЗ2 и через выходы 1, 2 выдает соответствующие команды на управляющие входы линий задержки ЛЗ1 и ЛЗ2. После этого испытатель производит сравнение значений скорости ветра V_{ya} , показанные ультразвуковым анемометром, со значениями $V_{зад}$, заданными испытателем в соответствии с методикой испытаний. Значения V_{ya} и $V_{зад}$ должны совпадать в пределах заданной погрешности измерений ультразвукового анемометра.

В табл. 2.9 приведены основные технические характеристики созданного экспериментального образца ПККУТ.

Таблица 2.9 - Основные технические характеристики ПККУТ

Характеристика	Значение
диапазон имитации скорости воздушного потока	от 0,01 до 65 м/с
диапазон имитации температуры воздуха	от минус 70 до +70 °С
габаритные размеры	165×330×405 мм
вес	не более 10 кг

Разработанный способ и устройство для контроля ультразвуковых термоанемометров позволяют оперативно проводить диагностику метрологических характеристик УАМС непосредственно на месте их эксплуатации, в том числе в полевых условиях.

2.4.2 Автоматическая система контроля и калибровки технологических параметров УАМС

2.4.2.1 Бортовые УАМС, устанавливаемые на гусеничные и колесные транспортные средства, подвергаются наибольшим механическим нагрузкам в процессе эксплуатации, что увеличивает возможность нарушения расстояний между ЭАП входящего в УАМС акустического термоанемометра. Расстояния между ЭАП являются важнейшим технологическим параметром 3D-УТА, определяющим погрешность измерений ветровых характеристик и температуры воздуха.

Для повышения метрологической надежности и обеспечения своевременной диагностики УАМС разработана автоматическая система контроля функционирования бортового метеокомплекса (АСКФ) [4].

АСКФ обеспечивает автоматическое обнаружение изменений расстояний между излучателями и приемниками акустических сигналов, возникающих при эксплуатации УАМС, осуществляет определение новых значений этих расстояний и их ввод в оперативную память вычислительного блока устройства.

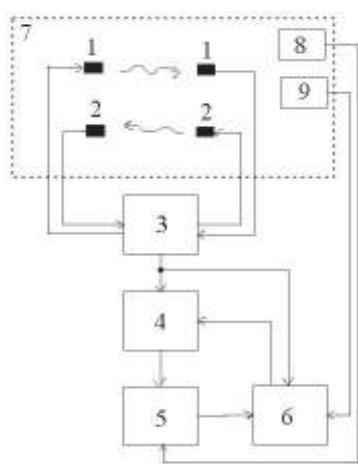
На рис. 2.74 изображена блок-схема АСКФ (для простоты – в варианте измерения скорости ветра по одной координате). Принцип работы АСКФ, так же как и ПККУТ (см. п. 2.4.1), основан на использовании метода «камеры нулевого ветра»), однако в АСКФ, кроме контроля параметра L_i (расстояние между ЭАП) решается «обратная» математическая задача по определению расстояний L_i по известным значениям скорости ветра V и температуры воздуха T в замкнутом транспортном контейнере.

Расстояния L_i могут быть определены из элементарных соотношений (см. п.2.1.1 настоящей работы):

$$L_i = (C + V)t_i$$

$$C = 20,067\sqrt{T} \quad 2.35)$$

где C – скорость звука в воздухе при данной температуре T (в Кельвинах).



а



б

Рисунок 2.74 - Функциональная схема (а) и конструкция АСКФ (б) в составе метеокомплекса 1Б65Б: 1-1 и 2-2 – акустически согласованные пары ЭАП, 3 – измеритель временных интервалов, 4 – основное вычислительное устройство, 5 – устройство сравнения, 6 – дополнительное вычислительное устройство, 7 – ветрозащитный бокс-контейнер, 8 – датчик сигнала закрытия бокса-контейнера, 9 – электронный датчик температуры воздуха.

Для определения температуры T используется дополнительный датчик температуры 9, а для исключения из уравнений (2.35) значений скорости ветра V термоанемометр помещают в закрытый ветрозащищенный бокс, в котором скорость ветра с высокой точностью равна нулю ($V = 0$). Тогда из уравнений (2.35) легко определить фактические значения L_1 и L_2 :

$$L_i = 20,067 t_i T^{1/2}. \quad (2.36)$$

АСКФ работает следующим образом. Включение устройства выполняется, когда измерительный тракт ультразвукового термоанемометра еще размещен в ветрозащитном боксе (он же может являться и транспортным контейнером устройства). При включении устройства и подаче питания на ультразвуковой термоанемометр последний автоматически начинает генерировать ультразвуковые импульсы с заданной частотой повторения, которые распространяются через воздушную среду внутри бокса-контейнера от излучателей к приемникам (пары 1-1 и 2-2), проходя расстояния L_1 и L_2 соответственно. Устройство измерения временных интервалов 3 определяет

времена распространения t_1 и t_2 каждого из ультразвуковых импульсов в обоих каналах, которые в виде цифрового кода поступают как в основное вычислительное устройство 4, так и в дополнительное 6. В основном вычислительном устройстве 4 по известным формулам вычисляются значения скорости ветра V и температуры воздуха T . Необходимые для этого первоначальные значения L_1 и L_2 при включении питания загружаются в оперативную память этого устройства из его энергонезависимой памяти, в которую они заносятся при заводской настройке ультразвукового термоанемометра. Вычисленное значение скорости ветра V поступает в виде цифрового кода из основного вычислительного устройства 4 в устройство сравнения 5, где оно сравнивается со значением «ноль» до тех пор, пока датчик 8 выдает сигнал, что крышка бокса-контейнера закрыта. Если вычисленное значение скорости ветра для воздуха внутри бокса-контейнера при закрытой его крышке не равно «нулю», то устройство сравнения 5 выдает на вход дополнительного вычислительного устройства 6 сигнал команды. По этой команде дополнительное вычислительное устройство 6 считывает показание датчика температуры воздуха внутри бокса-контейнера 9 и по формулам (2.12, 2.13) вычисляет новые значения расстояний L_1 и L_2 , используя при этом последние значения t_1 и t_2 , поступившие к нему из устройства измерения временных интервалов 3. Далее новые значения L_1 и L_2 передаются в оперативную память основного вычислительного устройства 4, где они используются до тех пор, пока не будет выключено питание устройства или не поступят другие значения L_1 и L_2 из дополнительного вычислительного устройства 6.

Таким образом, АСКФ автоматически обнаруживает изменения первоначальных значений расстояний L_i между ультразвуковыми излучателями и приемниками и вычисляет их новые значения, что исключает возможность выдачи им ошибочных данных о скорости ветра и температуре воздуха, т.е. акустический термоанемометр автоматически восстанавливает свои точностные

характеристики после произошедших в процессе эксплуатации или транспортировки механических деформаций измерительного тракта.

Разработанная АСКФ предназначена для бортового метеокомплекса специального назначения 1Б65Б (рис. 2.74,б), но может быть использована и для контроля других модификаций УАМС АМК-03 (см. п. 2.3).

2.5 Выводы по главе 2

2.5.1 Основные выводы из результатов работ, описание которых приведено в главе 2:

1) На основе бистатической акустической схемы, в которой использованы четыре пары акустически согласованных ЭАП, разработаны новые конструкции 3D-УТА повышенной жесткости, имеющие при этом высокие коэффициенты «ветровой прозрачности» K ($K = 0.75 \div 0.87$).

2) Разработаны новые ЭАП, обеспечивающие излучение в воздушную среду и прием ультразвуковых импульсов в условиях воздействия неблагоприятных климатических факторов – экстремально высоких и низких температур воздуха (от плюс 60 °С до минус 70 °С), высокой влажности (до 100%), интенсивных атмосферных осадков, солнечной радиации и пр.

3) Разработана специализированная компьютерная программа («АМК-СОФТ-4»), обеспечивающая функционирование УАМС АМК-03 и вычисление на основе первичных данных датчиков УАМС мгновенных и средних значений метеорологических величин

4) С использованием новых технических решений созданы опытные образцы УАМС АМК-03, обладающей лучшими техническими и эксплуатационными характеристиками по сравнению с отечественными и зарубежными аналогами. Разработаны комплекты технической документации, на основании которой организовано промышленное производство УАМС.

5) Разработано метрологическое обеспечение УАМС АМК-03 и проведена ее сертификация в качестве типа средств измерений РФ.

6) Созданы опытные образцы переносных автоматизированных метеокомплексов специального назначения ПАМК 1Б65, технические характеристики которых соответствуют требованиям ГОСТ РВ 20.39.304-98, способные в автономном режиме обеспечивать измерения метеорологических величин в полевых условиях на неподготовленных площадках. Разработан комплект технической документации (литеры О₁), на основании которого организовано промышленное производство метеокомплекса и его постановка на снабжение Вооруженных Сил РФ.

7) Разработано метрологическое обеспечение ПАМК 1Б65 и проведена его сертификация в качестве типа средств измерений военного назначения.

8) Созданы опытные образцы бортовых автоматических метеокомплексов специального назначения, технические характеристики которых соответствуют требованиям ГОСТ РВ 20.39.304-98, предназначенные для установки на колесные и гусеничные транспортные средства. Разработан комплект технической документации (литеры О₁), на основании которого организовано промышленное производство метеокомплексов и постановка на снабжение Вооруженных Сил РФ.

9) На основе разработанной УАМС АМК-03 созданы стационарные и мобильные модификации автоматических метеостанций, обладающие расширенными функциональными возможностями и широко используемые в научно-исследовательских работах в области практической метеорологии, физики атмосферы, а также в составе автоматизированных систем метеорологического обеспечения стартов космических ракет на космодромах «Восточный» и «Байконур».

10) Проведены экспериментальные исследования оптического метода определения интегральных и микроструктурных параметров осадков и разработана технология практической реализации теневого метода в реальной атмосфере.

11) С использованием новых технических решений разработаны экспериментальные образцы оптических двухканальных и одноканальных осадкомеров ОДИО и ОПТИОС, имеющие лучшие технические характеристики и расширенные функциональные возможности по сравнению с традиционными приборами.

12) Разработаны специализированные компьютерные программы («ПОС-БИО», «OPTIOScore» «RCSScore») для обеспечения функционирования оптического измерителя осадков, вычисления в режиме реального времени микроструктурных и интегральных параметров осадков и автоматизации натурных испытаний осадкомера.

13) Разработаны и изготовлены экспериментальные образцы трехуровневой ультразвуковой автоматической метеостанции с оптическим каналом измерения осадков АМК-03/3У(О), обладающей расширенными функциональными возможностями и предназначенной для работы в качестве сетевой станции комплексной автоматизированной системы контроля АПС.

14) Разработаны новые способы и реализующие их устройства для диагностики функционирования, контроля метрологических характеристик и поверки 3D-УТА непосредственно на месте их эксплуатации.

2.5.2 Представленные в главе 2 результаты работ приведены в 43 авторских публикациях [30, 46, 62, 63, 89–91, 95, 99–100, 103, 105, 106, 108, 112–115, 118 – 124, 130–144, 258], на технические решения, использованные для их получения, получено 3 патента РФ [4–6] и два свидетельства на полезную модель [3, 7], в реестре программ для ЭВМ зарегистрировано 4 компьютерные программы [101, 116, 117, 125].

Результаты работ по созданию мобильных (переносных и бортовых) метеокомплексов специального назначения в 2003, 2008 и 2009 гг. вошли в перечень основных научных результатов СО РАН и РАН.

Результаты разработки теневого метода измерений атмосферных осадков и работ по созданию оптических осадкомеров в 2009, 2013 и 2014 гг. вошли в перечень основных научных результатов СО РАН и РАН.

На основании полученных результатов сформулированы первое и второе защищаемое положение (см. Введение. Защищаемые положения).

2.5.3 Описанные в главе 2 результаты получили дальнейшее развитие в главах 3 и 5 настоящей работы. В главе 3 описана технология использования специальных портативных модификаций разработанных метеостанций для обеспечения дистанционных измерений вертикальных профилей метеорологических и турбулентных характеристик АПС, а в главе 5 представлены первые результаты работы автоматизированных информационно-вычислительных систем, созданных на основе разработанных УАМС и предназначенных для мезомасштабного метеорологического и экологического контроля состояния АПС.

3 Оптические и акустические комплексы для дистанционных измерений характеристик атмосферного пограничного слоя

3.1 Дистанционный контактный метод контроля характеристик АПС на основе использования портативных автоматических метеостанций и беспилотных летательных аппаратов

3.1.1 Методологические основы технологий дистанционного контактного измерения метеорологических и турбулентных характеристик АПС

3.1.1.1 Новые технологии дистанционного контактного измерения характеристик АПС нужны для обеспечения экспериментальных исследований видов стратификации АПС, условий формирования, трансформации и разрушения инверсионных слоев, которые задерживают подъем загрязнений в верхние слои атмосферы, особенностей местной циркуляции, сдвигов ветра в нижней тропосфере, струйных течений АПС, определения потоков тепла, влаги и импульса в АПС, внутрисуточной и межсуточной изменчивости основных метеорологических величин на различных высотах, отработке методик оперативного анализа и прогноза погоды различной заблаговременности (от сверхкраткосрочного до краткосрочного) [Ошибка! Источник ссылки не найден.46, 148].

Важнейшей термодинамической характеристикой состояния АПС, как и атмосферы в целом, является распределение температуры с высотой, по отношению к сухоадиабатическому и влажноадиабатическому процессам, которая, в свою очередь, оказывает решающее влияние на распределение характеристик влажности воздуха и турбулентного обмена, скорости и направления ветра. С другой стороны, водяной пар, облака и туманы, как продукты конденсации водяного пара, сами весьма существенно влияют на распределение температуры. Поэтому для диагностики и прогноза состояния АПС необходимы данные измерений вертикального распределения (или профилей) в АПС основных метеорологических величин, а именно: атмосферного давления, температуры воздуха, влажности воздуха, скорости и направления ветра [148].

В общем случае значение метеорологической величины ξ в АПС можно представить в виде суммы трёх составляющих [148]:

$$\xi(x, t) = \bar{\xi}(x, t) + \tilde{\xi}(x, t) + \xi'(x, t), \quad (3.1)$$

где $\bar{\xi}$ – среднее значение метеовеличины, обусловленное крупномасштабными синоптическими процессами, и в невозмущенных условиях измеряемое с обычной в метеорологической практике дискретностью (1–3 ч) при усреднении за 10 мин; $\tilde{\xi}$ – значение метеовеличины, обусловленное мезомасштабными процессами, в большей степени зависящее от погодных и местных условий, характеризующая локальное термодинамическое состояние атмосферы; ξ' – высокочастотная турбулентная составляющая (пульсации), характеризующая квазистационарные случайные процессы.

Для определения численных значений первых двух составляющих используют чаще всего прямые или контактные методы измерения [149]. Стационарные контактные измерения дают метеорологическую информацию о состоянии и изменении термодинамических характеристик приземного слоя, высотное зондирование – о вертикальном распределении метеовеличин в пограничном слое и свободной атмосфере. Последняя составляющая численно представляется в виде дисперсии (стандартного отклонения), корреляционных функций, спектров, смешанных моментов (или вертикальных турбулентных потоков тепла, импульса и влаги), моментов более высокого порядка и взаимных спектров. Для её определения наилучшим способом является метод измерения турбулентных пульсаций с помощью ультразвуковых измерительных преобразователей.

Толщина АПС зависит от метеорологических условий и колеблется от нескольких сотен метров (в ночные часы при слабом ветре) до 2–3 км (в дневные часы и при сильном ветре) [146]. Нижняя часть АПС, в которой наиболее существенно проявляются эффекты взаимодействия атмосферы с деятельной поверхностью, называемая приземным слоем (ПС), составляет около 5 % АПС. В

пределах ПС вертикальные турбулентные потоки считаются не меняющимися с высотой.

Для обеспечения контроля характеристик АПС в соответствии с требованиями ВМО [150], методика измерения вертикальных профилей метеорологических величин должна обеспечивать:

- высоту измерения профиля метеорологической величины – до 3-х км;
- пространственное (высотное) разрешение измерений – не хуже 100 м;
- время усреднения результатов – не более 1 мин.

3.1.1.2 Измерение вертикальных профилей температуры воздуха обеспечивается установкой на платформе БПЛА контактного датчика температуры, обладающего следующими техническими характеристиками [150]:

- диапазон измерений – от -80 до $+60$ °С;
- разрешение – $0,1$ °С;
- погрешность измерения: $0,3$ °С для ≤ -40 °С; $0,1$ °С для > -40 °С и $\leq +40$ °С; $0,3$ °С для $> +40$ °С.

Максимальная высота измерения профиля метеорологической величины и высотное разрешение измерений определяются техническими характеристиками БПЛА, выбранного в качестве несущей платформы измерительного комплекса.

Диапазон и разрешение измерения профиля температуры определяются техническими характеристиками выбранного датчика, а погрешность измерений определяется, кроме того, внешними факторами [151]:

- а) контактным и радиационным теплообменом между датчиком и средой (конструкцией крепления датчика);
- б) радиационным нагревом датчика прямым и отраженным солнечным излучением;
- в) осаджением воды и образованием льда на датчике.

Величина теплообмена между датчиком и средой (конструкцией крепления датчика) во многом определяется свойствами покрытия датчика и условиями измерений. Применяемые в качестве отражающих покрытий материалы и белые краски обладают сравнительно высокой эмиссионной способностью в ИК-области

спектра, поэтому теплообмен с фоновым ИК-излучением может приводить к возникновению значительных погрешностей в значениях температуры. Восходящий поток ИК-излучения, попадающий на датчик, состоит из излучения поверхности Земли и атмосферных слоев, находящихся под зондом. Нисходящий поток ИК-излучения обычно гораздо меньше по величине и состоит из атмосферного излучения слоев, находящихся над зондом. Потоки ИК-излучения изменяются по мере подъёма зонда. Для некоторой заданной вертикальной структуры поля температуры потоки ИК-излучения также будут существенно различаться от полета к полету, в зависимости от наличия облачности в районе полёта. Наименьшие погрешности (в пределах $\pm 0,3$ °C) за счёт теплообмена в тропосфере имеют алюминизированные термоконденсаторы и термисторы, а погрешности зондов с этими датчиками – около 0,6 °C. Тем не менее, все контактные датчики обладают данным видом погрешности, учет которой производится лишь оценочно [151].

Для всех зондовых датчиков температуры характерны, также, погрешности, связанные с разогревом при полетах в дневное время под воздействием солнечной радиации. В аэрологической практике до сих пор не удалось создать устройств и отражающих покрытий, обеспечивающих полную защиту от излучения.

Еще одним источником возникновения погрешностей при измерении температуры является осаждение воды или льда на датчике температуры. Это явление ведет к психрометрическому охлаждению (эффект смоченного термометра) датчика температуры, как только относительная влажность атмосферы при подъёме зонда становится ниже 100 %. Если датчик устроен так, что вода или лед скапливаются на нем, вместо того чтобы быстро удаляться, то значительная часть данных измерений температуры во время подъема может оказаться искажённой. В ночное время наличие слоя льда на датчике приводит к тому, что алюминизированный датчик начинает вести себя как окрашенный в чёрный цвет датчик в ИК-области спектра. Более того, в случаях, когда вода, накопившаяся на датчике, замерзает по мере попадания датчика в более холодные слои воздуха, выделение скрытой теплоты приводит к повышению температуры

до 0 °С. Если датчик сначала покрывается льдом, а затем перемещается в более тёплые слои воздуха, температура не поднимется выше 0 °С до тех пор, пока лёд не растает. Поэтому измерения при температурах близким к 0 °С во влажных условиях в изотермических слоях могут иметь значительную погрешность, учесть которую весьма затруднительно.

Радикальным способом устранения погрешностей измерения профилей температуры воздуха, обусловленных всеми перечисленными выше факторами, является применение для этих целей ультразвукового термоанемометра, реализующего метод акустической термометрии (см. параграф 2.1 настоящей работы).

3.1.1.3 Измерение вертикальных профилей влажности воздуха обеспечивается установкой на платформе БПЛА контактного датчика влажности, обладающего следующими техническими характеристиками [150]:

- диапазон измерений – от 0 до 100 %;
- разрешение – 1 %;
- погрешность измерения – 3–5 %.

При измерении вертикального распределения влажности воздуха с помощью контактных датчиков погрешность измерения влажности, в основном, определяется атмосферными факторами [151]:

- а) радиационный нагрев датчика;
- б) увлажнение или обледенение датчика при прохождении облака.

Воздействие прямой и отраженной солнечной радиации во время зондирования в дневное время приводит к разогреву датчика. Кроме того, датчик может нагреваться от контакта с воздухом и от теплового излучения конструктивных элементов радиационной защиты. Для учёта влияния температуры воздуха на результаты измерения влажности обычно используется эмпирическая формула, описывающая влияние температуры на статистические характеристики преобразования датчика, которую, в общем виде, можно записать как

$$f = A(Bf')^{\exp(-bT)}, \quad (3.3)$$

где A , B , a и b – эмпирические коэффициенты, определяемые либо в ходе экспериментальных запусков в ночное и дневное время при сходных условиях по температуре и влажности, либо в ходе лабораторных испытаний в климатической камере; f – действительное значение относительной влажности; f' – измеренное значение относительной влажности; T – температура датчика. Обычно численные значения этих коэффициентов вводятся в программу расчётов данных зондирования влажности.

Следующей существенной проблемой для датчиков влажности при зондировании является попадание зонда в туман, облака или зону осадков, в результате чего происходит смачивание датчика или его обледенение. Погрешность измерений, возникающая за счёт смачивания, приводит к завышению верхней границы облачности, поскольку смоченный датчик при выходе из облака некоторое время показывает повышенную влажность воздуха. Время t , в течение которого наблюдается эффект смачивания, можно оценить по формуле [152]:

$$t = \Phi / W, \quad (3.4)$$

где Φ – влагоёмкость чувствительного элемента датчика влажности; W – скорость испарения воды с единицы поверхности датчика.

3.1.1.4 Измерение вертикальных профилей атмосферного давления обеспечивается установкой на платформе БПЛА контактного датчика давления, обладающего следующими техническими характеристиками [151]:

- диапазон измерений – от 500 до 1080 гПа;
- разрешение – 0,1 гПа;
- погрешность измерения – 0,1 гПа.

Погрешности измерения профиля атмосферного давления определяются погрешностью используемого датчика. Для большинства датчиков давления, построенных на основе ёмкостных или пьезорезисторных anerоидных коробок, систематическая погрешность обусловлена изменением внутренней температуры датчика, гистерезисом и упругим последствием коробки. Обычно она не превышает 1,5 гПа при высоком давлении и 1 гПа при очень низком давлении.

Погрешность может увеличиваться в случае резкого и значительного изменения температуры, так называемого термического удара. Погрешность, обусловленная гистерезисом и упругим последствием, в миниатюрных коробках из современных сплавов сведена практически к нулю. Для ёмкостных кремниевых датчиков давления, которые не подвержены термическому удару и не обладают выраженным гистерезисом и упругим последствием, систематическая погрешность незначительна и составляет 0,1–0,2 гПа. Систематическая погрешность определяется при калибровке и отражена в его паспорте.

Для оценки погрешности расчёта давления на стандартных уровнях и уровнях особых точек при вертикальном зондировании АПС в случае измерения давления только на уровне поверхности следует использовать формулу, приведенную в [152]:

$$\Delta p_n = \Delta p_{n-1} - \frac{p_{n-1}}{R} q \left[\frac{\Delta(z-z_{n-1})}{\bar{T}_v^2} \Delta \bar{T}_v \right] \exp \left[-\frac{q}{R} \frac{z-z_{n-1}}{\bar{T}_v} \right], \quad (3.5)$$

где Δp_n , Δp_{n-1} – погрешности определения давления на верхней и нижней границах исследуемого слоя $(z-z_{n-1})$; $\Delta \bar{T}_v$ – погрешность определения средней виртуальной температуры слоя; $\Delta(z-z_{n-1})$ – погрешность определения толщины слоя.

3.1.1.5. Измерение вертикальных профилей турбулентных характеристик АПС обеспечивается установкой на платформе БПЛА ультразвукового термоанемометра (см. параграф 2.1 настоящей работы), обладающего следующими техническими характеристиками:

- чувствительность 0,01 м/с;
- инерционность до $6,25 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$;
- пространственное разрешение $7,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}$.

Ультразвуковой термоанемометр обеспечивает определение следующих турбулентных характеристик АПС [88]:

- $E_v = (\sigma_u^2 + \sigma_v^2 + \sigma_w^2) / 2$ – полная энергия турбулентных движений ($\sigma_u^2, \sigma_v^2, \sigma_w^2$

- дисперсии турбулентных пульсаций трех компонент скорости ветра u, v, w);
- $I_v = E_v / (V_m)^2$ – относительная интенсивность флуктуаций скорости ветра;
- $E_t = \sigma_t^2 / 2$ – энергия температурных флуктуаций (σ_t^2 – дисперсия турбулентных пульсаций температуры t);
- $\langle u' \cdot w' \rangle$ – момент потока импульса (касательного напряжения) ($\langle \dots \rangle$ – символ статистического усреднения);
- $\langle T' \cdot w' \rangle$ – момент потока тепла (потока температуры);
- $\tau = -\rho \langle u' \cdot w' \rangle$ – вертикальный поток импульса (ρ – плотность воздуха);
- $H = c_p \rho \langle T' \cdot w' \rangle$ – вертикальный поток тепла (c_p – удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении);
- $v^* = \sqrt{-\langle u' \cdot w' \rangle}$ – скорость трения (масштаб ветра);
- $T^* = \langle T' \cdot w' \rangle / v^*$ – масштаб температуры;
- $L^* = \langle T \rangle (v^*)^2 / (\chi \cdot g \cdot T^*)$ – масштаб Монина-Обухова ($\chi = 0,4$ и $g = 9,81 \text{ м/с}^2$);
- $C_d = (v^* / \langle V \rangle)^2$ – коэффициент сопротивления потоку;
- $C_T^2 = \langle [T'(t + \Delta t) - T'(t)]^2 \rangle / (\langle V_m \rangle \Delta t)^{-2/3}$ – структурная постоянная температурных флуктуаций (V_m – модуль среднего вектора скорости ветра; Δt – временной интервал между измерениями мгновенных значений метеовеличин);
- $C_v^2 = \langle [u'(t + \Delta t) - u'(t)]^2 \rangle / (\langle V_m \rangle \Delta t)^{-2/3}$ – структурная постоянная ветровых флуктуаций;
- $C_{na}^2 = C_T^2 / (2 \langle T_k \rangle)^2 + C_v^2 / \langle c \rangle^2$ – структурная постоянная флуктуаций акустического показателя преломления (T_k – температура воздуха в Кельвинах; c – скорость звука);
- $C_{no}^2 = \{ 8 \cdot 10^{-5} \langle P \rangle / \langle T_k \rangle^2 \}^2 C_T^2$ – структурная постоянная флуктуаций оптического показателя преломления (P – атмосферное давление в гПа).

Основным источником ошибок измерений может являться аэродинамическое искажение воздушного потока баллоном аэростата, при этом использованный для определения турбулентных характеристик АПС

ультразвуковой метод свободен от основных погрешностей измерений, свойственным контактными датчикам, вызываемых теплообменом между датчиком и средой, радиационным нагревом датчика, а также осаждением воды и образованием льда на датчике (последнее обстоятельство может быть легко устранено соответствующими схемными и конструктивными решениями ультразвукового термоанемометра).

3.1.1.6 В технологии контроля метеорологических характеристик АПС контактными методами с использованием БПЛА может быть использован еще один способ измерения средних по атмосферному слою значений скорости ветра и температуры воздуха [153]. Это «трассовый» метод акустической термометрии, занимающий промежуточное положение между контактными и дистанционными методами. Для его реализации в двух точках пространства – на поверхности земли и на заданной высоте приземного слоя атмосферы – создают источники и приемники акустических сигналов, измеряют времена пролета акустических сигналов, генерируемых этими источниками, от наземной точки до высотной и обратно, определяют расстояние между этими точками и, пользуясь известными из акустической термометрии соотношениями [81]:

$$V = L \times (t_2 - t_1) / 2 t_1 t_2 ; \quad (3.6)$$

$$T = C^2 / 20.067^2 (1 + 0.3192e/P); \quad (3.7)$$

$$C = L \times (t_1 + t_2) / 2 t_1 t_2 ; \quad (3.8)$$

(где t_1 и t_2 – время распространения акустических импульсов от наземного источника до борта БПЛА и в обратном направлении соответственно, L – расстояние от точки на поверхности земли до БПЛА, C – скорость звука в воздухе), e – влажность воздуха; P – атмосферное давление) вычисляют средние по трассе зондирования значения скорости ветра и температуры воздуха. Для доставки источника и приемника акустических сигналов в заданную точку атмосферы используют БПЛА, способный в течение некоторого времени, необходимого для проведения измерений, «зависать» в заданной точке пространства. Определение расстояния между наземной и атмосферной точками может быть осуществлено различными методами, например, посредством

определения их точных координат с помощью систем GPS/ГЛОНАС, посредством определения высоты нахождения БПЛА альтиметрическим или триангуляционным методами и др.

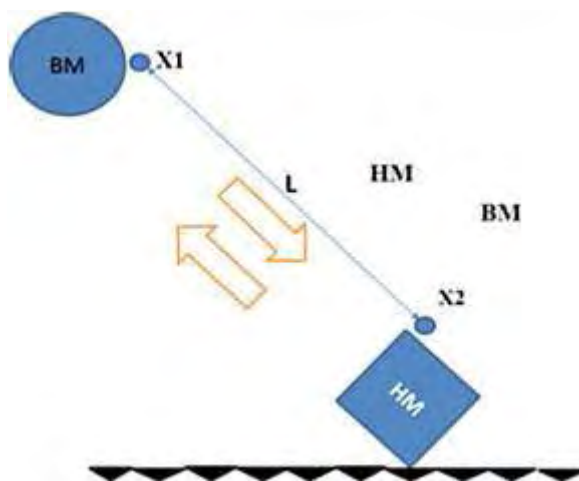


Рисунок 3.1 - Трассовый способ измерения средних по слою значений скорости ветра и температуры воздуха

Рисунок 3.1 поясняет данный способ измерения метеорологических характеристик АПС. БПЛА, на котором размещены излучатель и приемник акустических импульсов, приводят в заданную точку (X_1) АПС и определяют расстояние от БПЛА до точки (X_2) на поверхности земли, где также размещены излучатель и приемник акустических импульсов. Из точки X_2 излучают одиночные акустические импульсы, регистрируют их на борту БПЛА (в точке X_1), и определяют время t_2 распространения акустического импульса от точки (X_2) до точки (X_1). Одновременно с борта БПЛА (из точки X_1) также излучают одиночные акустические импульсы, регистрируют их в точке (X_2) и определяют время пролета t_1 акустического импульса в обратном направлении (от точки X_1 до точки X_2).

Вычисленные по формулам (3.6) - (3.8) скорость ветра V и температура воздуха T представляют собой усредненные по высоте (по трассе зондирования $X_1 \div X_2$) значения этих метеовеличин, при этом скорость ветра V , в общем случае, является компонентой вектора скорости ветра, параллельной оси $X_1 \div X_2$).

Для послойного определения значений V и T в атмосфере, а также для определения других компонент вектора скорости ветра (не параллельных оси $X_1 \div X_2$), БПЛА переводят на высоту, соответствующую заданному слою приземной атмосферы и/или в другую точку воздушного пространства, не лежащую на оси $X_1 \div X_2$, и повторяют описанную выше процедуру измерений.

3.1.2 Техническая реализация метода дистанционного контактного измерения метеорологических и турбулентных характеристик АПС

3.1.2.1 В настоящее время для исследований и проведения рутинных измерений метеорологических характеристик АПС широко используют аэрологические зонды [149].

Такой метод измерений имеет серьезные недостатки, существенно ограничивающие его возможности. Так, скорость и направления полёта, в том числе подъёма или опускания зонда не регулируется, а определяется только атмосферными условиями, зонд невозможно зафиксировать на определённой высоте для выполнения измерений в статических условиях, зонд является одноразовым измерительным устройством и имеет малую грузоподъемность, соответственно, на нем невозможно установить относительно тяжелую и дорогостоящую аппаратуру для измерения турбулентных характеристик АПС и пр.

Автором предложена и экспериментально апробирована технология контроля метеорологических и турбулентных характеристик АПС с использованием новых технических средств – управляемых беспилотных летательных аппаратов двух типов: вертолетов и привязных аэростатов [155].

Требования к техническим характеристикам используемых БПЛА вытекают из методик измерений параметров АПС. Для получения вертикального распределения температуры и влажности воздуха в пределах 1 км с минимальным пространственным разрешением 25 метров, которое достаточно точно описывает

тонкую структуру стратификации атмосферы, измерения должны проводиться через десятисекундные интервалы при скорости подъёма аэростата 2,5 м/с, при этом время зондирования на подъёме (и спуске) составит около 7 минут, соответственно, автономность полёта аэростата при зондировании с 25-м разрешением до высоты 1 км должна быть не менее 15 мин.

БПЛА должен иметь возможность в зависимости от поставленной программы измерений по команде или в автоматическом режиме подниматься и опускаться с разной скоростью, зависать на определённых высотах.

БПЛА с максимальной высотой подъёма 1–2 км и установленные на нем датчики должен быть работоспособным в диапазоне атмосферного давления от 1050 до 800 гПа, температуры воздуха – от плюс 40 до минус 40 °С, относительной влажности воздуха – от 20 до 100 %, скорости ветра – до 20 м/с.

Датчики метеорологических параметров, установленные на БПЛА, (за исключением ультразвукового термоанемометра) должны иметь радиационную защиту от коротковолнового солнечного излучения, иметь защитное покрытие от ИК-излучения и быть расположены таким образом, чтобы минимизировать влияние перечисленных факторов. БПЛА, находящийся в АПС, может подвергаться значительным динамическим нагрузкам, обусловленным высокими значениями вертикального сдвига ветра за счёт развитой турбулентности и конвекции (особенно в тёплое время года), поэтому конструктивно измерительные датчики и вспомогательное оборудование должны быть способны выдержать эти нагрузки без ухудшения метеорологических характеристик. При этом, в связи с ограниченной грузоподъемностью используемых малогабаритных БПЛА, измерительные датчики и вспомогательное оборудование (узлы крепление, радиационная защита и др.) должны быть лёгкими и миниатюрными.

Конкретная модель используемого БПЛА геликоптерного типа определялась, исходя из вышеперечисленных требований, при этом принимались во внимание управляемость и обеспеченность навигационным оборудованием, допустимая максимальная скорость бокового ветра и стоимость. По совокупности этих параметров в качестве платформы для установки метеорологических

датчиков был выбран гексакоптер фирмы DJI модель S900. В комплект гексакоптера DJI S900 входят (рис. 3.2):

- платформа с шестью электродвигателями подъема аппарата;
- система пространственной ориентации;
- система управления (автопилот);
- система передачи/приема команд управления (радиоканал);
- система телеметрии;
- элементы питания;
- пульт управления (наземный модуль).



Рисунок 3.2 - Внешний вид гексакоптера DJI S900

Данный гексакоптер имеет простое, интуитивно понятное ручное управление и высокопроизводительную систему автопилотирования. Автопилот автоматически выравнивает корпус по горизонтали, что делает маневрирование БПЛА аккуратным и безопасным. Одной из функций автопилота является удержание позиции гексакоптера в одной точке, что расширяет возможности применения платформы. В функции автопилота также входит автоматический возврат гексакоптера в точку старта при потере связи с пультом управления. Дополнительно присутствуют специальные последовательности команд пуска/останова двигателей, которые позволяют избежать ошибок оператора,

приводящих к аварии. Имеется световая индикация режимов работы и системных ошибок.

Система связи обеспечивает отображение телеметрии на дисплее. Фиксируются: высота, скорость полета БПЛА, координаты, показания компаса и гироскопа, состояние аккумуляторной батареи, режимы работы навигатора и автопилота. В качестве дисплея может выступать обычный смартфон. Система связи позволяет использовать для управления любой РРМ-совместимый пульт.

Система крепления аккумулятора позволяет оперативно менять батареи питания. Специальное наклонное расположение лучей, на которых установлены пропеллеры, обеспечивает дополнительную устойчивость во время маневрирования. Комплект запасных лопастей позволяет проводить ремонт гексакоптера непосредственно на месте проведения полетов.

Современные материалы корпуса гексакоптера (углепластик) обеспечивают прочность и малый вес БПЛА. Разъемы с защитой от возгорания уменьшают вероятность возникновения пожара. Вибропоглотители, установленные на раме, повышают стабильность и устойчивость гексакоптера в полете. Бесколлекторные электродвигатели позволяют уменьшить помехи, воздействующие на управляющую электронику, и одновременно увеличить мощность. Складные винты и складная рама делают более удобной транспортировку гексакоптера.

Технические характеристики гексакоптера приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 - Технические характеристики гексакоптера DJI модель S900

Параметр	Значение
количество роторов	6
размах по осям	900 мм
максимальный полетный вес	8,2 кг
масса без аккумуляторов	3,3 кг
полезная нагрузка	3,2 кг
тип используемых аккумуляторов	LiPo (6S, 10000mAh+, 15C+)
максимальная потребляемая мощность	3 кВт
потребляемая мощность при удержании позиции (6,8 кг полетного веса)	1 кВт

время полета (6,8 кг, аккумулятор 12000 мА×ч)	18 мин
рабочая температура окружающей среды	-10 °С ~ +40 °С
максимальный ток одного двигателя	40 А
минимальное количество видимых спутников для включения режима GPS	5
точность зависания (в режиме GPS)	
вертикальная	0,5 м
горизонтальная	2,5 м
несущая частота приемопередатчиков	2,4 ГГц
максимальная скорость взлета	5 м/с
максимальная скорость спуска	4 м/с
максимальная скорость горизонтальная в режиме АТТИ	22 м/с
дальность связи (в условиях прямой видимости)	не менее 700 м
максимальная скорость бокового ветра	не более 15 м/с

Для выполнения долгосрочных измерений характеристик АПС, включая ветровые и турбулентные параметры, в настоящей работе использован малогабаритный привязной аэростат гибридного типа К-25М/А (разработан и изготовлен СКТБ МАИ, г. Москва) (рис. 3.3). В аэростате используется комбинированный способ создания подъёмной силы – аэростатический (за счет подъёмной силы, вызванной всплыванием оболочки аэростата, наполненной легким газом) и аэродинамический (за счет подъёмной силы, вызванной набегающим на баллон аэростата воздушным потоком).

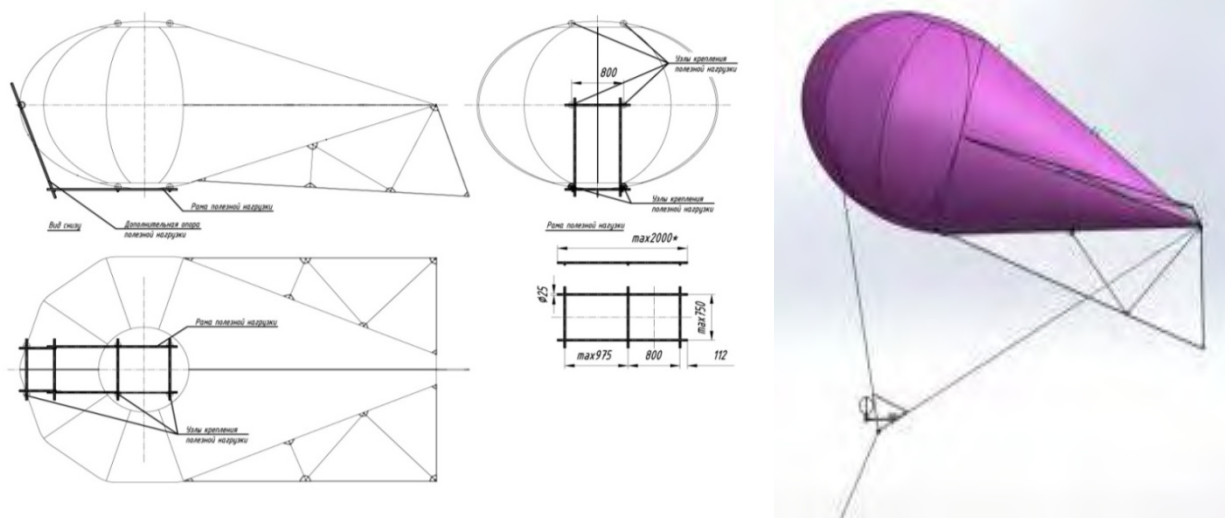


Рисунок 3.3 - Привязной аэростат гибридного К-25М/А

Аэростат имеет оболочку объёмом 25 м^3 и относится к классу малых аэростатов, но позволяет поднимать груз массой до $3,5 \text{ кг}$ на высоту до 1 км при значительных ветровых нагрузках (аэродинамический способ создания подъемной силы обеспечивает К-25М/А, в отличие от обычных аэростатов, возможность подъема при сильном ветре, причем, чем сильнее воздействующий на аэростат ветровой поток, тем больше подъемная сила* и стабильнее пространственная ориентация аэростата) (таблица 3.2).

*) Примечание: экспериментально подтверждено увеличение подъемной силы до значений $45 - 50 \text{ кг}$ при скорости ветра около 10 м/с .

Таблица 3.2 - Основные технические характеристики аэростата К-25М/А

Техническая характеристика	Значение
Полный объём оболочки, м^3	25
Объём газа, м^3	21,6
Компенсационный объём потерь газа, м^3	0,1
Компенсационный объём за счёт изменения высоты, м^3	2,2
Компенсационный объём за счёт температурного расширения газа на 20°C , м^3	1,2
Ширина аэростата, м	3,7
Длина аэростата, м	6,75
Высота аэростата, м	2,75
Масса аэростата, кг	16
Масса полезной нагрузки, кг	3,5
Масса несущего троса длиной 1 км , кг	9
Масса полная (с 50-м тросом), кг	19,95
Максимальный угол отклонения удерживающего троса от вертикали, градус	45
Максимальная эксплуатационная высота подъёма, м	1000
Максимальная расчётная нагрузка удерживающего троса, кгс	150
Максимально допустимая скорость спуска, м/с	4

В комплект привязного аэростата (рис. 3.4) входят:

- баллон аэростата с газовым наполнителем (гелий);
- система крепления полезной нагрузки на баллоне аэростата;
- телеметрическая аппаратура;

- кевларовый трос (длина – 1000 метров)*;
- лебедка с электромеханическим приводом*;
- баллоны с рабочим газом (8 штук)*;
- аппаратура напуска и спуска газа из баллона аэростата*;

*) Примечание: устройства размещены на специально оборудованном легком автомобильном прицепе.



Привязной аэростат
гибридного типа К-25М/А на
автомобильном прицепе



Система крепления
полезной нагрузки и
телеметрическая
аппаратура



Лебедка с тросом и
электромеханическим
приводом (в прицепе)

Рисунок 3.4 - Комплект привязного аэростата К-25М/А

3.1.2.2 Техническая реализация трассового метода измерения средних по атмосферному слою значений скорости ветра и температуры воздуха так же может быть осуществлена с помощью выше описанных БПЛА геликоптерного или аэростатного типов. Реализующее метод устройство (рис. 3.5) содержит наземный и высотный модули [153].

Наземный модуль НМ размещают в известной точке поверхности земли, высотный модуль ВМ устанавливают на борту БПЛА, который поднимают и стабилизируют в районе заданной точки АПС, находящейся на некотором расстоянии L от точки расположения наземного модуля (в зависимости от технических возможностей БПЛА это расстояние может составлять до 3-х километров и более, кроме того, для обеспечения возможности определения

направления ветра, точка расположения БЛА не должна находится на вертикальной оси, проходящей через точку нахождения наземного модуля).

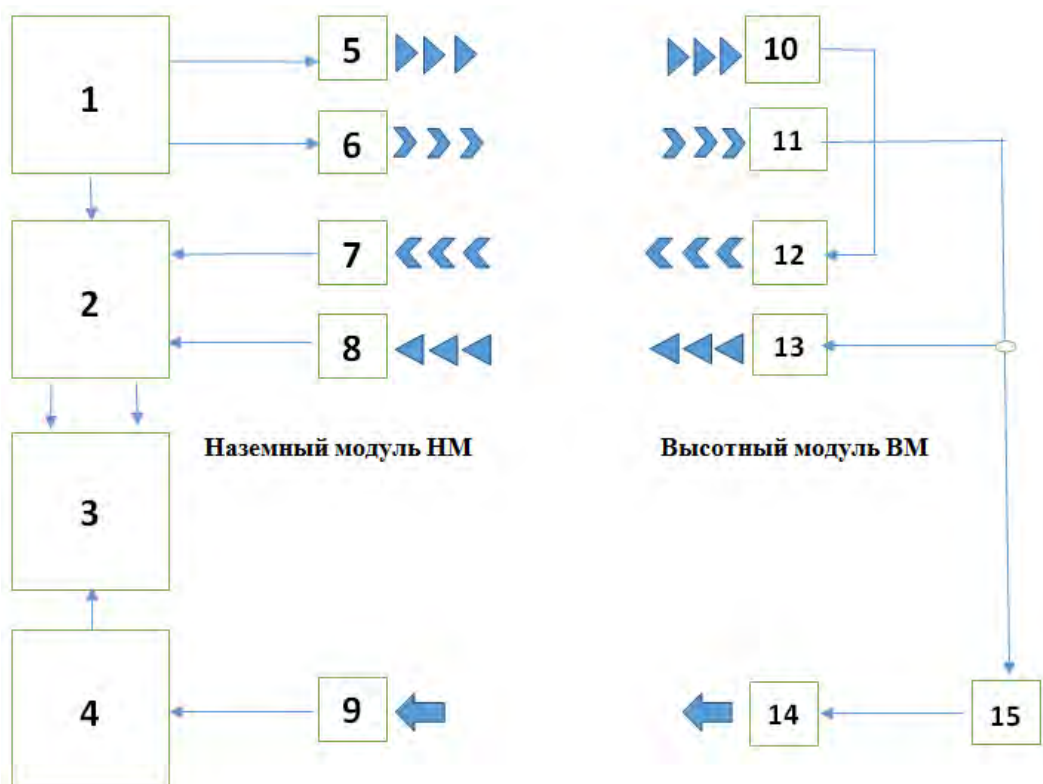


Рисунок 3.5 - Техническая реализация трассового метода измерения метеорологических характеристик АПС. Наземный модуль (НМ): 1 – генератор тактовых импульсов, 2 – измеритель временных интервалов, 3 – вычислительный блок, 4 – дешифратор координат, 5 – источник акустических импульсов, 6 – излучатель электромагнитных импульсов, 7 – приемник электромагнитных импульсов, 8 – приемник акустических импульсов, 9 – приемник кодовых сигналов. Высотный модуль (ВН): 10 – приемник акустических импульсов, 11 – приемник электромагнитных импульсов, 12 – излучатель электромагнитных импульсов, 13 – источник акустических импульсов, 14 – передатчик кодовых электромагнитных сигналов, 15 – блок определения координат БПЛА

При включении устройства, в наземном модуле выработанный тактовым генератором 1 управляющий электрический импульс поступает одновременно на

входы источника акустических импульсов 5, излучателя электромагнитных импульсов 6 и 1-й вход измерителя временных интервалов 2.

При этом источник акустических импульсов 5 и излучатель электромагнитных импульсов 6 синхронно излучают в атмосферу единичные акустический и электромагнитный импульсы, которые достигают атмосферного модуля (электромагнитный импульс – практически немедленно, а акустический – спустя промежуток времени, обусловленный скоростью распространения звука в воздушной среде, разделяющей наземный и атмосферный модули, и расстоянием между ними). Электромагнитный импульс улавливается расположенным на борту БПЛА приемником электромагнитных импульсов 11 и преобразуется в короткий электрический импульс, синхронно поступающий на вход источника акустических импульсов 13 и управляющий вход блока определения координат БПЛА 15. При этом источник акустических импульсов 13 излучает в атмосферу единичный акустический импульс, а блок определения координат БПЛА 15 направляет на вход излучателя кодовых электромагнитных сигналов 14 кодовый сигнал, в котором содержится информация о координате БПЛА в данный момент времени. Передатчик кодовых сигналов 14 излучает в пространство этот сигнал, который принимается приемником кодовых сигналов 9 наземного модуля, направляется на дешифратор координат 4, который вычисляет расстояние L между наземным и атмосферным модулями в данный момент времени и направляет это значение в вычислительный блок 3.

Спустя некоторый промежуток времени, обусловленный скоростью распространения звука в воздушной среде, разделяющей наземный и высотный модули, расстоянием между ними и скоростью ветра, акустический импульс, излученный излучателем 5 наземного модуля, так же достигнет высотного модуля и будет принят акустическим приемником 10, который передаст сигнал на вход излучателя электромагнитных импульсов 12. Излучатель 12, в свою очередь, направит в атмосферу короткий электромагнитный импульс, который, практически немедленно будет принят приемником электромагнитных

импульсов 7 наземного модуля и направлен на вход 2 измерителя временных интервалов 2.

Спустя другой промежуток времени, так же обусловленный скоростью распространения звука в воздушной среде, разделяющей наземный и высотный модули, расстоянием между ними и скоростью ветра, акустический импульс, излученный излучателем 13 атмосферного модуля, достигнет акустического приемника 8 наземного модуля, преобразуется в электрический импульс и поступит на вход 3 измерителя временных интервалов 2.

Измеритель временных интервалов 2 определяет величины t_1 и t_2 , равные временным интервалам между приходом синхроимпульса на его вход 1 и приходом сигналов на его входы 2 и 3. При этом величины t_1 и t_2 соответственно равны временам пролета акустического импульса от наземного модуля до высотного и в обратном направлении, поскольку t_1 и t_2 представляют собой разности времени распространения электромагнитного и акустического импульсов между наземным и высотным модулями в прямом (от точки X_1 до X_2) и в обратном (от точки X_2 до X_1) направлениях соответственно. Эти значения поступают на входы 1 и 2 вычислительного блока 9 (на вход 3 которого поступила информация о величине расстояния L между наземным и высотным модулями в момент выполнения измерений). В вычислительном блоке 9 по формулам (3.6) - (3.8) выполняется вычисление скорости ветра и температуры воздуха.

3.1.3 Портативные автоматические метеостанции на платформе БПЛА

3.1.3.1 Для контактных измерений вертикальных профилей температуры воздуха, влажности воздуха и атмосферного давления в соответствии с методиками, изложенными в пп. 3.1.1 – 3.1.2 настоящей работы, разработана портативная электронная метеостанция ПЭМС-БПЛА, устанавливаемая на платформе описанного выше гексакоптера DJI S900 (рис. 3.6). (метеостанция разработана Кураковым С.А. (ИМКЭС СО РАН) по техническому заданию автора [156]).

Измерения текущих значений метеорологических величин могут производиться как на этапе вертикального подъема БПЛА, так и на этапе его спуска в диапазоне высот АПС от 0 м до 2000 м в режиме реального времени. Предусмотрен режим измерения в отдельных «точках зависания» БПЛА, задаваемых оператором. Информация об измеренных значениях метеорологических величин передается в наземный модуль ПЭМС по каналу радиосвязи. Вычисления средних, максимальных и минимальных значений метеорологических характеристик за заданный временной интервал производится в наземном модуле (в контроллере КСОД). Кроме того, ПЭМС-БПЛА может выступать в качестве высотного модуля (ВН) для реализации трассового метода измерений ветровых характеристик и температуры воздуха (см. пп. 3.1.1.6, 3.1.2.2 настоящей работы).

Данные с ПЭМС передаются в режиме реального времени по радиоканалу на наземный блок сбора и обработки данных КСОД (рис. 3.7).

Для изготовления ПЭМС-БПЛА под контролем автора разработан комплект эскизной конструкторской документации АМЯ2.702.109, по которому в ИМКЭС СО РАН изготовлено 2 экспериментальных образца метеостанции. ПЭМС-БПЛА использована в составе мобильного измерительного комплекса МИК, входящего в состав автоматизированной информационно-вычислительной системы ЭО ИВС, предназначенной для мезомасштабного метеорологического и экологического контроля состояния АПС (см. главу 5 настоящей работы).

В таблице 3.3 приведены технические характеристики основных блоков ПЭМС-БПЛА.

Для подтверждения функциональных возможностей экспериментального образца ПЭМС-БПЛА были проведены его натурные испытания [157]. Испытания проводились в летнее и зимнее время при температурах воздуха от плюс 25°C (лето) до минус 22°C (зима). (рис. 3.8).



Рисунок 3.6- Внешний вид
ЭО ПЭМС-БПЛА на
гексакоптере DJI S900

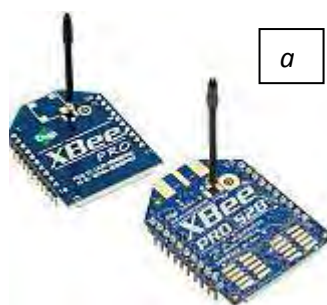


Рисунок 3.7 - а) приемопередатчики XBee-PRO
(высотный и наземный модуль), б) контроллер
сбора и обработки данных (наземный модуль)

Таблица 3.3 - Основные технические характеристики ПЭМС-БПЛА

Функциональный блок	Технические характеристики	Значение
Датчик температуры воздуха DS18B20	диапазон измерения	от -50 до $+50$ °C
	погрешность измерения	$\pm 0,2$ °C при $T \leq +30$ °C; $\pm 0,3$ °C при $T > +30$ °C;
	постоянная времени измерения	XX
Датчик влажности воздуха НН-5031	диапазон измерения	от 15 до 100 %;
	погрешность измерения	± 2 % при $T > 0$ °C; ± 5 % при $T < 0$ °C;
	постоянная времени измерения	XX
Датчик атмосферного давления MPL3115A2	диапазон измерения	от 520 до 800 мм рт. ст.;
	погрешность измерения	$\pm 0,5$ мм рт. ст.
	постоянная времени измерения	XX
Блок передачи данных XBee-PRO	Рабочая частота	2,4 ГГц
	Скорость передачи	до 250 кбит/с
	Дальность передачи (при прямой видимости)	До 2500 м



Рисунок 3.8 - Натурные испытания ПЭМС-БПЛА в летнее (а) и зимнее (б) время

При проведении летних испытаний максимальная высота подъема БПЛА составила 2000 метров, радиосвязь с ПЭМС-БПЛА осуществлялась в пределах прямой видимости. Подъем до высоты 2000 метров прошел за 11 минут (скорость подъема $v_{\text{ср}} \geq 3$ м/с), спуск – за 8 минут (скорость спуска $v_{\text{ср}} \geq 4$ м/с). Погода во время измерений имела неустойчивый характер, присутствовали перистые облака, в конце эксперимента появилась сплошная облачность.

Некоторые результаты измерений показаны на рис. 3.9.

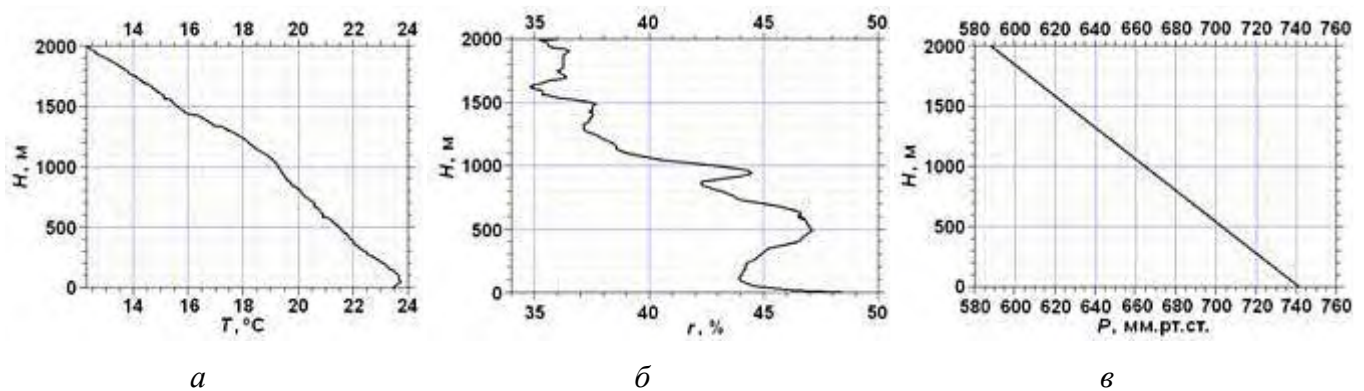


Рисунок 3.9 - Результаты измерения вертикальных профилей метеовеличин: *а* – температура воздуха; *б* – относительная влажность; *в* – атмосферное давление

Рисунок 3.9,*а* показывает измеренный вертикальный профиль температуры воздуха. Поскольку измерения проводились после 16:00 местного времени, ПЭМС-БПЛА зафиксировал наличие небольшого инверсного температурного слоя на высоте 100 м (температура повысилась на $\sim 0,5$ $^{\circ}\text{C}$). На этой же высоте отмечено уменьшение относительной влажности (примерно на 5 % от приземного значения). В остальном, ход измеренного профиля температуры соответствует

типовым дневным вертикальным профилям температуры в АПС. Измеренный вертикальный профиль атмосферного давления (рисунок 3.9,в) точно соответствует барической формуле (изменению атмосферного давления с высотой).

Проведенные натурные и лабораторные подтвердили возможность использования разработанного метода и реализующего его технического устройства (ПЭМС-БПЛА) для контроля вертикальных профилей метеорологических характеристик АПС.

3.1.3.2 Разработанная портативная ультразвуковая метеостанция ПУМС-БПЛА на платформе гибридного привязного аэростата К-25М/А предназначена для контактных измерений вертикальных профилей скорости и направления ветра (включая вертикальную его составляющую), температуры воздуха, влажности воздуха и атмосферного давления, а также турбулентных характеристик атмосферы в соответствии с методиками, изложенными в пп. 3.1.1 – 3.1.2 настоящей работы. Кроме того, так же, как и ПЭМС-БПЛА, ПУМС-БПЛА может выступать в качестве высотного модуля (ВМ) для реализации трассового метода измерений ветровых характеристик и температуры воздуха (см. пп. 3.1.1.6, 3.1.2.2 настоящей работы) (рис. 3.1).

Измерения текущих значений метеорологических величин могут производиться как на этапе вертикального подъема аэростата, так и на этапе его спуска в диапазоне высот АПС от 0 м до 1000 м в режиме реального времени. Основным режимом измерений являются измерения в отдельных «точках зависания» аэростата, задаваемых оператором. Информация об измеренных значениях метеорологических величин передается в наземный модуль ПУМС по каналу радиосвязи. Вычисления средних, максимальных и минимальных значений метеорологических характеристик за заданный временной интервал, а также турбулентных характеристик АПС, производится в наземном модуле (в контроллере КСОД).

Автономность работы ПУМС-БПЛА составляет не менее 120 часов и полностью обеспечивается емкостью элементов питания.

ПУМС-БПЛА состоит из двух функциональных модулей: высотного (устанавливаемого на аэростате) и наземного. Высотный модуль включает в свой состав измерительный блок с датчиками метеорологических и турбулентных характеристик атмосферы (рис. 3.10), передающую часть блока беспроводной передачи данных (рис. 3.10,б), элементы питания. Измерительный блок представляет собой УАМС АМК-03 (см. параграф 2.3 настоящей работы), модернизированную для установки на аэростат (АМК-03А на основе УТАМ-75). Наземный модуль установлен на базе легкого автомобильного прицепа. В его состав входят приемная часть блока беспроводной передачи данных, блок согласования интерфейсов БСИ, контроллер сбора и обработки данных КСОД (рис. 3.11). С целью минимизации аэродинамического и радиационного влияния баллона аэростата на измерения, ПУМС установлен на подвеске, находящейся на расстоянии 2 м ниже оболочки аэростата.

В таблице 3.4 приведены технические характеристики основных блоков ПУМС-БПЛА.

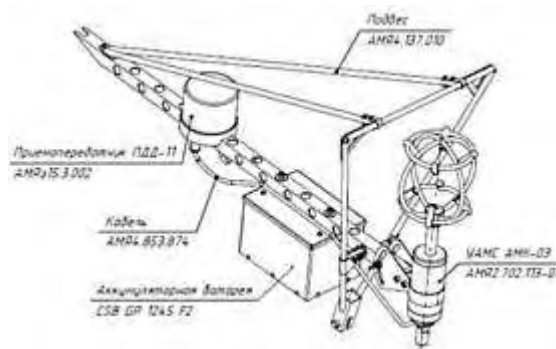
Для подтверждения функциональных возможностей экспериментального образца ПУМС-БПЛА были проведены его натурные испытания (рис. 3.12) в декабре 2015 г. Первоначальные измерения в течение 1 часа проводились при нахождении ПУМС-БПЛА на земле. Затем в течение 30 мин проводился подъем аэростата. Из-за сильных порывов приземного ветра подъем был осуществлен только до высоты 130 м, на которой проводились измерения метеорологических величин в течение 10 мин. Затем в течение 10 минут было выполнено опускание аэростата.

Измерения проводились с 10-минутным осреднением и 10-минутным интервалом времени между регистрируемыми отсчетами метеовеличин.

Результаты измерений метеовеличин на земле и в полете представлены на рисунках 3.13 и 3.14: данные приведены для 2-х циклов измерений: первый с 13:00 по 14:07 (соответствующие данные обозначаются на графиках цифрой 1 – аэростат на земле) и второй с 14:15 по 15:11 (обозначаются цифрой 2 – аэростат при подъеме и спуске).



а) YAMC AMK-03A



в) 1 – приемопередатчик ПДД-11-1,
2 – аккумулятор,
3 – АМК-03А



б) приемопередатчики
XBee-PRO



а) контроллер сбора и
обработки данных
КСОД



б) блок согласования
интерфейсов БСИ
Рисунок 3.11 -Блоки
наземного модуля

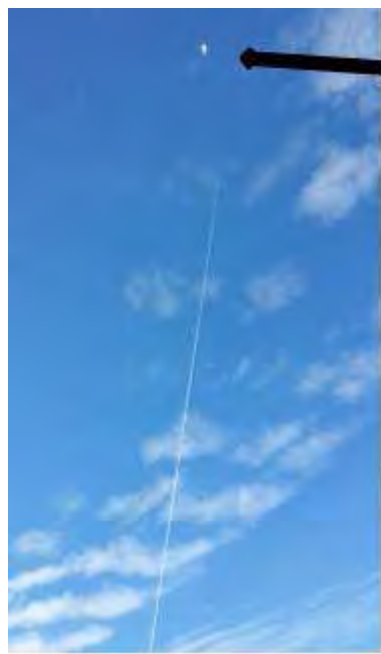
Рисунок 3.10 - Блоки высотного модуля ПУМС-БПЛА

ПУМС

Таблица 3.4 - Основные технические характеристики ПУМС-БПЛА

Функциональный блок АМК-03А	Технические характеристики	Значение
Ультразвуковой термоанемометр УТАМ-75	диапазон измерения скорости ветра	от 0 до 30 м/с
	погрешность измерения скорости ветра	$\pm (0,1 + 0,02 V)$ м/с
	постоянная времени измерения скорости ветра	$2 \cdot 10^{-4}$ с
	частота измерений мгновенных значений скорости ветра	до 80 Гц
	диапазон измерения температуры воздуха	от -50 до $+50$ °C
	погрешность измерения температуры воздуха	$\pm 0,3$ °C

Функциональный блок АМК-03А	Технические характеристики	Значение
	постоянная времени измерения температуры воздуха	$2 \cdot 10^{-4}$ с
	частота измерений мгновенных значений температуры воздуха	до 80 Гц
Датчик влажности воздуха НН-5031	диапазон измерения	от 15 до 100 %;
	погрешность измерения	± 2 % при $T > 0$ °С; ± 5 % при $T < 0$ °С;
	постоянная времени измерения	ХХ
Датчик атмосферного давления MPL3115A2	диапазон измерения	от 520 до 800 мм рт. ст.;
	погрешность измерения	$\pm 0,5$ мм рт. ст.
	постоянная времени измерения	ХХ
Блок передачи данных XBee-PRO	Рабочая частота	2,4 ГГц
	Скорость передачи	до 250 кбит/с
	Дальность передачи (при прямой видимости)	До 2500 м



Летнее время



Зимнее время



Рисунок 3.12 - Натурные испытания ПУМС
на платформе гибридного аэростата К-25М/А

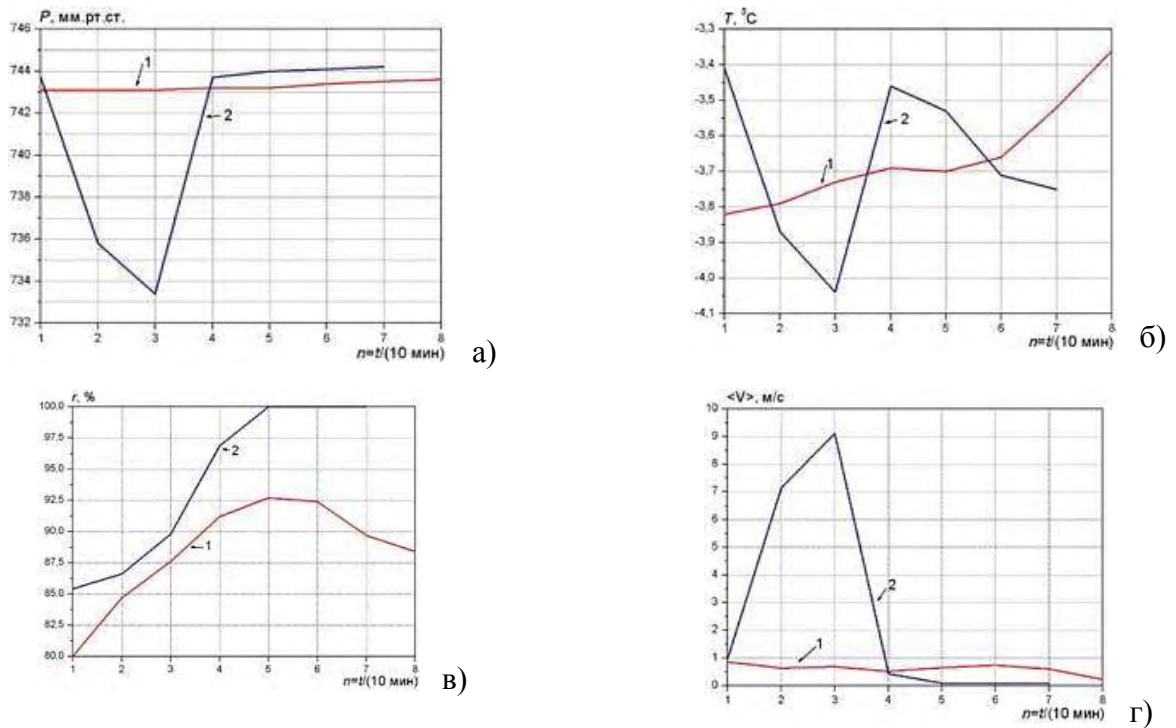


Рисунок 3.13 - Результаты измерения метеорологических величин ЭО ПУМС-БПЛА с борта аэростата К-25М/А: а – давление; б – средняя температура; в – относительная влажность; г – средняя скорость горизонтального ветра. Цифры по оси абсцисс отмечают 10-ти минутные интервалы осреднения измеренных метеовеличин

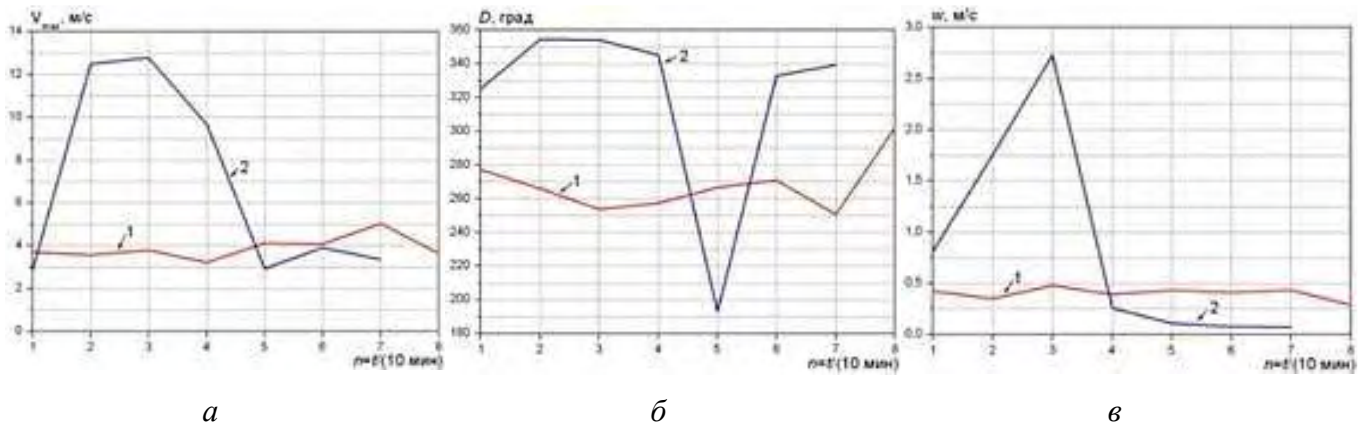


Рисунок 3.14 - Результаты измерения метеорологических величин ЭО ПУМС-БПЛА с борта аэростата К-25М/А: а – максимальная (за 10 минутный интервал измерений) мгновенная (с 2-х секундным усреднением) скорость горизонтального ветра; б – среднее направление горизонтального ветра; в – средняя скорость вертикального ветра

Временная привязка графиков 1 и 2 сдвинута примерно на 1 час (по шкале абсолютного времени график 2 следует за графиком 1).

Приведенные результаты измерений атмосферного давления (рис. 3.13,а график 2) показывают, что в течение первых 30 минут происходил подъем аэростата (давление уменьшалось), затем в течение последующих 10 минут происходил его спуск (давление повышалось. Последующие полчаса аэростат снова находился на земле. После 4-го отсчета значения давления на графиках 1 и 2 отличаются примерно на 1 мм рт.ст.

Проведенные натурные и лабораторные подтвердили возможность использования разработанного метода и реализующего его технического устройства (ПУМС-БПЛА) для контроля вертикальных профилей метеорологических и турбулентных характеристик АПС [157].

3.2 Дистанционный оптический пробой и его использование в задачах контроля АПС

3.2.1 Физические основы метода контроля АПС на основе эффекта дистанционного оптического пробоя

3.2.1.1 Оптический пробой в газе представляет собой процесс возникновения и развития бурной ионизации газовых молекул под действием мощного лазерного излучения. Это явление сопровождается появлением «лазерной искры», распространением ударной волны (акустического импульса) и фронта ионизации, перекрытием лазерного пучка за счет поглощения и рассеяния оптического излучения в образовавшейся плазме [Ошибка! Источник ссылки не найден.].

В формировании оптического пробоя в реальной атмосфере большую роль играют ее следующие характеристики: прозрачность и турбулентность атмосферы, степень запыленности и газовый состав и пр. Обусловленность оптического пробоя оптико-метеорологическими и физико-химическими

характеристиками атмосферы дает возможность контроля за этими характеристиками на основе регистрации параметров оптического пробоя [159].

В спектре эмиссионного оптического излучения плазмы оптического пробоя содержится информация об элементном составе веществ (частиц аэрозоля и окружающих их атмосферных газов), находящихся в области локализации лазерной искры. Качественный состав атмосферного аэрозоля можно определить зарегистрировав спектр излучения в определенном спектральном диапазоне и проведя идентификацию отдельных спектральных линий. Вопрос о количественном содержании в аэрозольном облаке различных по химическому составу компонент является более сложным. Соотношение между интенсивностью спектральной линии регистрируемой приемной системой лидара и концентрацией какой-либо аэрозольной компоненты является неоднозначным и зависит от большого числа внешних факторов. На это соотношение оказывают непосредственное влияние величина плотности мощности лазерного излучения в области оптического пробоя, в свою очередь, зависящая от параметров лазерного импульса и оптико-метеорологических условий на трассе зондирования, прозрачность атмосферы, размер аэрозольных частиц и др. Интенсивность эмиссионных спектральных линий плазмы в большой степени зависит от параметров плазмы оптического пробоя, характеризующих процесс возбуждения эмиссионных линий химических элементов, в первую очередь, электронной температуры плазмы. Аналитический учет всех этих факторов трудно осуществим, что приводит к большим погрешностям оценок концентрации аэрозольных компонент по интенсивности свечения соответствующих им спектральных линий [160].

На практике, для оценки относительной концентрации в воздухе аэрозольных веществ используют некий базовый элемент, концентрация которого в атмосфере известна (например, атмосферный азот). Относительную концентрацию n_x элементов оценивают, используя простое эмпирическое соотношение [161]:

$$\frac{n_x}{n_\delta} = C_x \frac{I_{\lambda x}}{I_{\lambda \delta}}, \quad (3.9)$$

где n_δ – концентрация атомов базового (эталонного) элемента, относительно которого определяется концентрация атомов других веществ, $I_{\lambda x}/I_{\lambda \delta}$ – измеренное за вычетом уровня фона отношение интенсивностей спектральных линий определяемого и эталонного вещества, C_x – калибровочный коэффициент, определяемый эмпирически в лабораторных условиях с контролируемыми парциальными концентрациями эталонного и определяемого веществ [162].

Основной вклад в погрешность концентрационных измерений вносит неточность задания коэффициентов C_x , обусловленная случайным характером реализации эффективной энергии электронов в плазме оптического пробоя, получаемой в лабораторных условиях и в реальной атмосфере. Эта погрешность может быть существенно уменьшена путем построения в лабораторных условиях зависимостей C_x от отношения интенсивностей двух фиксированных спектральных линий ($I_{\lambda 1}/I_{\lambda 2}$), присутствующего в атмосфере эталонного газа, косвенно характеризующего энергию электронов, возбуждающих атомы газа. Параметр ($I_{\lambda 1}/I_{\lambda 2}$) измеряется одновременно с интенсивностями спектральных линий, определяемых веществ и является входным в номограмму для определения калибровочного коэффициента. Примеры построенных в лабораторных условиях графиков для определения коэффициента C_x некоторых газов и аэрозолей приведены на рис. 3.15 [163].

В качестве эталонного газа принят азот ($\lambda = 3,995$ нм, $\lambda = 4,110$ нм).

Эмпирическое выражение (3.9) позволяет провести оценку относительного содержания вещества только для случаев однокомпонентного аэрозоля, то есть когда в зоне пробоя присутствуют аэрозольные частицы только одного сорта.

В противном случае, соотношение интенсивностей линии эталонного вещества (азота) и искомого будет нарушено за счет плазменных ореолов, возникших вокруг частиц другого сорта.

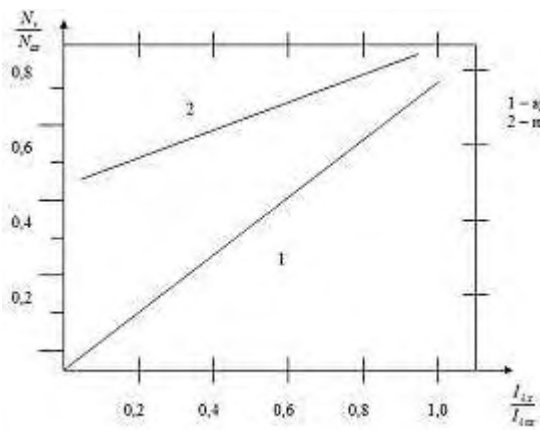
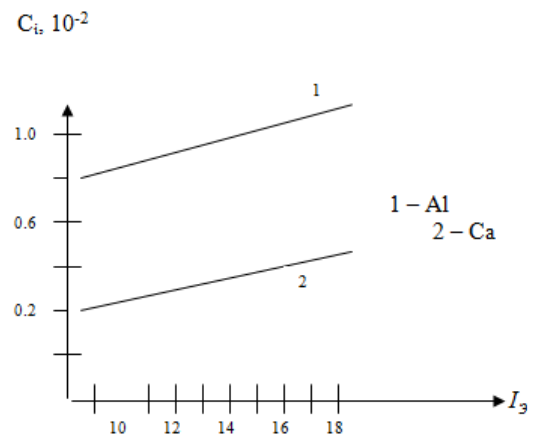
*a**б*

Рисунок 3.15 - Калибровочный график для определения относительной концентрации веществ в воздухе: *a* – газов (аргона и неона), *б* – твердых аэрозолей (алюминия и кальция)

При этом, относительная концентрация в воздухе аэрозольных компонент определяется более сложным соотношением, требующим более объемных калибровочных измерений.

Рассмотрим случай оптического пробоя, возникающего при распространении лазерного излучения в аэрозоле, содержащем частицы N различных химических компонент [163]. При достижении интенсивности излучения пороговых значений возникают отдельные очаги оптического пробоя, центрами которых являются аэрозольные частицы. В плазменном ореоле, окружающем частицу, происходит возбуждение паров вещества частицы и окружающих атмосферных газов. Наиболее интенсивно возбуждаются атомы атмосферного азота, имеющие высокую концентрацию в атмосфере и сравнительно низкие пороги возбуждения. Интенсивность свечения спектральной линии K -й компоненты аэрозоля ($K = 1, 2, \dots, N$) определяется суммарной интенсивностью свечения вещества всех частиц этой компоненты, находящихся в области пробоя:

$$I_k = \sum_{L=1}^{n_k} I_L^{(k)}, \quad (3.10)$$

где $I_L^{(k)}$ – интенсивность свечения одной частицы K -й аэрозольной компоненты, n_k – количество частиц k -й компоненты в области пробы.

Интенсивность свечения спектральной линии азота, регистрируемая приемной системой лидара, складывается из суммарной интенсивности свечения азота, возбуждаемого всеми аэрозольными частицами, находящимися в области пробы:

$$I_a = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{n_i} I_j^{(a)}. \quad (3.11)$$

Здесь $I_j^{(a)}$ – интенсивность линии азота, возбуждаемого в окрестности j -й аэрозольной частицы, n_i – количество частиц, i -й компонент, n – число аэрозольных компонент. Будем считать, что интенсивность линии азота, возбуждаемого i -й компонентой аэрозоля пропорциональна количеству частиц i -й компоненты в области пробы. Коэффициент пропорциональности K_i зависит от химического состава i -й компоненты и энергетического спектра возбуждающих атомы газа электронов плазмы: $K_i = K_i(E)$. В этом случае соотношение 1.3 принимает вид:

$$I_a = \sum_{i=1}^n I_i^{(a)}, \quad (3.12)$$

где

$$I_i^{(a)} = K_i(\varepsilon) n_i. \quad (3.13)$$

С учетом выражений (3.10) и (3.13) можно записать систему из соотношений для относительной интенсивности линий азота и аэрозольных компонент:

$$\frac{I_a}{I_k} = \frac{\sum_{i=1}^n I_i^{(a)}}{I_k}, \quad (3.14)$$

$$K = 1, 2, \dots, n$$

Распишем соотношение системы (3.14) в виде:

$$\frac{I_a}{I_k} = \frac{I_k^{(a)}}{I_k} + \frac{\sum_{i \neq k}^n I_i^{(a)}}{I_k}. \quad (3.15)$$

Отношение $I_k^{(a)} / I_k$ представляет собой относительную интенсивность свечения азота $I_k^{(a)}$, возбужденного K -й компонентой аэрозоля, и самой этой компоненты I_k . Это отношение зависит от энергетического спектра электронов плазмы и может быть определено в контролируемых условиях в аэрозоле, состоящем только из частиц K -й компоненты.

$$\frac{I_k^{(a)}}{I_k} = \gamma_k(\varepsilon). \quad (3.16)$$

Таким образом, с учетом (3.16) получим из (3.14) следующую систему соотношений:

$$\frac{I_a}{I_k} = \gamma_k(\varepsilon) + \frac{\sum_{i \neq k}^n I_i^{(a)}}{I_k}. \quad (3.17)$$

$$K = 1, 2, \dots, n$$

или умножив обе части равенства на I_k

$$I_a = \gamma_k(\varepsilon) I_k + \sum_{i \neq k}^n I_i^{(a)}. \quad (3.18)$$

$$K = 1, 2, \dots, m$$

Возьмем два соотношения из системы (3.18) ($K = \ell, 1 \leq \ell \leq n, m \neq \ell$) и получим:

$$\begin{aligned} I_a &= \gamma_m(\varepsilon) I_m + \sum_{i \neq m}^n K_i(\varepsilon) n_i \\ I_a &= \gamma_\ell(\varepsilon) I_\ell + \sum_{i \neq \ell}^n K_i(\varepsilon) n_i. \end{aligned} \quad (3.19)$$

Раскроем в этих выражениях суммы следующим образом:

$$I_a = \gamma_m(\varepsilon)I_m + K_e(\varepsilon)n_m + \sum_{i \neq m, \ell}^n K_i(\varepsilon)n_i,$$

$$I_a = \gamma_e(\varepsilon)I_e + K_m(\varepsilon)n_m + \sum_{i \neq m, \ell}^n K_i(\varepsilon)n_i. \quad (3.20)$$

Вычитая почленно из 1-го уравнения 2-е, получим соотношение:

$$\gamma_m(\varepsilon)I_m - K_m(\varepsilon)n_m = \gamma_e(\varepsilon)I_e - K_e(\varepsilon)n_e$$

$$m = 1, 2, \dots, n.$$

$$\ell = 1, 2, \dots, m. \quad (3.21)$$

Отсюда

$$K_i(\varepsilon)n_i = \gamma_i(\varepsilon)I_i - \gamma_e(\varepsilon)I_e + K_e(\varepsilon)n_e$$

$$K_e(\varepsilon)n_e = \gamma_i(\varepsilon)I_i - \gamma_m(\varepsilon)I_m + K_m(\varepsilon)n_m \quad (3.22)$$

Подставив первое соотношение (3.22) в первое (3.20), а второе (3.20) во второе (3.20) и проведя элементарные преобразования, получим:

$$(n-1)K_m(\varepsilon)n_m = I_a - \gamma_e(\varepsilon)I_e + (n-2)\gamma_m(\varepsilon)I_m - \sum_{i \neq m, \ell}^n \gamma_i(\varepsilon)I_i,$$

$$(n-1)K_e(\varepsilon)n_e = I_a - \gamma_m(\varepsilon)I_m + (n-2)\gamma_e(\varepsilon)I_e - \sum_{i \neq m, \ell}^n \gamma_i(\varepsilon)I_i. \quad (3.23)$$

Отсюда относительная концентрация ℓ -й и m -й компонент аэрозоля запишется в виде:

$$\frac{n_e}{n_m} = \frac{K_m(\varepsilon)}{K_e(\varepsilon)} \cdot \frac{1 + (n-2) \cdot \gamma_e(\varepsilon) \frac{I_e}{I_a} - \sum_{i \neq m, \ell}^n \gamma_i(\varepsilon) \frac{I_i}{I_a}}{1 + (n-2) \cdot \gamma_m(\varepsilon) \frac{I_m}{I_a} - \sum_{i \neq \ell}^n \gamma_i(\varepsilon) \frac{I_i}{I_a}} \quad (3.24)$$

В окончательное выражение для расчета относительной концентрации различных по химическому составу аэрозольных компонент входят только относительные значения интенсивностей спектральных линий (I_i / I_a) . Значения коэффициентов $K_i(\varepsilon)$ и $\gamma_i(\varepsilon)$ определяются в контролируемых условиях для однокомпонентного аэрозоля. Для учета зависимости этих коэффициентов от энергетического спектра электронов плазмы в контролируемых условиях

измеряется набор значений $K(\varepsilon)$ и $\gamma(\varepsilon)$ при различных мощностях лазерного импульса. При зондировании аэрозоля в реальной атмосфере следует определять параметры плазмы пробоя, которые являются входными данными для выбора конкретных значений K_i и γ_i .

3.2.1.2 Для определения относительной концентрации веществ в воздухе на основе использования полученных эмпирических выражений (3.24) требуется, так же, информация об энергетических параметрах плазмы пробоя (электронной концентрации n_e и электронной температуре T_e). Классические методы определения этих параметров, основанные на измерении уширения спектральных линий, обладают тем общим недостатком, что для расчета значений T_e и n_e требуется введения априорной информации о характере распределения электронов по энергии. Наиболее просто эта задача решается в приближении максвелловского распределения этих величин [160]. В случае же неравновесной плазмы такой подход может привести к значительным погрешностям в определении ее параметров. Кроме того, этот метод позволяет получать только усредненную по объему и времени информацию о параметрах плазмы, что значительно снижает его информативные возможности при диагностике лазерной плазмы, для которой характерно резко неоднородное распределение электронов по энергиям для центральной и периферийной областей пробоя и быстрое их изменение во времени.

Более свободным от модельных представлений исследуемой плазмы является метод зондирования плазмы лазерным излучением [160]. Суть метода состоит в том, что монохроматичное лазерное излучение направляется на плазменный объект, и регистрируется спектр рассеянного плазмой излучения, который несет информацию об электронной концентрации и температуре в плазме. Метод позволяет производить диагностику локальных областей плазмы путем точечной фокусировки на плазменный объект зондирующего лазерного излучения. Наиболее информативным этот метод является в случае диагностики оптически плотной высокотемпературной плазмы. (Плазма оптического пробоя, для которой характерны значения $n_e = 10^{16}-10^{18} \text{ см}^{-3}$ и $T_e = 10^4 \text{ К}$, является

объектом именно такого рода). В [165] приведены результаты экспериментальных исследований параметров плазмы оптического пробоя методом коллективного рассеяния в лабораторных условиях, подтверждающие практическую возможность использования метода для диагностики плазмы оптического пробоя.

Спектр коллективного рассеяния состоит из центрального ионного пика, центр которого находится на длине волны зондирующего излучения и двух симметрично отстоящих от него пиков электронных сателлитов (рис. 3.16) [164].

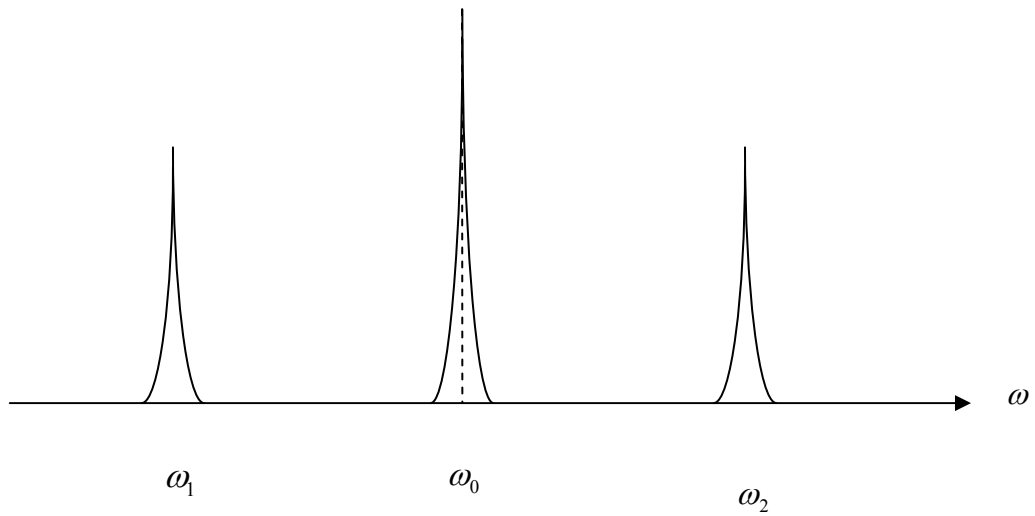


Рисунок 3.16 - Спектр коллективного рассеивания: ω_0 – частота генерации зондирующего лазера (ионный пик), ω_1 , ω_2 – электронные сателлиты

Частотный интервал $\Delta\omega$ между ионным пиком и электронным сателлитом определяется выражением:

$$\Delta\omega = \omega_p (1 + 3/\alpha^2)^{1/2} \quad (3.25)$$

где $\omega_p = (4\pi e^2 n_e / m_e)^{1/2}$ – электронная плазменная частота, (e – заряд электрона, m_e – масса электрона, n_e – концентрация электронов), $\alpha = \lambda(4\pi n_e e^2 / kT_e)^{1/2} / 4\pi \sin \Theta / 2$ – параметр Салпетера, характеризующий вид спектра (c – скорость света, Θ – угол рассеяния зондирующего излучения). Электронная концентрация и температура плазмы определяется из соотношений:

$$T_e = \frac{C^2 e^2 n_e}{4\pi \nu^2 \alpha^2 k \cdot \sin \Theta / 2} \cdot \quad (3.26)$$

$$n_e = \omega_p m_e / 4\pi^2 e^2$$

Параметр α зависит не только от электронной плотности и температуры плазмы, но и от условий эксперимента – угла Θ , под которым наблюдается рассеяние и длины волны зондирующего излучения λ . Это обстоятельство позволяет варьировать вид спектра рассеяния одного и того же плазменного объекта, переходя в более удобную для анализа область коллективного рассеяния – в этой области параметры плазмы могут быть определены с учетом соотношений (3.25, 3.26) путем измерения интервала $\Delta\omega$ между ионным пиком и электронным сателлитом. Кроме того, из (3.25) следует, что при изменении параметров плазмы T_e и n_e происходит соответствующее изменение величины интервала $\Delta\omega$, что позволяет достаточно просто определять динамику изменения параметров плазмы, регистрируя изменение интервала $\Delta\omega$ во времени [165].

Автором предложено несколько новых технических решений для контроля параметров плазмы оптического пробоя по спектрам коллективного рассеяния (рис. 3.17) [9, 10], однако следует заметить, что практическая реализация данного способа связана с существенными трудностями.

Основным фактором, препятствующим практическому использованию метода коллективного рассеяния для определения параметров плазмы дистанционного оптического пробоя, является низкая интенсивность сигнала рассеяния, составляющая величину порядка 10^{-10} – 10^{-14} интенсивности зондирующего излучения. Величина полезного сигнала непосредственно определяется энергией зондирующего лазерного импульса, светосилой спектрального прибора и чувствительностью фотоприемника. Возможность увеличения интенсивности зондирующего излучения ограничивается уровнем, при котором начинают проявляться эффекты воздействия зондирующего излучения на плазму, а светосила спектральной аппаратуры и чувствительность фотоприемников ограничены их техническими возможностями. Кроме того,

полезный сигнал рассеяния приходится регистрировать на фоне различного рода помех, связанных с собственным свечением плазмы, паразитным рассеянием зондирующего сигнала на гетерогенных частицах, присутствующих в области лазерной искры и т.п. Для решения этих проблем автором предложены несколько технических решений [11, 13] (рис. 3.17), позволяющих в 2-3 раза улучшить отношение сигнал-шум при лазерной диагностике плазмы, но они не позволяют кардинально решить этот вопрос для случая дистанционного анализа. Поэтому практическое использование перспективного метода коллективного рассеяния для лазерной диагностики плазмы дистанционного оптического пробоя требует дальнейшего совершенствования спектральной и регистрирующей аппаратуры, а также способов фильтрации полезного сигнала.

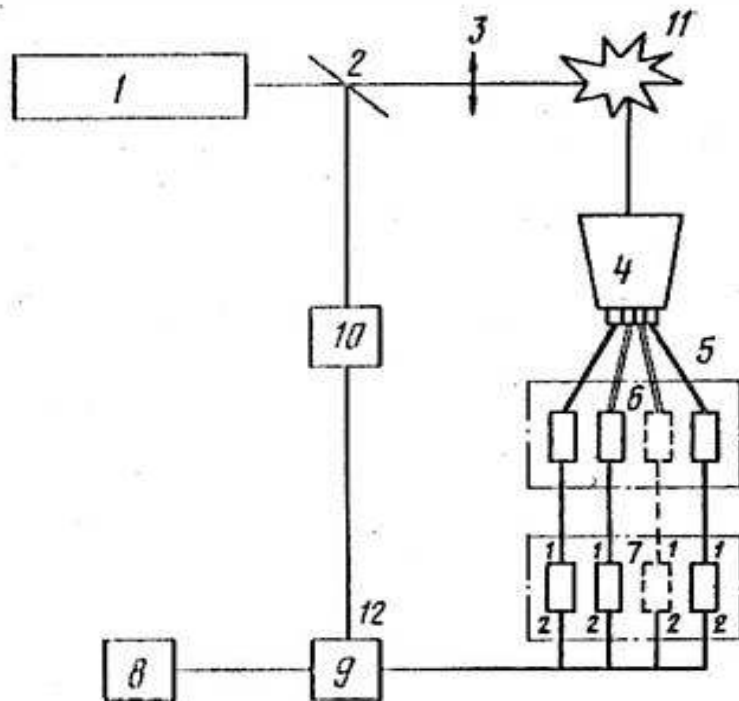


Рисунок 3.17 - Устройство для измерения временных зависимостей характеристик плазмы оптического пробоя: 1 – зондирующий лазер, 2 – светоделительная пластинка, 3 – фокусирующий объектив, 4 – спектрометр. 5 – коллекторный световод, 6 – фотоприемники, 7 – многоканальный счетчик тактовых импульсов, 8 – генератор тактовых импульсов, 9 – электронный ключ, 10 – фотоприемник

3.2.1.3 Как отмечалось в предыдущем пункте, оптический пробой является источником интенсивного акустического импульса, который может быть использован для контроля метеорологических характеристик атмосферы.

С этой целью в двух точках атмосферы на заданной высоте, формируют на некотором расстоянии друг от друга два очага оптического пробоя, являющихся источниками акустических импульсов (рис. 3.18) [19]. В точке на поверхности земли (из которой инициировался оптический пробой) принимают эти два акустических импульса и измеряют время распространения звука от первого и второго очагов.

Скорость распространения звука от источника до точки приема складывается из двух составляющих – собственной скорости звука в воздухе и скорости движения самого воздуха (скорости ветра) в направлении к точке приема.

Из рис. 3.18 следует, что для 1-го источника звука эта скорость представляет собой сумму собственной скорости звука в воздухе и проекции скорости ветра на направление L_1 , а для 2-го – разность собственной скорости звука в воздухе и проекции скорости ветра на направление L_2 .

Так как точка приема находится на оси симметрии точек расположения источников звука ($L_1 = L_2 = L$), время распространения звука от 1-го источника до точки приема составит величину $t_1 = L / (V_{зв} + V_{в} \sin \alpha)$, а время распространения звука от 2-го источника до точки приема – величину $t_2 = L / (V_{зв} - V_{в} \sin \alpha)$. Измерив величины t_1 и t_2 , по известным L и α (эти величины задаются условиями проведения измерений), можно из соотношения:

$$V_{в} = L (t_2 - t_1) / 2 t_1 t_2 \sin \alpha \quad (3.27)$$

вычислить искомое значение компоненты скорости ветра $V_{в}$ на высоте нахождения источников звука (в предположении, что $V_{в}$ не зависит от высоты и является постоянной величиной).

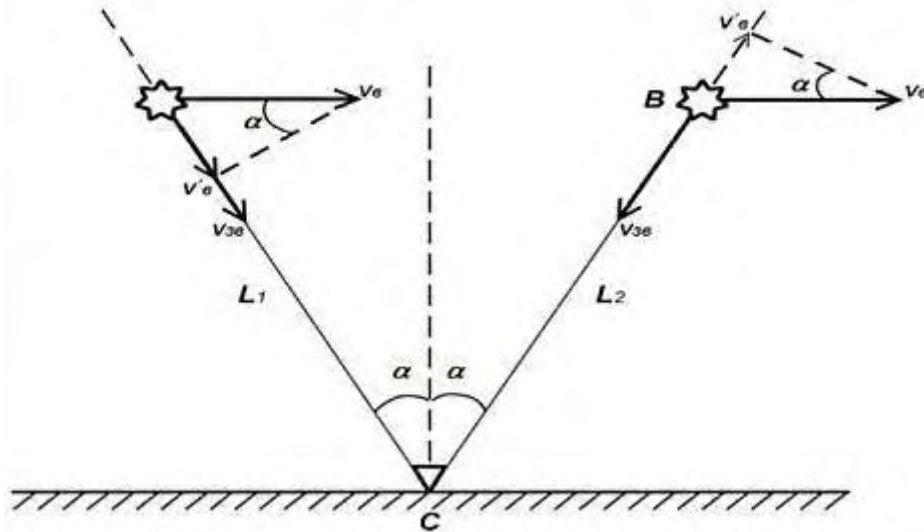


Рисунок 3.18 - Способ измерения скорости ветра с использованием эффекта дистанционного оптического пробоя: А и В – точки локализации очагов оптического пробоя (точечные источники звука), С – точка приема звука (точка нахождения акустического приемника); $L_1 = L_2 = L$ – расстояние от источников звука до точки приема звука; α – угол между вертикалью и направлением на источник звука, V_B – величина вектора скорости ветра, коллиениарного прямой, связывающей источники звука А и В; V_B^l – величина проекции вектора скорости ветра на направление L_1 (L_2); V_{3B} – величина вектора скорости звука, направленного к точке приема (точке С).

В отличие от способа измерения скорости ветра в АПС с помощью содара (см. параграф 1.3 настоящей работы), в данном случае источником полезного сигнала являются активные акустические источники (очаги оптического пробоя), излучающие звук существенно большей мощности, чем рассеянный на неоднородностях атмосферы сигнал излучателя содара. Соответственно, для регистрации пришедших из атмосферы звуковых сигналов и определения времени распространения звука от источников до точки приема достаточно провести единичное измерение без длительного накопления полезного сигнала, как это осуществляется в содаре, что сокращает время измерения до нескольких секунд и, соответственно, повышает временное разрешение измерений (практически, временное разрешение способа определяется временем распространения

звукового импульса от источников до точки приема и составляет для практически достижимой высоты зондирования 100 метров величину порядка 0,3-0,4 с). Многократно повторяющиеся в течение длительного времени однотонные звуковые импульсы, излучаемые передающей антенной излучателя содара, обладают существенно большим демаскирующим действием, чем генерация мощного, но однократного звукового импульса в атмосфере что обеспечивает данному способу преимущество с точки зрения скрытности проводимых измерений (особенно важно в условиях ведения боевых действий).

3.2.2 Реализация метода контроля экологического и метеорологического состояния АПС на основе эффекта дистанционного оптического пробоя

Для реализации дистанционного оптического пробоя требуется концентрация в области каустики фокусирующей системы значительной плотности мощности лазерного излучения. Пороги оптического пробоя в газах имеют величины порядка $10^8 \div 10^{12}$ Вт/см² [157]. При наличии в среде твердофазного аэрозоля величина порога снижается за счет развития пробоя в ионизированных парах разогретых частиц, но тем не менее, остается достаточно высокой ($10^7 \div 10^9$ Вт/см²). При этом следует учитывать также потери энергии лазерного пучка при прохождении его через атмосферу за счет поглощения излучения и расфокусировки луча [160].

Зависимость величины порога оптического пробоя от длины волны лазерного излучения делает более предпочтительным использование лазеров инфракрасного диапазона, например, электроионизационных СО₂-лазеров [166], обладающих высокой импульсной мощностью, достаточной для инициирования оптического пробоя на трассах до 1000 м и более.

Основные характеристики использованного в работе СО₂-лазера:

1) длина волны излучения	10.6 мкм
2) энергия в импульсе, до	150 Дж
3) длительность лазерного импульса	100 - 200 нс

4) частота генерации импульсов

3×10^{-3} Гц

Недостатком CO₂-лазеров является низкая энергия кванта излучения, что не позволяет достичь высоких температур в плазме пробоя. Как показывают эксперименты, в плазме оптического пробоя наиболее эффективно возбуждаются спектральные линии, потенциал возбуждения которых составляет 2÷4 эВ. Линии, потенциал которых превышает 20÷25 эВ, практически не возбуждаются. Это уменьшает чувствительность лидара к веществам, атомы которых обладают высокими потенциалами возбуждения. К уменьшению чувствительности лидаров, построенных на базе CO₂-лазера, приводит, также, и то обстоятельство, что образующаяся вокруг аэрозольной частицы плазма является непрозрачной для длинноволнового лазерного излучения. Это блокирует доступ излучения к поверхности частицы и уменьшает время свечения спектральных линий составляющих ее атомов.

На рис. 3.19 приведена схема экспериментальной установки, использованной для инициирования дистанционного оптического пробоя и исследования метода контроля параметров атмосферы [161].

Излучение импульсного CO₂-лазера 1 фокусировалось оптической системой 3 в атмосферу. Эмиссионное излучение плазмы оптического пробоя принималось этой же системой и фокусировалось линзой на входную щель спектрометра 5. Регистрация спектра велась на высокочувствительную фотопленку. Оптическая система 3 представляла из себя телескоп Кассегрена с диаметром большого зеркала 500 мм.

Для измерения энергии лазерного импульса применялся измеритель мощности лазерного излучения ИМО-2М 4. Излучение на измеритель мощности 4 отводилось пластинкой КРС-6 2. В области каустики зондирующего излучения устанавливался генератор аэрозоля, служащий для распыления твердофазного аэрозоля заданного химического состава.

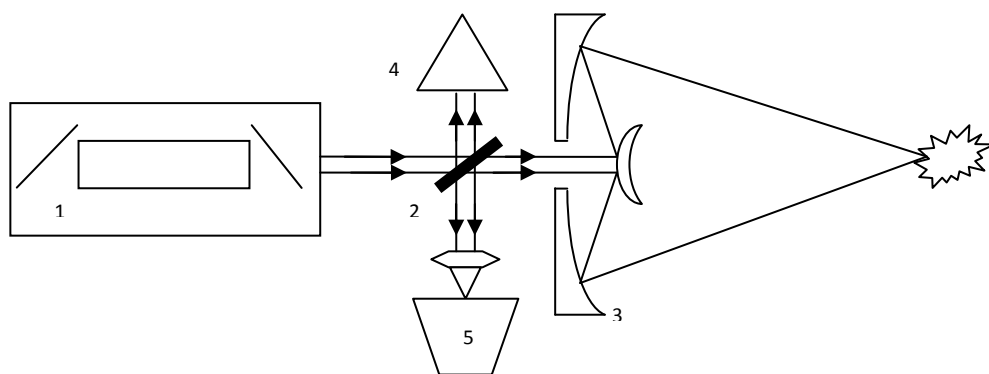


Рисунок 3.19 - Блок-схема установки для инициирования оптического пробоя в атмосфере: 1 – импульсный CO_2 -лазер, 2 – светоделительная пластинка (КРС-6), 3 - телескоп Кассегрена, $D = 500$ мм, 4 – измеритель мощности ИМО-2М, 5 – спектрометр СТЭ – 1.

Проведенные исследования показали, что пробой воздуха излучением CO_2 -лазера в реальной атмосфере в высокой степени определяется наличием в воздухе твердых частиц аэрозоля, локализуясь в окрестности поглощающих центров [167]. На рис. 3.20 приведен фотоснимок типичной лазерной искры в реальной атмосфере на расстоянии $D = 120$ -130 м от источника. Длина искры L в аэрозоле составляла 5-10 м. В чистой атмосфере пробой имел структуру в виде нескольких изолированных сферических плазменных образований диаметром до 3-4 см.

В ходе экспериментов была обнаружена существенная зависимость вероятности возникновения дистанционного пробоя на горизонтальной трассе от оптико-метеорологического состояния атмосферы. Эта зависимость обусловлена варьированием диаметра пятна фокусировки лазерного пучка вследствие турбулентности атмосферы.

В летнее время года в зависимости от времени суток усредненная по отдельным реализациям плотность энергии в фокальной плоскости передающего телескопа на расстоянии 120 м от источника излучения изменялась от 16-20 Дж/см² (в период с 2 до 5 часов) до 1,5 – 3 Дж/см² (в период с 10 до 18 часов). Лазерная искра инициировалась для аэрозолей из частиц Al_2O_3 и при плотности энергии от 6-7 Дж/см² до 12 Дж/см², а для особо чистой атмосферы (после выпадения осадков) – более 12 Дж/см².



Рисунок 3.20 - «Лазерная искра» в атмосфере: $D = 120$ м, $L = 5-10$ м, $E_0 = 6 - 12$ Дж/см²

Регистрация эмиссионных спектров производилась на высокочувствительную фотопленку, при этом использовалось накопление засветки фоточувствительного материала за $5 \div 10$ лазерных пусков, кроме того, с помощью фотоэлектронных приемников исследовалась динамика свечения отдельных спектральных линий и интегрального излучения плазмы пробоя. На рис. 3.21 представлены фрагменты денситограмм эмиссионного спектра в различных аэрозольных средах.

На денситограммах хорошо видно, что наряду с эмиссионными линиями элементов, входящих в состав аэрозольных частиц, происходит интенсивное возбуждение атомных линий атмосферных газов – азота и кислорода. В ходе экспериментов была проведена оценка интенсивности излучения плазмой оптического пробоя спектральной линии атмосферного азота ($\lambda = 3395$ А, потенциал возбуждения 21.59 еВ).

По данным измерений в условиях реальной атмосферы при концентрации атмосферного аэрозоля на уровне фоновых значений эта величина составила $3 \cdot 10^{-6}$ Вт.

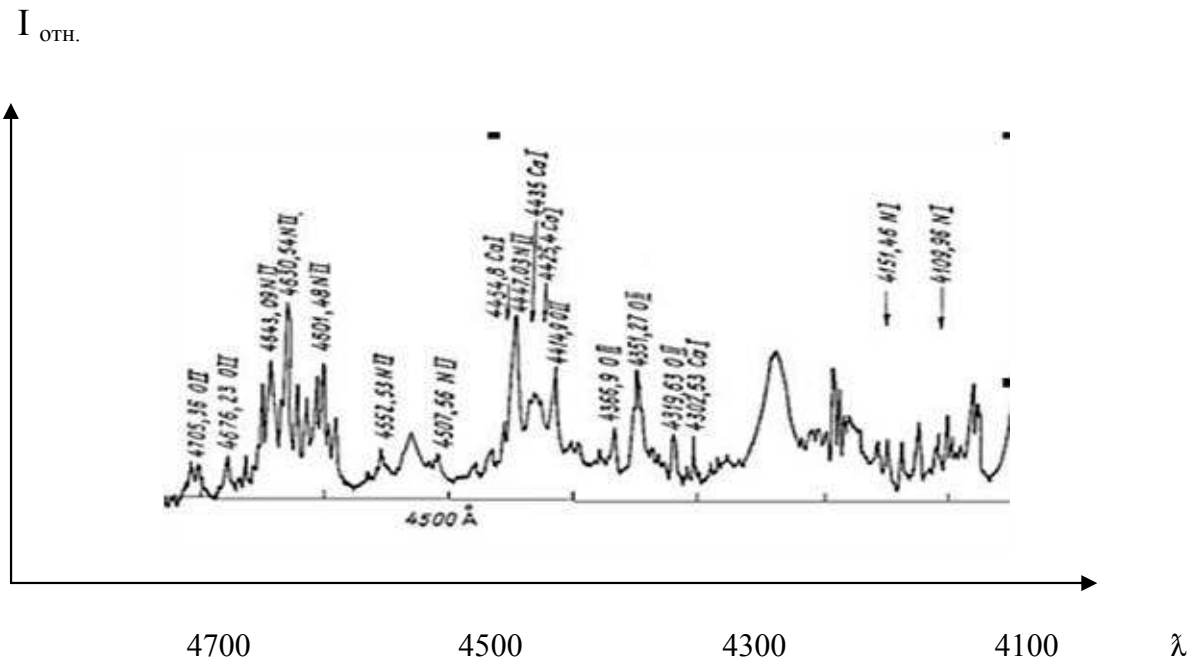


Рисунок 3.21 - Фрагмент спектра эмиссионного излучения плазмы
оптического пробоя

Проведенные на основе этих измерений оценки необходимой чувствительности фотоприемных устройств для регистрации спектральных линий показали, что при дальности зондирования 200 м и апертуре приемного телескопа 500 мм, чувствительность фотоприемников должна составлять $10 \div 100$ В/Вт. Такие требования к чувствительности фотоприемных устройств делает целесообразным применение в спектрохимических лидарных системах фотоэлектронных умножителей, обладающих чувствительностью порядка 1-1000 А/Вт в спектральном диапазоне 3000-6000 А [168].

В табл. 3.5, в качестве примера, приведены результаты зондирования содержания некоторых элементов, входящих в состав вещества фоновое приземного аэрозоля. В столбце 2 перечислены идентифицированные по эмиссионному спектру элементы, в столбце 3 – эмиссионные линии этих элементов, в столбце 3 – усредненная по 10 измерениям оценка содержания элемента по отношению к содержанию F_e принятого за единицу.

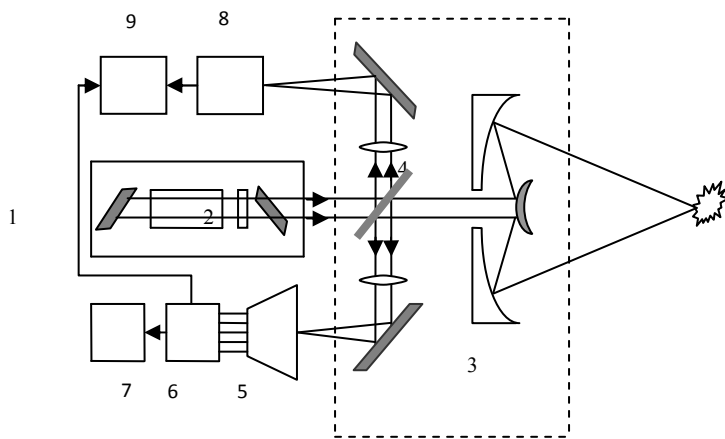
Таблица 3.5 - Результаты зондирования элементного состава приземного аэрозоля

№№ п/п	Элемент	Эмиссионные линии (А)	Среднее относительное содержание
1	Fe	3859.9 4271.8	1.0
2	Al	3944.0 3961.5	1.5
3	Ca	3933.7 3968.5 4226.7	0.4
4	Si	3905.5	2.5
5	Na	5895.9 5889.9	0.1

Эксперимент проводился на горизонтальной трассе протяженностью 150 м на высоте 2÷2.5 м над подстилающей поверхностью. Измеренная с помощью заборов на фильтры концентрация твердофазного аэрозоля составила 25÷30 мкг/м³. Выборочный анализ содержания элементов кальция и алюминия показал их качественное соответствие (с погрешностью около 100%) с приведенными в табл. 3.5 результатами экспресс-анализа по эмиссионным спектрам плазмы оптического пробоя.

3.2.3 Спектрохимический лидар

На основе результатов экспериментальных исследований эффекта дистанционного оптического пробоя и основанных на нем методов контроля состояния АПС создан экспериментальный образец спектрохимического (СХ) лидара (рис. 3.22) [14– 16, 18].



а) блок-схема СХ-лидара:

1 - импульсный неодимовый лазер, 2 - пассивный затвор на кристалле LiF:F_2^- , 3 - оптическая система (телескоп Кассегрена, $d = 250$ мм), 4 – спектрометр СТЭ-1, 5 - оптико-волоконный коллектор, 6 - шестнадцатиканальное фотоприемное устройство, 7 - устройство измерения параметров плазмы [12], 8 – фотоприемник, 9 – устройство для измерения порога оптического пробоя номера [17, 20]



б) - внешний вид СХ-лидара



в) многоканальная фотоприемная система СХ-лидара

Рисунок 3.22 - Спектрохимический лидар [169-171]

Источником мощного оптического излучения служил лазер 1, сконструированный на базе оптического квантового генератора на неодимовом стекле ГОС-1001 (длина резонатора – 100 см, излучающая апертура – 4.5 см, длина волны 1.06 мкм, длительность импульса 1.0 - 1.4 мс, энергия в импульсе – до 1050 Дж).

Для достижения необходимой для инициирования пробоя мощности лазер работал в режиме модуляции добротности, создаваемого с помощью помещенного в резонатор лазера пассивного лазерного затвора [172].

Пассивный лазерный затвор (ПЛЗ) представлял собой плоскопараллельную пластину из кристалла LiF:F_2^- , помещенную в водяной теплообменник для обеспечения термостабилизации кристалла на уровне $30 \pm 0,5^\circ\text{C}$.

В табл. 3.6 приведены основные параметры используемого кристалла.

Таблица 3.6 - Параметры пассивного лазерного затвора

Параметры кристалла	Значение параметра
Размеры кристалла, мм х мм	50×50×29
Коэффициент неактивных потерь K_n в области 1060 нм, см^{-1}	0.02
Коэффициент активного поглощения K_a в области 1060 нм, см^{-1}	0.57
Коэффициент начального пропускания	0.35

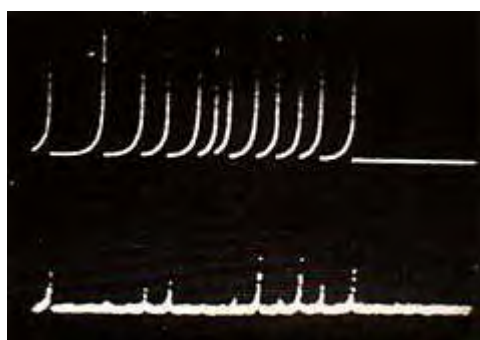


Рисунок 3.23 - Осциллограмма цуга импульсов модулированной добротности

При помещении ПЛЗ в резонатор лазер генерировал цуг из 9-12 эквидистантных импульсов, максимальные и минимальные амплитуды которых отличались в $2 \div 2,5$ раза, а максимальная мощность достигала $(5 \div 8) \cdot 10^8$ Вт (рис. 3.23). При этом их суммарная энергия составляла 30 - 50% энергии генерации лазера без ПЛЗ, а общая длительность цуга составляла $5 \cdot 10^{-7}$ сек. Количеством и мощностью генерируемых импульсов можно было управлять, меняя толщину кристалла ПЛЗ [173] (рис. 3.24, 3.25).

Основные характеристики лазерного излучателя с пассивным затвором (1-2):

1) длина волны оптического излучения	1,06 мкм
2) длительность импульса генерации	10^{-3} сек.
3) мощность отдельных пиков	до 200 МВт
4) количество пиков в импульсе	1÷20

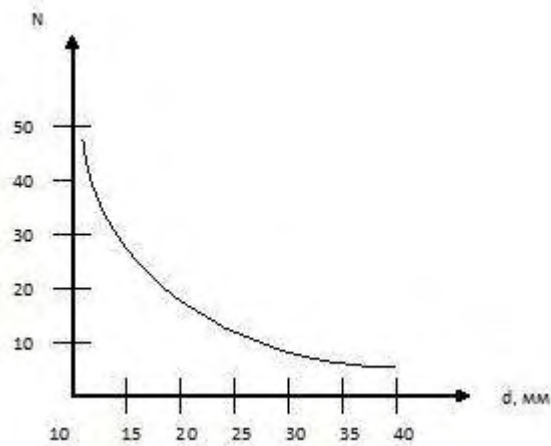


Рисунок 3.24 - Зависимость количества импульсов в цуге от толщины затвора

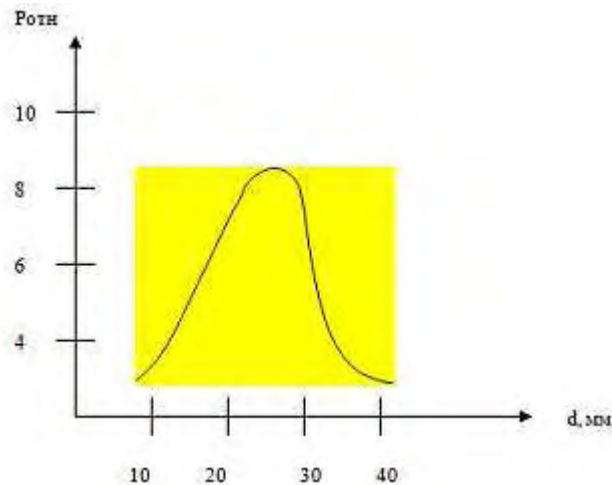


Рисунок 3.25- Зависимость мощности импульсов от толщины затвора

Оптический система 3 (рис. 3.22) предназначена для фокусировки лазерного излучении в заданной точке атмосферы, приема эмиссионного излучения оптического пробоя, спектральной селекции этого излучения и пространственного согласования оптических сигналов с фотоприемным устройством. Для этой цели применен телескоп Кассегрена с подвижным контррефлектором, что позволяет

изменять фокусное расстояние телескопа в зависимости от требуемой дальности зондирования. Оптическая система 3 осуществляла фокусировку лазерного излучения, инициирующего оптический пробой на дистанциях до 50 метров (рис. 3.26).



Рисунок 3.26 - Оптический пробой воздуха неодимовым лазером с пассивным модулятором добротности (дистанция – 20 м)

Выведенное из канала лазерного пучка излучение оптического пробоя фокусируется длиннофокусным объективом на входную щель спектрального прибора 4, в качестве которого использован спектрометр со скрещенной дисперсией СТЭ-1. Блок спектральной настройки 5 выполнен на основе коллекторного световода и позволяет подать на вход многоканального фотоприемного устройства 6 до шестнадцати заданных спектральных полос в интервале 3500-1100 А.

Основные характеристики оптического тракта (поз. 3,4, 5 рис. 3.22):

1) апертура приемо-передающего телескопа	250 мм
2) спектральный диапазон анализатора спектра	0,35-1,1 мкм
3) спектральное разрешение	$4 \div 12 \text{ \AA}^*$
4) количество одновременно регистрируемых спектральных линий	16

^{*)} в зависимости от выбранного участка спектра.

Многоканальная фотоэлектронная система регистрации 6 (рис. 3.22, в) осуществляет преобразование оптических сигналов в электрические, измерение

амплитудных значений и длительностей этих сигналов, а также измерение времени запаздывания прихода сигнала по каждому каналу относительно фиксированного момента времени, определяемого импульсом синхронизации. На основе интенсивности зарегистрированных спектральных линий в блоке 7 осуществляется определение энергетических параметров плазмы, фотоприемник 8 служит для измерения мощности оптического излучения на выходе лазера, устройство 9 позволяет определять величину порога оптического пробоя (см. п. 3.2.2 настоящей работы).

Основные характеристики системы регистрации и обработки сигналов приведены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 - Система регистрации и обработки сигналов.

1) вид обработки сигналов	параллельный
2) число каналов	16
3) время преобразования АЦП	10^{-4} сек.
4) число разрядов АЦП	6
5) временное разрешение модулей измерения временных параметров	10^{-8} с
6) максимальная длительность измеряемых временных интервалов	10^{-7} с

Спектрохимический лидар использовался в период 1982 – 1985 гг. в СКБ НП «Оптика» СО АН СССР для исследования явления дистанционного оптического пробоя в атмосфере. Полученные результаты использовались при разработке комплекса аппаратуры для изучения нелинейных оптических эффектов возникающих при распространении в реальной атмосфере мощных лазерных пучков, выполняемых в этот период в ОКБ «Радуга» (НПО «Астрофизика»).

3.3 Выводы по главе 3

3.3.1 Основные выводы из результатов работ, описание которых приведено в главе 3:

1) На основе созданных автоматических автономных метеостанций (см. главу 2 настоящей работы) разработаны специализированные модификации портативных автономных автоматических метеостанций, технические характеристики которых позволяют устанавливать их на БПЛА и выполнять измерения метеорологических и турбулентных характеристик АПС в условиях полета.

2) Разработаны и экспериментально апробированы новые технологии дистанционного контроля вертикальных профилей метеорологических и турбулентных характеристик АПС с помощью портативных автоматических метеорологических станций, устанавливаемых на платформе БПЛА геликоптерного и аэростатного типов.

3) Разработан новый способ и реализующее его устройство для «наклонного трассового» измерения скорости ветра и температуры воздуха в произвольных слоях АПС с использованием БПЛА.

4) Разработаны новые технологии и технические средства для дистанционного контроля поллютантов в приземном слое атмосферы на основе использования эффекта оптического пробоя воздуха, возникающего при распространении в атмосфере мощного лазерного излучения. Проведена натурная апробация нового измерительного комплекса (спектрохимического лидара) для реализации этих технологий.

5) Разработаны новые способы и реализующие их устройства для дистанционного контроля величины порога оптического пробоя воздуха и параметров плазмы очага пробоя.

6) Разработаны новый способ и реализующее его устройство для дистанционного определения метеорологических характеристик приземного слоя

атмосферы на основе использования эффекта оптического пробоя воздуха, возникающего при распространении в атмосфере мощного лазерного излучения.

3.3.2 Представленные в главе 3 результаты работ приведены в 12 авторских публикациях [154, 155, 157, 161–163, 167–171, 173], на технические решения, использованные для их получения, получено 11 авторских свидетельств на изобретения СССР [8–18] и 2 патента РФ [19, 20]. На основании этих результатов сформулировано четвертое защищаемое положение (см. Введение. Защищаемые положения).

3.3.3 Описанные в главе 3 результаты получили дальнейшее развитие в главе 5 настоящей работы, где представлены первые результаты работы автоматизированных информационно-вычислительных систем, предназначенных для мезомасштабного метеорологического и экологического контроля состояния АПС, в которых использованы разработанные технологии дистанционного контактного измерения вертикальных профилей метеорологических величин.

4. Оптические газоанализаторы для контроля загрязнений приземной атмосферы

4.1 Оптические газоанализаторы на основе метода дифференциальной спектроскопии

4.1.1 Физические основы метода дифференциальной спектроскопии

Одним из широко распространенных оптических методов анализа состава газовых смесей является метод дифференциальной спектроскопии. Метод заключается в пропускании через слой газа (воздуха) оптического излучения, в спектре которого присутствуют линии поглощения компонентов газовой среды, при этом одна из этих линий λ_{on} попадает в полосу поглощения анализируемого газа, а вторая λ_{off} располагается вне этой линии поглощения (рис. 4.1) [174, 175].

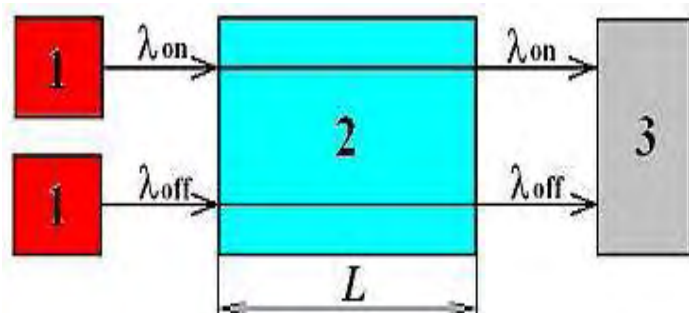


Рисунок 4.1 - Метод дифференциальной спектроскопии: 1 – источники излучения; 2 – кювета с исследуемым газом; 3 – фотоприемник;



Рисунок 4.2 – Метод дифференциальной спектроскопии: спектр излучения источника и спектр поглощения газа)

Для большей эффективности метода ширина линии источника излучения не должна превышать ширины линии поглощающего (анализируемого) газа. Из сравнения интенсивностей излучения $I_{\lambda_{on}}$ и $I_{\lambda_{off}}$, прошедших через

исследуемую среду, можно получить величину x , пропорциональную концентрации N анализируемого вещества. Используя для калибровки модельные среды с известной концентрацией n анализируемого газа, можно определить концентрацию N , соответствующую величине x . Этот метод исключает помехи, обусловленные неселективным поглощением других газов, содержащихся в воздухе. Для этого длины волн λ_{on} и λ_{off} должны быть достаточно близкими, чтобы коэффициенты поглощения в относительно широких полосах неселективных помех на этих длинах волн были равными.

Выражение для потоков излучения на длинах волн λ_{on} и λ_{off} , прошедших слой воздуха толщиной L следует из закона Бугера:

$$I_{\lambda_{\text{on}}} = I_{0\lambda_{\text{on}}} \exp[-L(k_{\lambda_{\text{on}}} + h_{\lambda_{\text{on}}})]; \quad I_{\lambda_{\text{off}}} = I_{0\lambda_{\text{off}}} \exp[-L(k_{\lambda_{\text{off}}} + h_{\lambda_{\text{off}}})], \quad (4.1)$$

где $I_{\lambda_{\text{on}}}$ и $I_{\lambda_{\text{off}}}$ – потоки излучения на длинах волн λ_{on} и λ_{off} , прошедшие слой воздуха толщиной L ; $I_{0\lambda_{\text{on}}}$ и $I_{0\lambda_{\text{off}}}$ – потоки излучения на этих длинах волн на входе в кювету толщиной L ; $k_{\lambda_{\text{on}}}$ и $k_{\lambda_{\text{off}}}$ – соответствующие коэффициенты ослабления воздуха, обусловленные наличием в нем анализируемого газа; $h_{\lambda_{\text{on}}}$ и $h_{\lambda_{\text{off}}}$ – коэффициенты ослабления воздуха, обусловленные наличием в нем газов, создающих неселективные помехи.

В силу близкого расположения спектральных линий λ_{on} и λ_{off} и относительно широких полос неселективного поглощения, коэффициенты ослабления воздуха на этих длинах волн, обусловленные наличием в нем газов, создающих неселективные помехи, можно считать равными, $h_{\lambda_{\text{on}}} = h_{\lambda_{\text{off}}}$. На этом основании можно записать отношение $I_{\lambda_{\text{on}}} / I_{\lambda_{\text{off}}}$ в следующем виде:

$$\frac{I_{\lambda_{\text{on}}}}{I_{\lambda_{\text{off}}}} = \frac{I_{0\lambda_{\text{on}}}}{I_{0\lambda_{\text{off}}}} \exp[L(k_{\lambda_{\text{off}}} - k_{\lambda_{\text{on}}})]. \quad (4.2)$$

Отсюда получаем выражение для величины x , пропорциональной концентрации анализируемого газа:

$$x = L(k_{\lambda_{\text{off}}} - k_{\lambda_{\text{on}}}) = \ln \frac{I_{\lambda_{\text{on}}}}{I_{\lambda_{\text{off}}}} \frac{I_{0\lambda_{\text{off}}}}{I_{0\lambda_{\text{on}}}}. \quad (4.3)$$

Выше было отмечено, что измеренная величина $x_{\text{и}}$, пропорциональна величине искомой концентрации N , как величина $x_{\text{к}}$, полученная при калибровке, пропорциональна модельной концентрации n , используемой при калибровке,

$$\frac{x_{\text{и}}}{N} = \frac{x_{\text{к}}}{n}. \quad (4.4)$$

Таким образом, искомая концентрация анализируемого газа определяется как:

$$N = n \frac{x_{\text{и}}}{x_{\text{к}}}. \quad (4.5)$$

Применение метода дифференциальной спектроскопии в различных диапазонах оптического спектра имеет свои особенности, связанные с механизмом поглощения оптического излучения молекулами газа. Спектры поглощения молекул в видимой и УФ областях спектра кроме участков спектра, состоящих из наборов отдельных спектральных линий, содержат и участки непрерывного поглощения. Первые обусловлены переходами между отдельными электронно-колебательно-вращательными состояниями молекул, а вторые обусловлены переходами в возбужденные электронные состояния молекул. В результате этого по селективности спектры электронного поглощения молекул уступают колебательно-вращательным ИК спектрам. С другой стороны, сечения поглощения электронных полос σ_e превышают, по крайней мере, на порядок, сечения поглощения колебательно-вращательных полос σ_v [174]

$$\sigma_e = \frac{\nu_e}{\nu_v} \sigma_v, \quad (4.6)$$

где ν_e и ν_v - частоты соответствующих переходов, что обеспечивает более высокую чувствительность газоанализа. С учетом этих обстоятельств следует выбирать рабочий диапазон спектра.

4.1.2 Оптические газоанализаторы ДОГ-1М

К основным техническим проблемам, которые приходится решать при создании газоанализаторов, использующих метод ДААС относятся:

- 1) выбор источников оптического излучения,
- 2) выбор фотоприемников для регистрации спектров оптического излучения,
- 3) выбор способа спектральной селекции оптического излучения,
- 4) выбор оптических материалов, способных эффективно работать в нужной области спектра.

В работах автора решались проблемы создания эффективных и надежных газоанализаторов для непрерывного контроля содержания окиси азота (NO) и двуокиси серы (SO_2) в дымовых газах, которые выбрасываются в атмосферу энергетическими установками, сжигающими различные виды органического топлива (природный газ, уголь, мазут) [176]. Разработка газоанализаторов выполнялась на основе результатов работ [177, 178], в которых была определена рабочая область оптического спектра 219-235 нм (в этой области расположены интенсивные полосы поглощения молекул NO , NO_2 и SO_2 и отсутствуют полосы поглощения «мешающих» газов), выбран источник УФ излучения (газоразрядная дейтериевая лампа ЛД2(Д)), частично решены вопросы способа спектральной селекции (интерференционный светофильтр) и регистрации оптического излучения («солнечно-слепой» фотоэлемент).

С участием автора разработан оптический газоанализатор «Оксид-1М» (более позднее коммерческое название - ДОГ-1М), предназначенный для автоматического непрерывного измерения концентрации окиси азота (NO) в дымовых газах топливосжигающих установок, работающих на природном газе (то есть, в отсутствии содержания в выбросах двуокиси серы) [180].

В газоанализаторе ДОГ-1М метод дифференциального поглощения реализован с помощью источника широкополосного излучения и узкополосного перестраиваемого интерференционного светофильтра (рис. 4.3) Сдвиг полосы пропускания производится путем поворота светофильтра (или специальной

плоскопараллельной пластинки, помещенной в оптический канал газоанализатора) на заданный угол [179].

Газоанализатор состоит из следующих функциональных блоков (рис. 4.4): источника излучения, термостатированной кюветы с системой подачи дымового газа, перестраиваемого светофильтра, фотоприемника и блока управления.

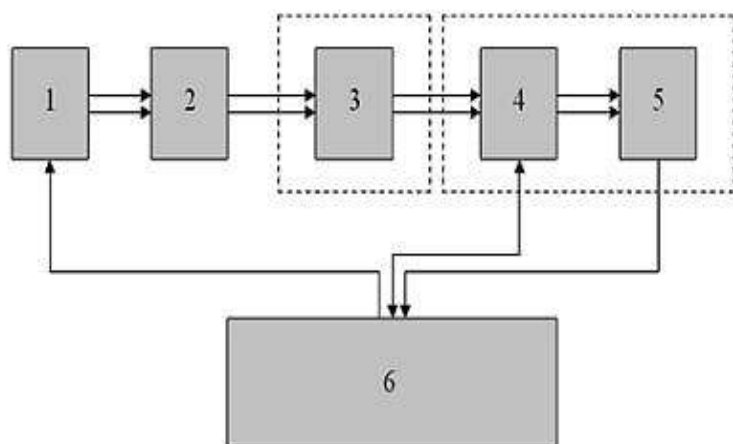
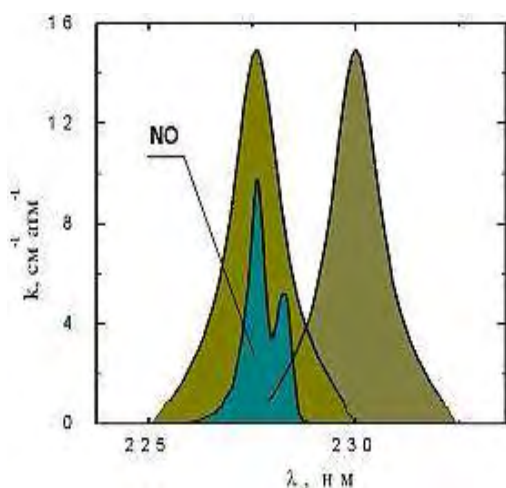


Рисунок 4.3 – Газоанализатор ДОГ-1М: формирование дифференциального поглощения в УФ области спектра ($\lambda_{\text{on}} = 227,6$ нм; $\lambda_{\text{off}} = 230$ нм)

Рисунок 4.4 - Газоанализатор ДОГ-1М: функциональная схема: 1 – газоразрядная лампа ЛД-2Д, 2 – оптическая система, 3 – газовая кювета, 4 – интерференционный светофильтр с узлом перестройки полосы его пропускания; 5 – фотоприемник; 6 – блок управления

Конструктивно газоанализатор состоит из двух модулей (рис. 4.5): измерительного модуля и модуля управления.

Измерительный модуль включает в себя источник широкополосного ультрафиолетового излучения (газоразрядная дейтериевая лампа ЛД2(Д)), термостатированную кювету с патрубками для ввода и вывода исследуемого газа (оптическая длина 50 см), перестраиваемый интерференционный светофильтр и приемник ультрафиолетового излучения (фотоэлемент Ф-29).



Рисунок 4.5 - Внешний вид газоанализатора ДОГ-1М

Параметры перестраиваемого светофильтра: область перестройки 225 – 230 нм, полуширина полосы пропускания 2 нм, пропускание в максимуме 7 – 10 процентов.

В блоке управления размещены источники питания лампы и фотоэлемента, а также микропроцессорные управляющая и вычислительная системы.

Газоанализатор работает следующим образом. При включении газоанализатора управляющая программа включает дейтериевую лампу, излучение которой направляется в кювету с дымовым газом, и затем поворотом светофильтра проводит его спектральную привязку. После этого начинает отработываться циклический алгоритм управляющей программы. Прежде всего светофильтр настраивается на пропускание участка спектра с центром на 230 нм и измеряется сигнал фотоэлемента (I_1). Затем светофильтр настраивается на пропускание участка спектра с центром на 227,6 нм и регистрируется сигнал фотоэлемента I_2 . На основании полученных значений I_1 и I_2 процессор выполняет расчет концентрации молекул NO в дымовом газе.

Полученные значения концентрации окиси азота выводятся на экран дисплея, расположенный на лицевой панели блока управления, и подаются в виде стандартных токовых сигналов 0 - 5 мА на внешний самописец. В штатном режиме работы газоанализатор производит измерения концентрации окиси азота автоматически с интервалом в 5 секунд.

В таблице 4.1 приведены основные технические характеристики газоанализатора.

Таблица 4.1 - Технические характеристики газоанализатора ДОГ-1М

Измеряемый компонент	Оксид азота (NO)
Диапазон измеряемых концентраций, мг/м ³	0-1000
Максимальная погрешность измерения, %	10
Время измерения, с	5
Напряжение питания, В/Гц	220/50
Потребляемая мощность, Вт	150
Габаритные размеры, мм	
- модуль управления	280×280×380
- измерительный модуль	870×140×200
Масса, кг	
- модуль управления	10
- измерительный модуль	15
Ресурс работы (до замены лампы), час	9000

Для организации производства ДОГ-1М под контролем автора разработан комплект технической и конструкторской документации на изделие «Газоанализатор ДОГ-1М (технические условия АМЯ2.570.003ТУ, комплект рабочей конструкторской документации АМЯ2.570.003, паспорт АМЯ2.570.003ПС и пр.). На основании разработанной документации на предприятиях НПК «Электрооптика» и ООО «Сибаналитприбор» (г. Томск) организовано промышленное производство изделий.

4.1.3 Оптические газоанализаторы ДОГ-4

К основным недостаткам газоанализатора ДОГ-1М, выявленным в ходе длительных натурных испытаний [186] относятся:

- большая погрешность измерений при наличии в составе контролируемого воздуха двуокиси серы (двуокись серы является «мешающим» газом);
- изменение метрологических характеристик газоанализатора с течением времени в связи с изменением параметров интерференционного фильтра.

Данные недостатки были устранены в газоанализаторе ДОГ-4, разработанном на основе газоанализатора ДОГ-1М [182, 183]. Для отдельного определения в смеси концентрации окиси азота и двуокиси серы данный метод

реализуется на основе выделения трех участков спектра (рис. 4.6). Газоанализатор ДОГ-4 имеет аналогичную ДОГ-1М функциональную схему (рис. 4.7), но отличается устройством оптического тракта и общей конструкцией. (см. рис. 4.8) [188, 191].

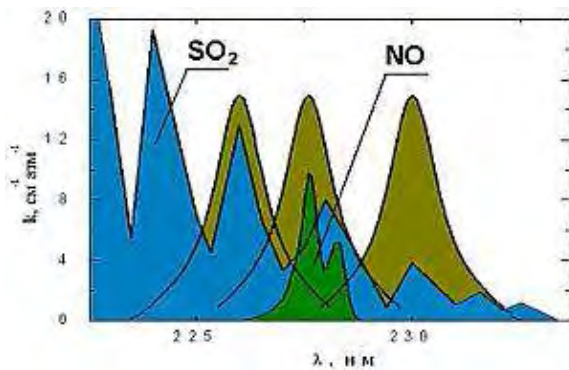


Рисунок 4.6 - ДОГ-4: формирование дифференциального поглощения в УФ области спектра ($\lambda_1=224,0$ нм, $\lambda_2=227,6$ нм, $\lambda_3=230,0$ нм.)

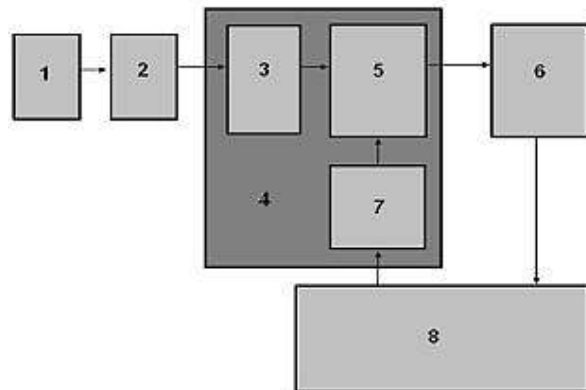
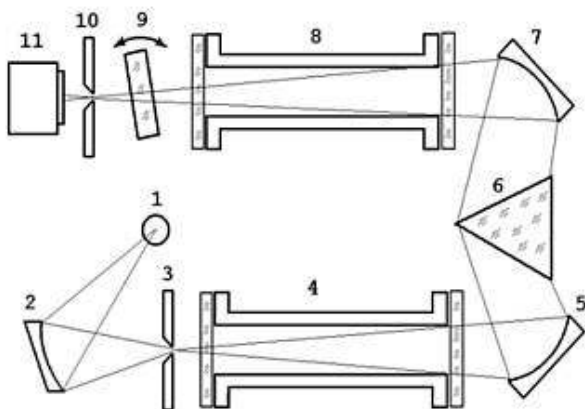


Рисунок 4.7 - Блок-схема газоанализатора ДОГ-4: 1 – газоразрядная лампа; 2 – оптическая система; 3 – кювета; 4 – монохроматор; 5 – селектирующий элемент; 6 – фотоприемник; 7 – устройство сканирования спектра; 8 – блок управления.



а)



б)

Рисунок 4.8 - Газоанализатор ДОГ-4: а – оптическая схема газоанализатора; б – внешний вид

Оптический тракт газоанализатора образован источником излучения (1), осветительным зеркалом (2), входной щелью (3), кюветами (4) и (8), коллиматорным объективом (5), кварцевой призмой (6), камерным объективом (7), кварцевой пластиной (9), выходной щелью (10) и фотоприемником (11). Источником УФ излучения (1) является газоразрядная дейтериевая лампа ЛД2(Д). Кюветы (4) и (8) представляют собой цилиндрические камеры внутренним диаметром 40 мм и длиной 300 мм с кварцевыми окнами на торцах. Кюветы снабжены датчиками температуры и управляемыми нагревательными элементами, поддерживающими температуру кювет около 40 °С. Каждая кювета снабжена двумя патрубками для прокачки через нее дымового газа. Для уменьшения габаритов газоанализатора кюветы размещены внутри монохроматора. Фотоприемником (11) является фотоэлемент Ф-29 с усилителем постоянного тока и преобразователем напряжение-частота. Для уменьшения помех фотоприемник помещен в экранированный кожух с прозрачным окном для ввода излучения [247, 248].

Призмный монохроматор состоит из входной щели (3) шириной 2 мм, коллиматорного зеркального объектива (5), кварцевой призмы (6) с преломляющим углом 60°, камерного зеркального объектива (7) и выходной щели (10) шириной 1 мм. Между камерным объективом и выходной щелью монохроматора размещена кварцевая пластина (9) толщиной 1 см, закрепленная на оси шагового двигателя FL39ST. Особенностью данного монохроматора является то, что его кварцевая призма выведена из положения минимума отклонения на 20° в сторону больших углов падения пучка излучения на первую грань призмы и жестко закреплена. Такое расположение призмы позволяет увеличить спектральное разрешение монохроматора. Выбор величины угла в 20° обусловлен тем, что при этих углах разрешение монохроматора увеличивается, приблизительно, в 2.5 раза, а увеличение потерь света на отражения от первой грани призмы не превышают 30 %. Кварцевая пластина с механизмом ее поворота является устройством сдвига изображения и позволяет с высокой точностью сканировать спектр в плоскости выходной щели без поворота призмы в

небольшом диапазоне длин волн (рис. 4.8,а). Диапазон сканирования спектра определяется толщиной кварцевой пластины и углом ее поворота [190].

В таблице 4.2 приведены основные технические характеристики газоанализатора ДОГ-4 [187].

Таблица 4.2 - Технические характеристики газоанализатора ДОГ-4

Измеряемые компоненты	окись азота (NO), диоксид серы (SO ₂)
Диапазон измерения концентраций NO, мг/м ³	0-500
Максимальная погрешность измерения NO, %	10
Диапазон измерения концентраций SO ₂ , мг/м ³	0-500
Максимальная погрешность измерения SO ₂ , %	10
Время измерения, с	10
Напряжение питания, В/Гц	220/50
Потребляемая мощность, Вт	100
Габаритные размеры, мм	770×355×320
Масса, кг	не более 25
Ресурс работы (до замены лампы), час	9000

4.1.4 Метрологическое обеспечение и результаты испытаний газоанализаторов ДОГ-1 и ДОГ-4

4.1.4.1 Метрологическое обеспечение газоанализаторов ДОГ-1 и ДОГ-4 представлено разработанной под руководством автора документацией:

1) Газоанализатор ДОГ-1М. Технические условия АМЯ2.570.003 ТУ и Методика поверки АМЯ2.570.003 МП.

5) Газоанализатор ДОГ-4. Технические условия АМЯ2.770.010 ТУ и Методика поверки АМЯ2.770.010 МП.

Газоанализаторы ДОГ-1М и ДОГ-4 внесены в Государственный реестр средств измерений РФ: сертификат RU.C.31.001.A № 7057 и сертификат RU.C.31.113.A № 25535 соответственно.

Метрологические испытания газоанализаторов ДОГ-1 и ДОГ-4 выполнялись на испытательных базах Института мониторинга климатических и экологических

систем СО РАН (г. Томск), ООО «Сибаналитприбор» (г. Томск), ФГУ Томский ЦСМ» (г. Томск). Метрологические характеристики тестируемых газоанализаторов определялись методом проведения сравнительных испытаний с эталонными средствами измерений в контролируемых условиях во всем диапазоне изменения определяемых метеорологических параметров.

В таблице 4.3 приведен перечень основных видов контрольно-испытательного и измерительного оборудования, используемого для проведения метрологической аттестации газоанализаторов (рис. 4.9), и виды выполняемых на этом оборудовании испытаний.

Таблица 4.3 - Контрольно-испытательное оборудование

№ п\п	Контрольно-испытательное оборудование	Основные технические характеристики	Вид испытаний
1	Газовый стенд ГП-3 с форвакуумным насосом 2НВР-5ДМ; вакууметром 11201; манометром МВТП-160	Количество газовых компонент – 3. Погрешность измерения давления -1 мм рт. ст. Минимальное остаточное давление- не более 0,1 мм рт. ст. Максимальное избыточное давление - 0,6 атм. Скорость откачки - 2 л/с Напряжение питания- 380В/50 Гц	1) Проверка диапазона измерений. 2) Проверка чувствительности измерений. 3) Проверка погрешности измерений.
2	Климатермокамера КТК 800	Полезный объём - 860 л, диапазон температур – от -70 до +90 °С, диапазон влажности – от 10 до 100 %.	Проверка устойчивости к воздействию повышенной и пониженной температуры.
3	Камера тепла и влаги FEUTRON 3626/51.	Емкость - 630 л; диапазон температур – от минус 70 до +100 °С; диапазон влажности – от 10 до 100 %.	1) Проверка устойчивости к воздействию повышенной влажности.

4	Термогигрометр «ИВА-6Б» с датчиком ДВ2ТСМ-3Т-2П-Б,	диапазон измерения относительной влажности – от 0 до 100 % в диапазоне температур от - 40 до + 60 °С, погрешность измерения - ± 1 %	2) Проверка устойчивости к воздействию конденсированных осадков (роса, иней)
5	Стенд вибрационный ВЭД-200	Частота - от 5 до 5000 Гц, Амплитуда - от 0 до 40 g	Проверка устойчивости к воздействию синусоидальной вибрации.

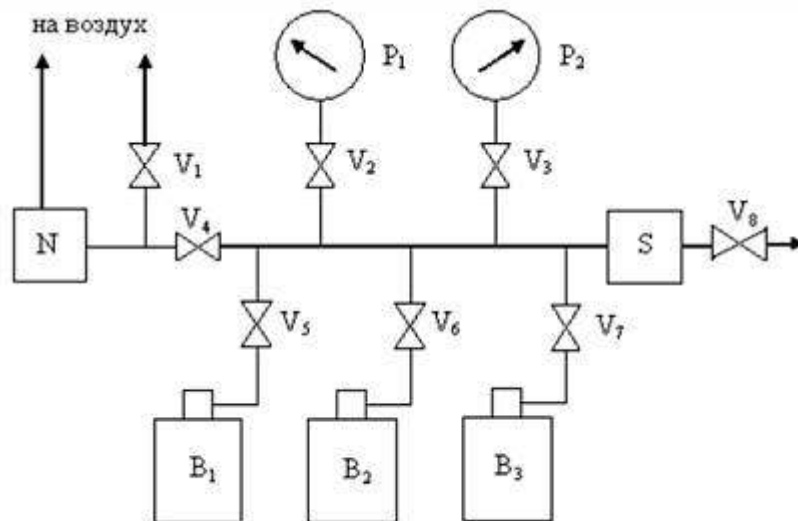


Рисунок 4.9 - Схема газового стенда ГП-3: N – форвакуумный насос 2НВР-5ДМ P₁ – вакуумметр модель 11201; P₂ – манометр МВТП-160; V_i – вентили С26410-010; B₁ – баллон с эталонной газовой смесью (NO в азоте); B₂ – баллон с эталонной газовой смесью (SO₂ в азоте); B₃ – баллон с чистым азотом; S – смешивательная камера.

4.1.4.2 Для построения градуировочных характеристик газоанализаторов ДОГ-1М были использованы стандартные двухкомпонентные эталонные газовые смеси, состоящие из азота и измеряемого компонента дымового газа с известным его содержанием [181].

Как было показано в п. 4.1.2 настоящей работы, в газоанализаторе ДОГ-1М концентрация окиси азота N_{NO} в контролируемой газовой смеси определяется из соотношения (4.5), в котором коэффициенты x_i определяются при калибровке для различных эталонных концентраций NO.

Типичный градуировочный график газоанализатора ДОГ-1М приведен на рис. 4.10, где точками показаны полученные в процессе градуировки значения I_2/I_1 , а сплошной линией – значения кубического полинома, построенного по этим значениям I_2/I_1 . Градуировочный график достаточно хорошо описывается кубическим полиномом. При этом ошибка оценки (разброс точек относительно градуировочной кривой) данного градуировочного графика составляет 3,8 мг/м³.

Для диапазона концентраций окиси азота 0 – 500 мг/м³ градуировочный график может быть описан квадратичным полиномом (в этом случае ошибка составит 4,1 мг/м³).

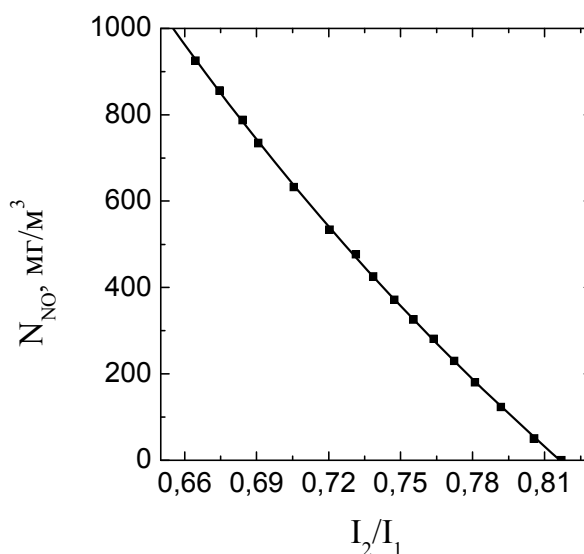


Рисунок 4.10 - Градуировочный график газоанализатора ДОГ-1М

В двухкомпонентном газоанализаторе ДОГ-4 расчет концентраций молекул окиси азота N_{NO} и двуокиси серы N_{SO_2} производится из системы уравнений [184].

$$I_2/I_1 = A_0 + A_1 N_{\text{NO}} + A_2 N_{\text{SO}_2} + A_3 (N_{\text{NO}})^2 + A_4 (N_{\text{SO}_2})^2 + A_5 N_{\text{NO}} N_{\text{SO}_2};$$

$$I_3/I_1 = B_0 + B_1 N_{\text{NO}} + B_2 N_{\text{SO}_2} + B_3 (N_{\text{NO}})^2 + B_4 (N_{\text{SO}_2})^2 + B_5 N_{\text{NO}} N_{\text{SO}_2}.$$

Численные значения коэффициентов A_0 и B_0 определяются при коррекции нуля, а значения коэффициентов A_1 - A_5 и B_1 - B_5 определяются при калибровке газоанализатора по эталонным газовым смесям. Калибровка заключается в измерении значений I_1 , I_2 и I_3 в эталонных газовых средах с известными концентрациями молекул NO и SO₂ и последующим определении коэффициентов A_i и B_i методом наименьших квадратов.

Величина основной приведенной погрешности газоанализатора вычисляется по формуле

$$\gamma = \frac{|(N_{изм} - N_{ист})|}{N_{пред}} 100\% , \quad (4.16)$$

где $N_{изм}$ – измеренное значение концентрации, $N_{ист}$ – истинное значение концентрации и $N_{пред}$ – верхний предел диапазона измерения. Это означает, что при величине основной приведенной погрешности $\gamma = 10\%$ ошибка измерения концентрации молекул $\Delta N = N_{изм} - N_{ист}$ постоянна в пределах диапазона и не превышает ± 20 мг/м³ для окиси азота (NO) и ± 30 мг/м³ для двуокиси серы (SO₂).

Применение в газоанализаторе ДОГ-4 дисперсионного метода спектральной селекции позволило существенно улучшить долговременную стабильность метрологических характеристик по сравнению с газоанализатором ДОГ-1М, где для этой цели использовался интерференционный светофильтр. Это подтвердили специально проведенные сравнительные испытания двух типов газоанализаторов [185, 189]. Кюветы работающих в штатном режиме газоанализаторов ДОГ-1М и ДОГ-4 периодически (один раз в сутки) заполнялись эталонной газовой смесью, содержащей 511 мг/м³ окиси азота, и проводились измерения содержания окиси азота в смеси. Затем аналогичная процедура повторялась с эталонной газовой смесью, содержащей 486 мг/м³ двуокиси серы. Результаты измерений приведены на рис. 4.11.

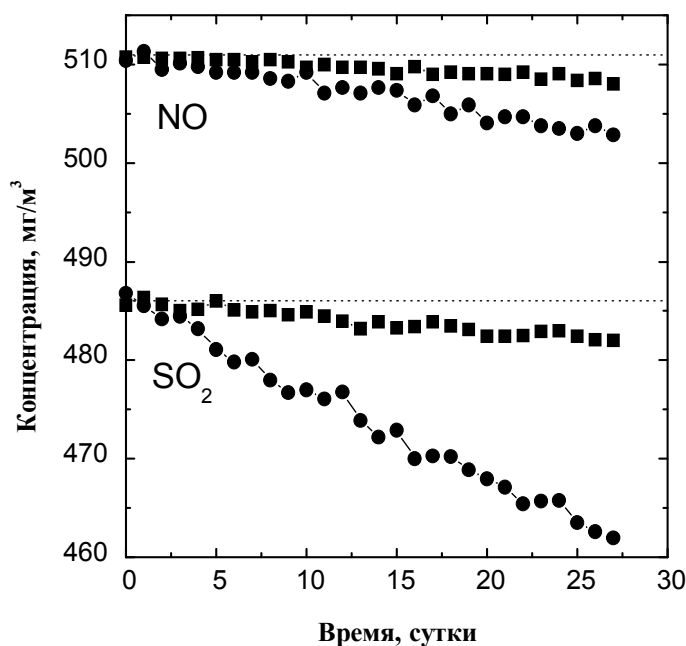


Рисунок 4.11 - Долговременная стабильность показаний газоанализаторов ДОГ-1М (маркеры - кружки) и ДОГ-4 (маркеры - квадраты)

Испытания проводились непрерывно в течении 30 дней, при этом величины занижения показаний концентраций молекул NO в эталонной газовой смеси составили:

- для газоанализатора ДОГ-1М – 10 мг/м^3 (2.0 %);
- для газоанализатора ДОГ-4 – 2.5 мг/м^3 (0.5 %).

Величина занижения показаний концентраций молекул двуокиси серы газоанализатором ДОГ-4 не превысила 3.5 мг/м^3 (0.7 %).

Таким образом, долговременная стабильность метрологических характеристик разработанного дисперсионного газоанализатора ДОГ-4 примерно в 4 раза выше светофильтрового газоанализатора ДОГ-1М. Анализ показал, что основной причиной, влияющей на долговременную стабильность метрологических характеристик светофильтровых газоанализаторов, является неконтролируемый дрейф положения и полуширины полосы пропускания интерференционного светофильтра, а также неконтролируемый дрейф его коэффициента пропускания.

4.1.4.3 На этапе внедрения газоанализаторов были выполнены натурные испытания приборов на реальных теплоэнергетических предприятиях [186].

Первый образец газоанализатора ДОГ-1М был установлен на котел № 8 Тюменской ТЭЦ-1(котел типа БКЗ-210-140). Газоанализатор был установлен на площадке дымососов котла так, что часть дымового газа с помощью системы пробоподготовки непрерывно прокачивалась через кювету газоанализатора. Система пробоподготовки состояла из пористого фильтра для защиты от механических частиц, водяного холодильника типа ХН-1 с гидрозатвором для стока конденсата и побудителя расхода МПР-1. Размещение газоанализатора за дымососом, где дымовые газы хорошо перемешаны, позволило избавиться от проблемы представительности отбираемой части газа.

В ходе производственных испытаний газоанализатора было проверено его быстродействие, а также были исследованы зависимости концентрации окиси азота в дымовых газах при изменении коэффициента избытка воздуха и паропроизводительности котла. При этом контроль за содержанием в дымовых газах кислорода проводился штатным кислородомером УКАРСК-1, а измерения водорода велись переносным прибором “Минихром”. Изменение концентрации окиси азота в дымовых газах при различных режимах работы котла показано на рис. 4.12. причем разброс значений концентраций молекул NO в установившихся режимах не превышает 5 %.

Режимы 1 и 2 соответствуют паропроизводительности котла 170 т/час при избытке кислорода соответственно 1,4 и 0,8 %. При режиме 2 в дымовых газах наблюдалось появление следов водорода с концентрацией примерно 0,015 %, что свидетельствует о неполном сжигании природного газа. Следующие три режима соответствуют паропроизводительности котла 190 т/час при избытке кислорода соответственно 2,1, 0,8 и 1,3 %. При режиме 4 в дымовых газах также наблюдалось появление следов водорода с концентрацией ~ 0,010 %.

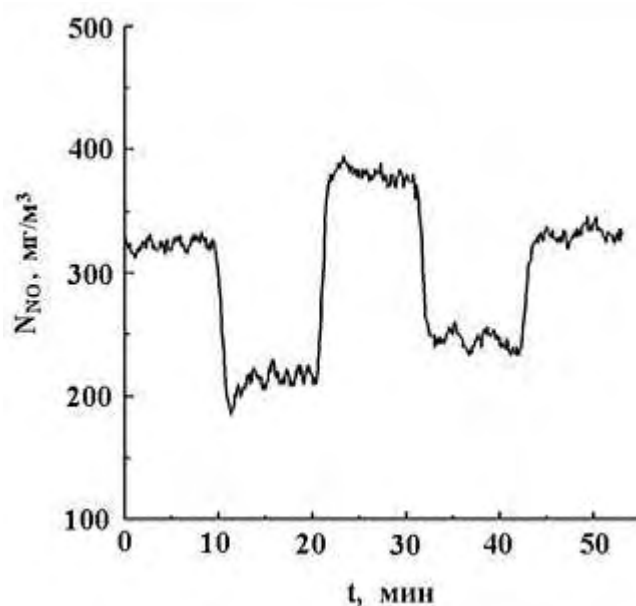


Рисунок 4.12 - Концентрация молекул NO в дымовых газах при различных режимах сжигания природного газа

Экологический и экономический эффекты от использования газоанализаторов ДОГ-1 можно проследить на примере Тюменской ТЭЦ-1, все котлы которой оснащены этими газоанализаторами. В настоящее время на Тюменской ТЭЦ-1 для каждого котла разработана режимная карта, где приведены показания газоанализатора, которые должны быть при оптимальном сжигании газа, для различных режимов работы котла. Такие карты позволяют оператору по показаниям газоанализаторов, выведенных на пульты управления котлами, оперативно следить за показателями сжигания топлива, и, соответственно, контролировать оптимальный режим сжигания природного газа.

Одновременно, такой непрерывный контроль за концентрацией окиси азота в дымовых газах позволяет перейти от расчетного метода определения валовых выбросов оксидов азота к их фактическим значениям. В результате таких мер, величина валового выброса оксидов азота для Тюменской ТЭЦ-1 в 1997 году снизилась на 1500 – 1700 тонн в год (в пересчете на диоксид азота), что при среднегодовом валовом выбросе оксидов для этой ТЭЦ в ~ 5000 тонн составляет около 30 %.

Эффект от использования газоанализаторов ДОГ-1 на мощных Сургутских ГРЭС, где оптимизация сжигания топлива и переход от расчетных объемов выбросов оксидов азота на фактические снизил величину выбросов на 25300 тонн. В результате этого годовая плата за загрязнение атмосферы оксидами азота для Сургутских ГРЭС в 1999 году снизилась на 1,8 млн. рублей [189].

Результаты производственных испытаний показали, что газоанализатор ДОГ-1М пригоден как штатное средство контроля концентраций молекул NO в дымовых газах котельных установок, работающих на природном газе.

Газоанализатор ДОГ-4 проходил производственные испытания на Томской ГРЭС-2 (отопительный сезон 2003-2004 годов) [190, 191]. Томская ГРЭС-2 использует в качестве топлива как уголь, так и природный газ, что позволило испытать газоанализатор в различных условиях.

Газоанализатор ДОГ-4 был размещен на площадке дымососа котла № 10, причем отбор дымового газа проводился после дымососа и золоуловителя, где дымовой газ хорошо перемешан. Пробоотбор дымового газа производился побудителем расхода МПР-1 через пористый керамический фильтр и водяной холодильник с гидрозатвором для стока конденсата.

В ходе производственных испытаний газоанализатора ДОГ-4 была проверена его работоспособность и стабильность метрологических характеристик в реальных условиях эксплуатации на котле, работающем на различных видах топлива. Для этого в ходе опытной эксплуатации были проведены сравнительные измерения концентраций оксидов азота и серы газоанализатором ДОГ-4 и портативным электрохимическим газоанализатором TESTO-342 (производство фирмы “TESTO-TERM”). Результаты сравнительных измерений приведены в таблице 4.4.

Результаты производственных испытаний показали, что газоанализатор ДОГ-4 пригоден как штатное средство контроля концентраций молекул NO и SO₂ в дымовых газах котельных установок, работающих на всех видах органического топлива.

Таблица 4.4 - Результаты сравнительных показаний газоанализаторов ДОГ-4 и TESTO-342

Дата	ДОГ-4		TESTO-342		Примечание
	NO, ppm	SO ₂ , ppm	NO, ppm	SO ₂ , ppm	
31.10.2003	403	2	393	1	ПГС (NO = 406 ppm)
31.10.2003	0	183	1	180	ПГС (SO ₂ = 182 ppm)
31.10.2003	265-270	158-160	270	163	Топливо – уголь
14.01.2004	270-275	2	276	3	Топливо – природный газ
01.04.2004	240-245	2	245	3	Топливо – природный газ
08.04.2004	2-3	7-10	–	–	Котел отключен
15.04.2004	395	4	393	2	ПГС (NO = 406 ppm)
15.04.2004	3	182	1	180	ПГС (SO ₂ = 182 ppm)
15.04.2004	246-252	170-176	245	177	Топливо – уголь
05.05.2004	241-246	2-4	241	2	Топливо – природный газ

4.2 Оптические газоанализаторы на основе эффекта Зеемана

4.2.1 Физические основы применения эффекта Зеемана в методе ДААС

Эффект Зеемана подробно описан в литературе [192, 193, 194]. При помещении источника света во внешнее магнитное поле происходит расщепление спектральной линии излучения на три отдельных компоненты (нормальный эффект Зеемана), при этом средняя компонента совпадает по частоте с первоначальной линией ω_0 , а две другие – симметрично сдвинуты относительно нее на величину $\pm \Omega$, пропорциональную индукции магнитного поля B . В зависимости от ориентации линий магнитного поля по отношению к направлению распространения света различают продольный и поперечный эффект Зеемана (рис. 4.13).

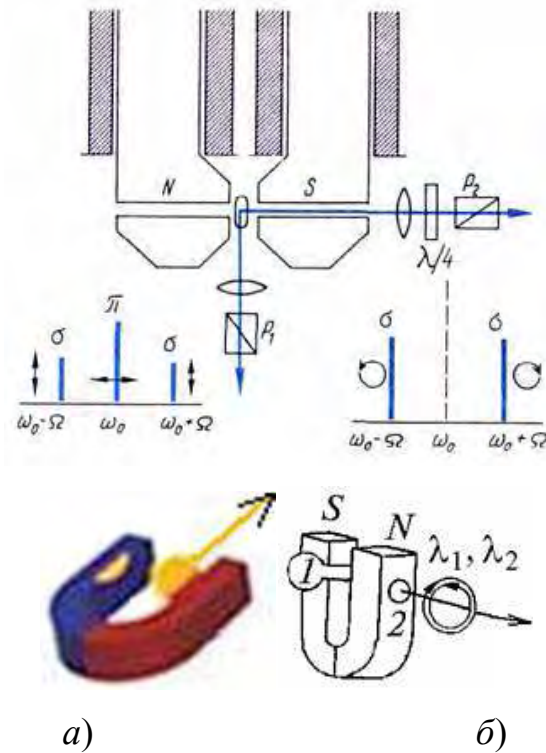


Рисунок 4.13 - Эффект Зеемана в поперечном (а) и продольном (б) магнитном поле

Компоненты, которые возникают при переходах между уровнями с одинаковыми квантовыми числами M_j , называют π -компонентами. π -компоненты не имеют сдвига по частоте, они линейно поляризованы параллельно направлению вектора магнитной индукции. Компоненты, которые возникают при переходах между уровнями с изменением квантового числа M_j на ± 1 называют σ -компонентами. σ -компоненты сдвинуты по частоте на величину $\pm \Omega$, они имеют круговую поляризацию в плоскости, перпендикулярной направлению вектора магнитной индукции, причем направления циркуляции σ -компонент противоположны [195].

Интенсивность π -компоненты равна сумме интенсивностей σ -компонент при наблюдении поперек магнитного поля, т. е. интенсивности этих компонент относятся как 1:2:1. Интенсивность σ -компонент при наблюдении вдоль магнитного поля вдвое больше, чем при наблюдении поперек поля

(интенсивности компонент относятся как 2:2), при этом π - компонента отсутствует.

На рисунке 4.13 магнитное поле направлено горизонтально. Источник излучения линейчатого спектра (ртутная газоразрядная лампа) излучает в двух направлениях: вдоль магнитного поля (вправо, продольный эффект Зеемана) и поперек магнитного поля (вниз, поперечный эффект Зеемана). Ниже показаны π и σ компоненты для поперечного (слева) и продольного (справа) эффекта Зеемана. На рисунке также показаны состояния поляризации компонент для поперечного и продольного эффекта Зеемана. В случае поперечного эффекта π - компонента линейно поляризована вдоль направления магнитного поля, а σ - компоненты линейно поляризованы поперек магнитного поля. В случае продольного эффекта Зеемана обе σ - компоненты имеют циркулярную поляризацию в плоскости перпендикулярной направлению магнитного поля, направления циркуляции σ - компонент противоположны.

Эффект Зеемана может быть использован для спектральной селекции в газоанализаторах, построенных на основе метода ДААС. В частности, в работах автора для анализа концентрации паров ртути в воздухе использован эффект расщепления в магнитном поле спектральной линии ртутной лампы ($\lambda = 253,7$ нм).

Эта линия располагается в УФ области спектра и имеет высокую интенсивность излучения. Линия достаточно удалена от полос поглощения атмосферных газов, за исключением широкой полосы поглощения озона.

Известно, что ртуть естественного (природного) состава является смесью девяти изотопов. В связи с различием ядерных масс этих изотопов сверхтонкая структура спектров излучения и поглощения очень сложна. Однако, общая картина спектра определяется пятью стабильными изотопами с наибольшим процентным вкладом в ее природный изотопный состав. Теоретически каждая из линий сверхтонкой структуры имеет контур, близкий к гауссовому, однако в целом, и спектры излучения, и спектры поглощения являются суперпозициями этих линий (полос), определяющих суммарный контур этой линии [196].

В анализаторах паров ртути РГА-10, РГА-11 [196] и РА-915М [197], созданных ранее, использовалась специальная лампа с изотопом ^{204}Hg . В этом случае в продольном эффекте Зеемана реализовывался случай, показанный на рисунке 4.13,б. При этом, одна из σ -компонент расположена близко к максимуму полосы поглощения ртути природного состава, а другая из σ -компонент должна быть вне линии поглощения (рис.4.14) [197].

Пропуская поочередно компоненты σ^+ и σ^- через анализируемую среду (кювету, см. рис. 4.14) необходимо регистрировать переменный сигнал, пропорциональный разности поглощения этих компонент. Эта разность определяется анализируемой концентрацией паров ртути.

Недостатком этого способа является необходимость использования дорогостоящих ламп, наполненных изотопом ртути.

Другой проблемой способа является значительная асимметрия интенсивности потоков этих компонент на входе во внешнюю кювету газоанализатора. Хотя индукция магнитного поля, при использовании продольного эффекта, может быть небольшой (до 0,4 Тл) и практически легко достижимой, однако, при этом высоки требования к однородности магнитного поля.

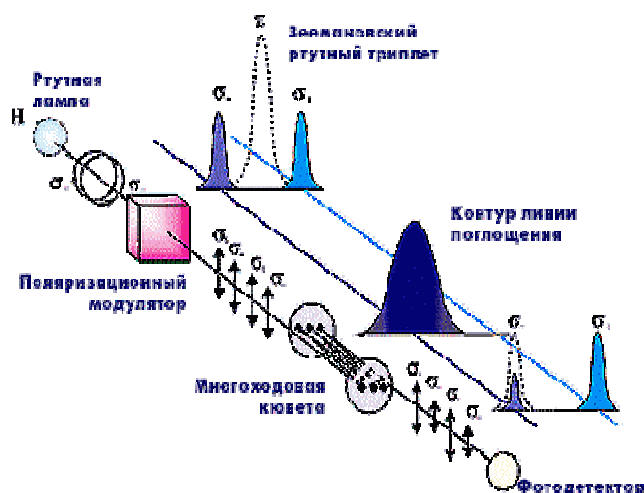


Рисунок 4.14 - Схема работы газоанализатора на продольном эффекте Зеемана [197]

Это необходимо для полного исключения π -компоненты и обеспечения симметрии потоков на входе во внешнюю кювету газоанализатора (рис. 4.14).

При участии автора была создана модификация ртутного анализатора ДОГ-05 на основе поперечного эффекта Зеемана с использованием изотопной ртутной лампы [200]. Однако из-за отсутствия в тот период производства изотопных ртутных капиллярных ламп эта разработка не получила развития.

В случае применения поперечного эффекта возможно использование в качестве источника света ртутной газоразрядной лампы на основе ртути природного состава: π -компонента излучения такой лампы совпадает с центром полосы поглощения, а σ -компоненты могут быть в достаточной степени вытеснены за пределы линии поглощения магнитным полем с индукцией $\sim(1\div 1,6)$ Тл. При этом в значительной степени упрощаются проблемы достижения симметрии потоков π -компоненты и суммарного потока σ -компонент.

На рисунке 4.15 показан спектр линии ртути естественного состава в окрестностях линии $\lambda = 253,7$ нм в поперечном магнитном поле с индукцией $B = 1,56$ Тл, полученный путем расчета. При расчете спектров π - и σ -компонент учитывались только те изотопы, линии которых наиболее существенно определяют контур суммарной линии излучения. Контур линии поглощения ртути природного состава на линии $\lambda = 253,7$ нм отмечен цифрой 1. Контур линии π -компоненты отмечен буквой π . Контур линии σ -компонент отмечены знаками σ^+ и σ^- . По оси абсцисс – отклонения частот $\pm\Omega$ от частоты ω_0 , соответствующей длине волны $\lambda = 253,7$ нм в см^{-1} . По оси ординат – интенсивность зеемановских компонент (в относительных единицах). Как видно из рисунка, «вытеснение» σ -компонент из контура линии поглощения позволяет реализовать метод дифференциального поглощения, где основной линией излучения $\lambda_{\text{он}}$ является π -компонента, а опорными λ_{off} являются σ^+ и σ^- -компоненты (их суммарный поток) [204].

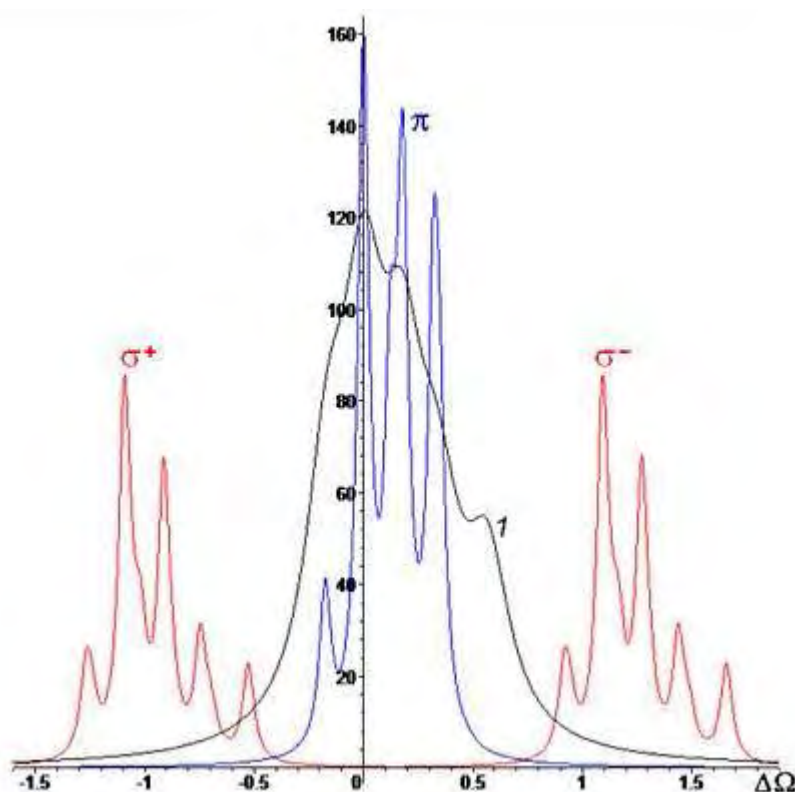


Рисунок 4.15 - Соотношения спектральных характеристик ртути естественного состава, рассчитанные для случая поперечного эффекта Зеемана,

Техническая реализация метода определения содержания паров ртути в воздухе предполагает выбор источника излучения (ртутной газоразрядной лампы), структуры измерительного канала (блока), физического обоснования расчета определяемой величины и ее погрешности.

4.2.2 Технические аспекты реализации метода ДААС для определения содержания паров ртути в воздухе

4.1.2.1 Основными структурными элементами газоаналитического устройства, реализующего метод ДААС с использованием поперечного эффекта Зеемана, являются [245, 246]:

- источник излучения, помещенный в магнитное поле;
- поляризационный модулятор, выделяющий поочередно линии излучения в контуре линии поглощения ртути и вне контура поглощения;

- внешняя кювета заданной длины, где происходит поглощение излучения рассматриваемых компонент;

- фотодетектор для регистрации потоков на входе и выходе внешней кюветы газоанализатора.

1) Источник излучения должен отвечать следующим требованиям:

- спектральная линия $\lambda_{\text{оп}}$ должна быть близкой к центру линии поглощения ртути природного состава;

- спектральная ширина этой линии не должна превышать ширину линии поглощения ртути природного состава;

- спектральная линия λ_{off} должна быть удалена от центра линии поглощения ртути природного состава;

- источник излучения должен обеспечивать стабильность интенсивности излучения в условиях относительно сильных магнитных полей с индукцией порядка $B \approx 1$ Тл.

Таким требованиям удовлетворяют ртутные лампы низкого давления. При использовании схемы на основе поперечного эффекта Зеемана можно применять лампу с естественным изотопным составом ртути. Для достижения необходимой степени спектрального расщепления эмиссионных линий величина индукции поперечного магнитного поля должна составлять порядка 1 Тл (теоретическая оценка выполнена М.А. Булдаковым (Томск, ИМКЭС СО РАН)) [200].

На основе экспериментальных исследований был разработан источник излучения с оптимальными характеристиками (рис. 4.16). Ртутная лампа с излучающим капиллярным газоразрядным каналом диаметром 2 мм заключена в однородное поперечное магнитное поле с индукцией 0,92 Тл. Такая конструкция излучателя обеспечивает необходимую стабильность мощности эмиссионного излучения и достаточную для применения метода ДААС степень расщепления спектральной линии ртутной лампы.

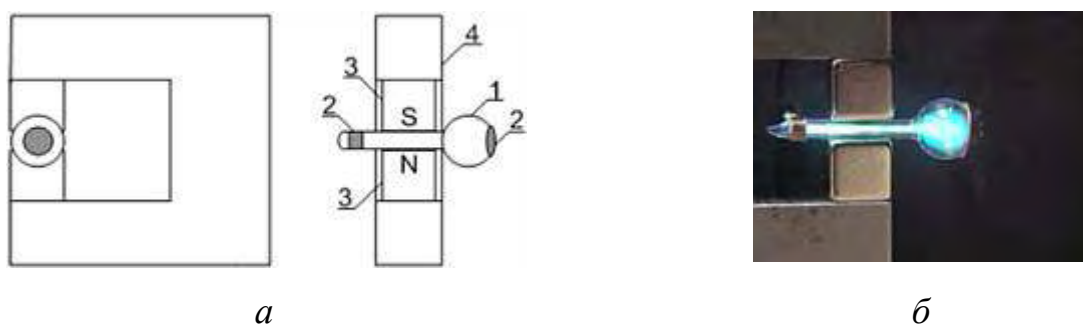


Рисунок 4.16 - *а* – конструкция компактной магнитной системы (1 – ртутная лампа с колбой; 2 – электроды; 3 – магниты; 4 – магнитопровод) ; *б* – разряд лампы в магнитной системе

2) Поляризационный модулятор должен обеспечивать поочередное пропускание в оптический тракт двух видов поляризованного излучения (π -компоненты, σ -компоненты). Поляризационный модулятор может быть выполнен на основе фазовой полуволновой пластинки и призмы Глана. Поворотом фазовой пластинки вокруг оптической оси достигается азимутальный поворот плоскости поляризации π - и σ -компонент, при этом призма Глана, установленная неподвижно, пропускает далее либо только одну π -компоненту, либо одновременно обе σ -компоненты.

На практике, в силу различных причин, интенсивности потока π -компоненты и суммарного потока σ -компонент на выходе поляризационного модулятора не равны между собой. Для выравнивания интенсивностей потока π -компоненты и суммарного потока σ -компонент на выходе излучателя устанавливается поляризационный компенсатор. Компенсатор представляет собой плоскопараллельную пластину, выполненную из кварца. Согласно закону Брюстера излучение, прошедшее через такую пластину под определенным углом, становится частично поляризованным, что позволяет выравнивать интенсивности π - и σ -компонент.

3) Во внешней кювете происходит поглощение излучения лампы атомами ртути, содержащимися в анализируемом воздухе. Длина оптического пути зондирующего излучения определяет чувствительность газоанализатора.

Проведенные оценки показывают, что для достижения чувствительности на уровне ПДК эффективная длина оптического пути должна составлять от 1600 до 3200 мм, что обеспечивается многопроходной оптической системой (4 – 8 проходов).

4) В качестве фотодетектора могут быть использованы широко распространенные фотоэлектронные умножители или фотодиодные приемники оптического излучения УФ-диапазона ($\lambda = 253,7$ нм) [198].

4.2.2.2 Определение концентрации паров ртути осуществляется на основе измерений величин приходящих на фотоприемник π - и σ -компонент излучения лампы [200].

Потоки излучения I_1 (интенсивность излучения несмещенной компоненты, прошедшей через внешнюю кювету газоанализатора), регистрируемые в измерительном канале газоанализатора, определяются соотношениями:

$$I_1 = I_\pi \exp(-k_\pi L), \quad (4.17)$$

где I_π – интенсивность π -компоненты излучения лампы, k_π – коэффициент поглощения π -компоненты во внешней кювете газоанализатора, L – длина пути во внешней кювете; I_2 – суммарная интенсивность излучения смещенных компонент, прошедших через внешнюю кювету газоанализатора

$$I_2 = I_\sigma \exp(-k_\sigma L), \quad (4.18)$$

где I_σ – интенсивность суммы σ -компонент излучения лампы, k_σ – коэффициент поглощения σ -компонент во внешней кювете газоанализатора; I_3 – интенсивность излучения несмещенной компоненты, прошедшей вне кюветы газоанализатора (по короткому пути – опорный сигнал), равная интенсивности π -компоненты излучения лампы

$$I_3 = I_\pi; \quad (4.19)$$

I_4 – суммарная интенсивность излучения смещенных компонент, прошедших вне кюветы газоанализатора (по короткому пути), равная суммарной интенсивности σ -компонент излучения лампы

$$I_4 = I_\sigma. \quad (4.20)$$

На основе сигналов I_1 , I_2 , I_3 и I_4 может быть рассчитана величина x , пропорциональная концентрации паров ртути в воздухе, находящемся во внешней кювете газоанализатора.

Представленный метод и измерительный канал, в котором используется этот метод, может быть технически реализован двумя способами: измерением четырех сигналов, при фиксированных положениях фазовой пластинки, и измерением разностного сигнала, при непрерывном вращении фазовой пластинки.

Совместное решение уравнений (4.17-4.20), позволяет получить выражение для показателя экспоненты $L(k_\sigma - k_\pi)$:

$$\frac{I_1}{I_2} \frac{I_4}{I_3} = \frac{I_\pi \exp(-k_\pi L) \cdot I_\sigma}{I_\sigma \exp(-k_\sigma L) \cdot I_\pi} = \frac{\exp(-k_\pi L)}{\exp(-k_\sigma L)} = \exp[L(k_\sigma - k_\pi)].$$

Введем переменную x , равную

$$x = L(k_\sigma - k_\pi) = \ln \frac{I_1}{I_2} \frac{I_4}{I_3}, \quad (4.21)$$

Величина $x_{\text{и}} = L(k_\sigma - k_\pi)$ пропорциональна концентрации паров ртути во внешней кювете газоанализатора, имеющей длину L . Индекс «и» указывает на то, что величина $x_{\text{и}}$ получена при измерении. Коэффициент пропорциональности может быть экспериментально определен путем калибровки – сопоставления измеренной величины $x_{\text{к}}$ с физически обоснованным значением концентрации паров ртути n во внешней кювете газоанализатора.

Описанный способ измерения требует отдельного измерения четырех сигналов I_1 , I_2 , I_3 и I_4 , что существенно замедляет процесс получения данных. Заметим, что отличие поглощений несмещенной и смещенных компонент столь мало, что даже самый малый дрейф нуля измерительного прибора (или усилителя фототока детектора), регистрирующего сигналы I_1 и I_2 , а также I_3 и I_4 , существенно влияет на результат измерения. Необходимость корректировки нуля измерительного прибора (усилителя фототока) еще более замедляет процесс

измерения. Процесс измерения можно ускорить, если использовать непрерывное вращение фазовой пластинки. При этом мы получаем непрерывный периодический сигнал. Максимумы и минимумы этого сигнала определяются потоками π - и σ -компонент, прошедшими внешнюю кювету. Вычитание ($r = I_1 - I_2$) исключает постоянную составляющую разностного сигнала, а вместе с ней и возможный дрейф нуля измерительного прибора (усилителя) и определяет удвоенную амплитуду разностного переменного (периодического) сигнала. Представим разностный сигнал как

$$r = I_\pi \exp(-k_\pi L) - I_\sigma \exp(-k_\sigma L). \quad (4.22)$$

Показатели экспонент в формуле (4.22) являются весьма малыми величинами: $k_\pi L \ll 1$, $k_\sigma L \ll 1$. На этом основании экспоненты могут быть представлены их первыми членами разложения в ряд Тейлора, при этом $r = I_\pi(1 - k_\pi L) - I_\sigma(1 - k_\sigma L)$. Далее после перегруппировки, разностный сигнал представляется как $r = I_\pi - I_\sigma + L(I_\sigma k_\sigma - I_\pi k_\pi)$. При условии $I_\pi = I_\sigma = I_{\text{и}}$, разностный сигнал принимает вид $r_{\text{и}} = I_{\text{и}} L(k_\sigma - k_\pi)$, где величина $L(k_\sigma - k_\pi)$ пропорциональна концентрации ртути во внешней кювете газоанализатора. При этом множитель $I_\pi = I_\sigma = I_{\text{и}}$ пропорционален уровню потока во внешней кювете газоанализатора (постоянной составляющей разностного сигнала r). Условие $I_\pi = I_\sigma = I_{\text{и}}$ достигается изменением углового положения поляризационного компенсатора 3, см. рис. 4.17.

Введем переменную x , равную

$$x_{\text{и}} = L(k_\sigma - k_\pi) = \frac{r_{\text{и}}}{I_{\text{и}}}. \quad (4.23)$$

Величина $x_{\text{и}} = L(k_\sigma - k_\pi)$ пропорциональна концентрации паров ртути во внешней кювете газоанализатора, имеющей длину L и равна амплитуде переменной составляющей, нормированной на постоянную составляющую разностного сигнала. Индекс «и» в формуле (4.23) указывает на то, что

отмеченные им величины были получены при измерении, соответствующие им величины, полученные при калибровке, будут отмечены индексом «к».

4.2.3 Ртутный газоанализатор РГА-15

4.1.3.1 Структурная и функциональная схемы разработанного ртутного газоанализатора представлены на рис. 4.17 [199].

Ртутная газоразрядная лампа низкого давления 1 помещена в магнитное поле постоянного магнита NS. Линза 2 преобразует световой поток лампы в параллельный поток. Этот поток содержит как π -компоненту, так и обе σ -компоненты. При этом центральная (несмещенная) π -компонента линейно поляризована вдоль направления магнитного поля (вертикально), а обе σ -компоненты (смещенные) линейно поляризованы в направлении перпендикулярном направлению магнитного поля (горизонтально – перпендикулярно плоскости рисунка).

Поляризационный компенсатор 3, в виде плоско-параллельной кварцевой пластинки, установленный в потоке излучения, позволяет при необходимости выравнивать поток π и суммарный поток обеих σ компонент, путем поворота этой пластинки вокруг оси, перпендикулярной плоскости рисунка. Фазовая полуволновая пластинка 4 и призма Глана 5 образуют поляризационный модулятор.

Поворотом фазовой пластинки вокруг оптической оси достигается азимутальный поворот плоскости поляризации π и σ компонент, при этом призма Глана, установленная неподвижно, пропускает далее либо только одну π -компоненту, либо одновременно обе σ -компоненты. Для контроля выравнивания исходящих мощностей π - и σ -компонент в измерительном канале установлены зеркала 6, которые направляют излучение на фильтр 7, линзу 8 и далее на фотодетектор 9 для последующего детектирования (регистрации) потоков π - и σ -компонент. На рис. 4.17 зеркала 6 изображены во включенном положении.

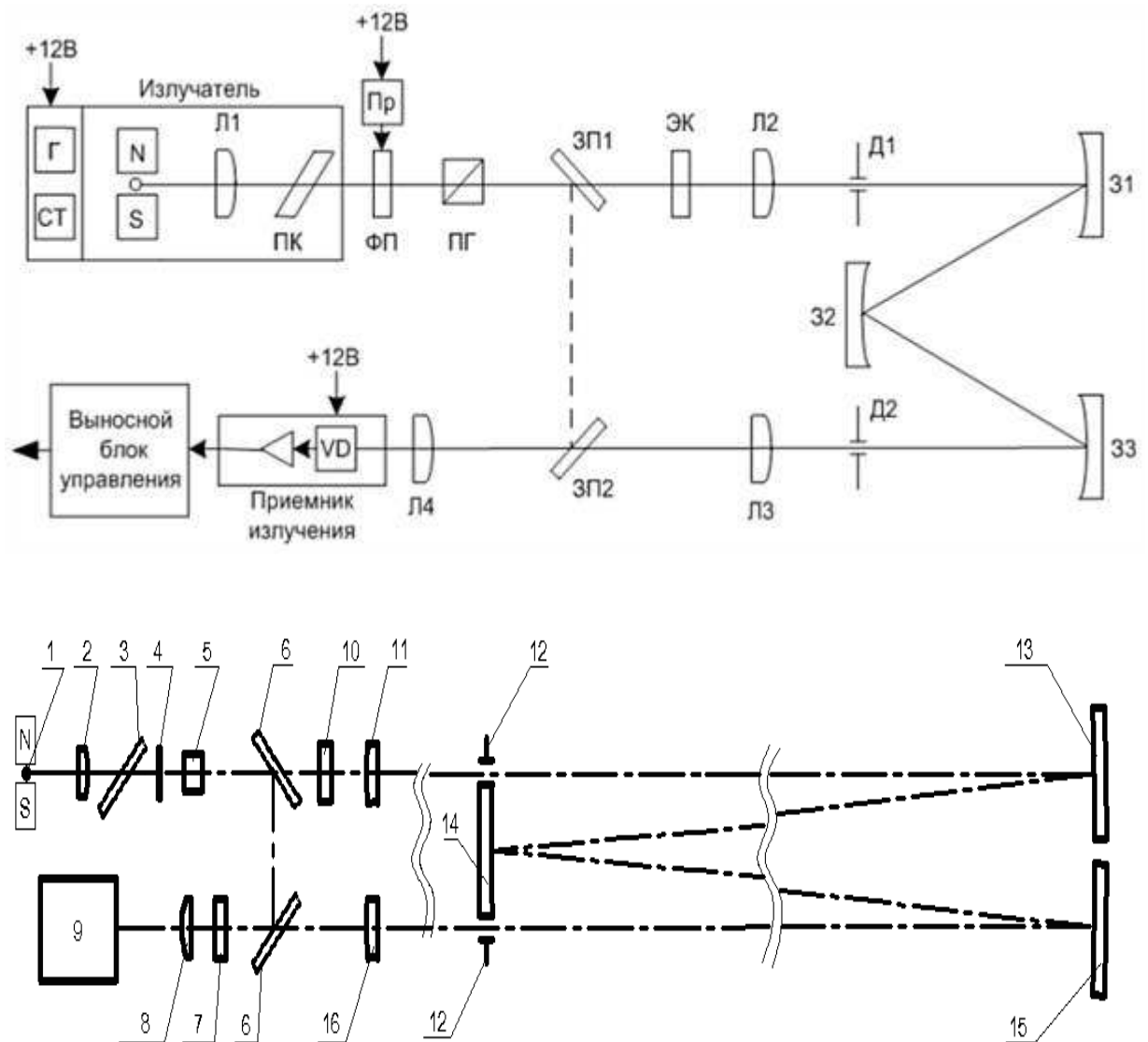


Рисунок 4.17 - Функциональная схема ртутного газоанализатора: 1 - ртутная газоразрядная лампа низкого давления, помещенная в магнитное поле постоянного магнита NS, 2 - линза, 3 – поляризационный компенсатор - (плоскопараллельная кварцевая пластинка), 4 – полуволновая фазовая пластинка, 5 – призма Глана, 6 – плоские зеркала, 7 – интерференционный фильтр, 8 – линза, 9 – фотодетектор, 10 – эталонная кювета, 11 – линза, 12 – входное и выходное окна внешней кюветы, 13, 14, 15 – сферические зеркала внешней кюветы газоанализатора, 16 – линза

В режиме измерения зеркала 6 выводятся из потока (выключаются), и излучение поступает на линзу 11, проектирующую изображение источника излучения 1 на верхней (входной) диафрагме 12. Далее поток расширяется и

падает на сферическое зеркало 13. Отраженный от зеркала 13 поток падает на зеркало 14, на котором зеркало 13 создает изображение источника. Далее зеркало 14 направляет поток излучения на зеркало 15, которое создает изображение источника в плоскости выходной (нижней) диафрагмы 12. Диафрагмы 12 (входная и выходная), сферические зеркала 13, 14 и 15 образуют внешнюю многоходовую кювету газоанализатора (классическую многоходовую кювету Уайта). Изменением наклона зеркал 13 и 15 внешняя кювета может быть настроена на 4 или 8 проходов, при этом ее эффективная длина будет составлять 1600 или 3200 мм. Во внешней кювете происходит поглощение излучения лампы атомами ртути, содержащимися в анализируемом воздухе. Излучение, выходящее из внешней кюветы (из нижней диафрагмы – 12), поступает на линзу 16, преобразуется в параллельный поток, который через фильтр 7 и линзу 8 поступает на фотодетектор 9 для преобразования в электрический сигнал.

Таким образом, в измерительном канале газоанализатора можно зарегистрировать потоки π и σ компонент, прошедшие по короткому пути, когда зеркала 6 включены, и потоки π и σ компонент, прошедшие по длинному пути, когда зеркала – 6 выключены и включена внешняя кювета газоанализатора. Кроме того, в измерительный канал может быть введена эталонная кювета (ЭК) 10 для калибровки газоанализатора.

Разработанный ртутный анализатор является мобильным (переносным) прибором, для полевых работ прибор снабжен GPS-приемником и FLASH-памятью, куда заносятся измеренные значения концентрации паров ртути, координаты места измерения и время измерения. На рис. 4.18 представлен общий вид конструктивного исполнения РГА-15 (вид приведен со снятыми боковыми крышками).

В состав газоанализатора входят: измерительный блок, блок управления и индикации, зонд-пробоотборник, устройство контроля координат и времени измерений (GPS-навигатор), устройство накопления информации (FLASH-память), набор кювет для тестирования газоанализатора, запасной аккумулятор,

зарядное устройство, сумка-контейнер для переноски прибора и принадлежностей [202].

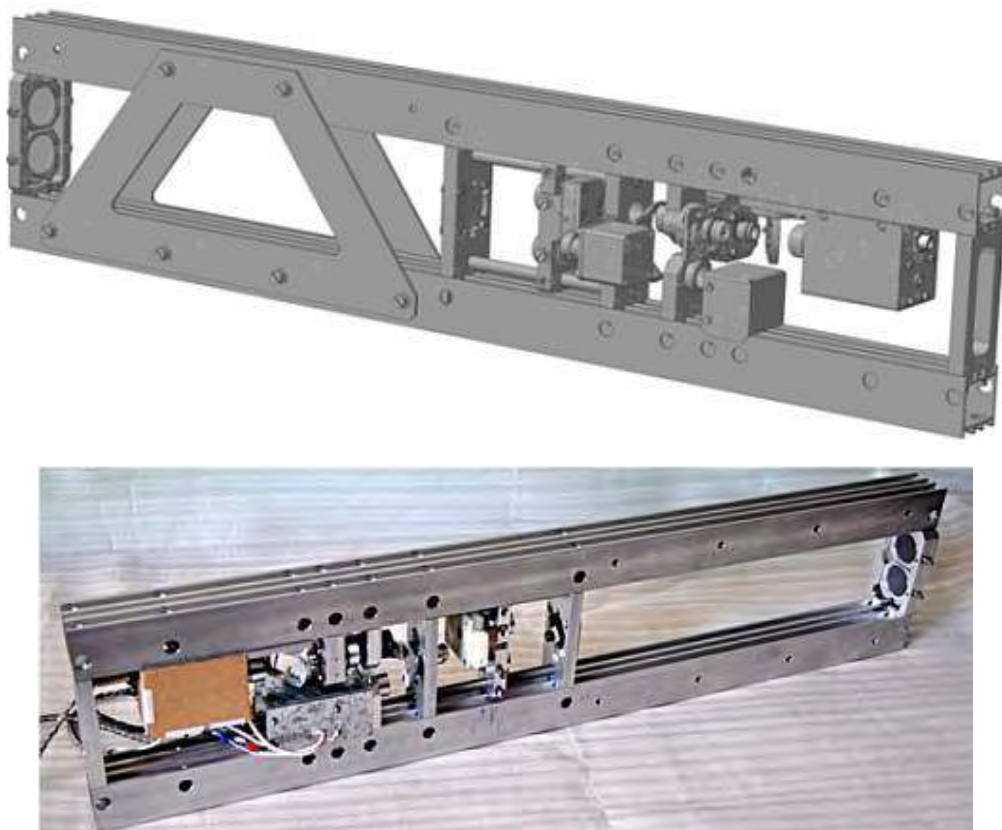


Рисунок 4.18 - РГА-15. Конструктивное исполнение

Проведенные экспериментальные исследования подтвердили возможность использования ртутного газоанализатора РГА-15 в составе мобильного измерительного комплекса автоматизированных систем экологического и метеорологического мониторинга АПС (см. главу 5 настоящей работы).

Основные технические характеристики РГА-15 приведены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 - Основные технические характеристики РГА-15

Техническая характеристика	Значение
Предел обнаружения паров ртути	10 нг/м ³
Диапазон измеряемых концентраций паров ртути	30 - 20000 нг/м ³
Предел допускаемой основной погрешности: в диапазоне 30 - 100 нг/м ³	30 %.

в диапазоне 100 - 20000 нг/м ³	20 %.
Время одного измерения	2 с
Время выхода на рабочий режим	не более 30 мин
Время непрерывной работы в автономном режиме	не менее 8 час
Габаритные размеры измерительного блока	674 × 260 × 84 мм
Габаритные размеры блока управления и индикации	130 × 90 × 26 мм
Масса измерительного блока блока управления и индикации	5.0 кг 0,3 кг
Напряжение питания	12 В
Потребляемая мощность	не более 10 Вт

Для изготовления газоанализатора РГА-15 (его мобильной модификации РГА/м) [203] под контролем автора разработан комплект эскизной конструкторской документации АМЯ2.770.015, по которому в ООО «Сибаналитприбор» изготовлен экспериментальный образец прибора. РГА/м использован в составе автоматизированных информационно-вычислительных системы, предназначенных для мезомасштабного метеорологического и экологического контроля состояния АПС (см. главу 5 настоящей работы).

4.2.4 Метрологическое обеспечение и способы диагностики газоанализатора РГА-15 в процессе эксплуатации

4.2.4.1 Для определения концентрации паров ртути с использованием соотношения $x_{\text{и}} = \frac{r_{\text{и}}}{I_{\text{и}}}$ (см. п.4.2.2 настоящей работы) требуется проведение калибровки газоанализатора.

Для этой цели используется специальная кварцевая эталонная кювета (ЭК) с парами ртути. Такая ЭК имеет небольшую толщину внутренней полости ~ 0,1 – 1,0 мм, внутрь которой помещена капелька ртути, создающая в ЭК давление насыщенных паров. Зависимость давления и концентрации насыщенных паров ртути от температуры известны [196] и приведены ниже в виде матрицы r : первая строка – температура, град С; вторая строка – давление, мм Нг; третья строка – концентрация, нг/см³.

Таблица 4.6 - Матрица зависимости давления и концентрации паров ртути от температуры

$r :=$	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
	0.000185	0.000304	0.000490	0.000773	0.001201	0.001840	0.002777	0.004135	0.006079	0.008827	0.01267	0.01797	0.02524	0.03507
	2.178	3.515	5.565	8.626	13.174	19.845	29.457	43.150	62.424	89.218	126.079	176.095	243.624	333.500

В широком интервале температур зависимость концентрации от температуры $N(t)$ представляется выражением:

$$N(t) = (2,118 + 0,0437 \cdot t - 0,0012 \cdot t^2 + 0,63 \cdot 10^{-5} \cdot t^3) \cdot \exp(0,082 \cdot t). \quad (4.24)$$

Выражение (4.24) получено путем аппроксимации экспериментальных данных, содержащихся в матрице r . На рисунке 4.19 показана зависимость концентрации насыщенных паров ртути, нг/см^3 в интервале от температур $(0 \dots 65)$ °С в ЭК.

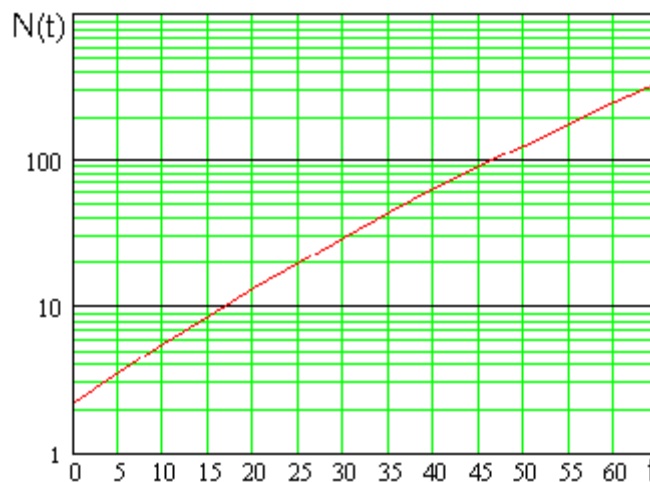


Рисунок 4.19 - Зависимость концентрации насыщенных паров ртути нг/см^3 в интервале от температур $(0 \dots 65)$ °С в ЭК

Введение ЭК с известной концентрацией паров ртути $N(t)$ в измерительный канал создает во внешней кювете газоанализатора эффективную концентрацию равную

$$n(t) = N(t) \frac{l}{L}, \quad (4.24)$$

где l – толщина внутренней полости ЭК, мм; L – эффективная длина внешней кюветы газоанализатора, мм. Используя зависимость $N(t)$, можно создавать различные уровни концентрации паров ртути $n(t)$ во внешней кювете газоанализатора, изменяя температуру t эталонной кюветы.

Для калибровки газоанализатора нужно получить ряд значений величины x_i , соответствующих концентрациям ртути $y_i = n(t_i)$ при температуре ЭК, равной t_i . Полученные таким образом данные можно представить в виде системы из p линейных уравнений вида

$$y_i = a \cdot x_i + b. \quad (4.25)$$

Эта система содержит коэффициенты калибровки a и b , которые можно определить, используя, например, метод наименьших квадратов:

$$a = \frac{p \sum_{i=1}^p x_i y_i - \sum_{i=1}^p x_i \sum_{i=1}^p y_i}{p \sum_{i=1}^p x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^p x_i \right)^2}; \quad b = \frac{\sum_{i=1}^p x_i^2 \sum_{i=1}^p y_i - \sum_{i=1}^p x_i \sum_{i=1}^p x_i y_i}{p \sum_{i=1}^p x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^p x_i \right)^2}. \quad (4.26)$$

Коэффициент a определяет наклон прямой калибровки, а коэффициент b определяет точку пересечения этой прямой с осью y . Эта точка опосредованно связана со значением концентрации паров ртути в воздухе на момент калибровки.

Коэффициенты a и b позволяют связать значение x из уравнений (4.21) и (4.23) со значением y , физический смысл которого представляет собой искомый уровень концентрации ртути, $y = ax + b$. Заменяя переменные y и x на N_{Hg} и

$\ln\left(\frac{I_1}{I_2} \frac{I_4}{I_3}\right)$ в первом случае, мы получаем формулу для расчета концентрации паров

ртути по результатам измерения (4.21),

$$N_{Hg} = a \cdot \ln \left(\frac{I_1}{I_2} \frac{I_4}{I_3} \right)_n + b. \quad (4.27)$$

Заменяя переменные y и x на N_{Hg} и $\frac{r_n}{I_n}$ во втором случае, мы получаем формулу для расчета концентрации паров ртути по результатам измерения (4.23),

$$N_{Hg} = a \cdot \frac{r_n}{I_n} + b. \quad (4.28)$$

4.2.4.2 Относительную погрешность, обусловленную ошибкой, вносимой неточностью моделирования концентрации n паров ртути во внешней кювете газоанализатора, при калибровке можно определить на основе формулы (6.14)

$$\frac{\delta n(t)}{n(t)} = \frac{dN(t)}{dt} \cdot \frac{\delta t}{N(t)} + \frac{\delta l}{l} + \frac{\delta L}{L}. \quad (4.29)$$

Здесь и далее, под знаком δ мы имеем в виду абсолютную величину погрешности рассматриваемой величины. При условии: $\delta t = 0.01^\circ\text{C}$ (стабильность температуры ЭК), относительная погрешность $\frac{dN(t)}{dt} \cdot \frac{\delta t}{N(t)}$ не превосходит значений $2 \times 10^{-6} \div 2 \times 10^{-4}$ в интервале температур $0 \div 65^\circ\text{C}$. Для температуры ЭК, равной 25°C , она равна 1.4×10^{-5} . Даже при $\delta t = 0.1^\circ\text{C}$ она не превосходит значений $2 \times 10^{-5} \div 2 \times 10^{-3}$ в интервале температур $0 \div 65^\circ\text{C}$. Для температуры ЭК, равной 25°C , она равна 1.4×10^{-4} . При легко достижимом условии $\frac{\delta L}{L} \approx 1 \times 10^{-3}$ главный вклад в величину $\frac{\delta n(t)}{n(t)}$ вносит значение $\frac{\delta l}{l}$ (погрешность толщины δl при толщине l ЭК).

При $l \approx 1\text{ мм}$ и $\delta l \approx 0.01\text{ мм}$ величина $\frac{\delta l}{l}$ равна 0.01, что и определяет, в конечном счете, относительную погрешность величины концентрации паров ртути во внешней кювете газоанализатора, создаваемой ЭК,

$$\frac{\delta n}{n} \approx \frac{\delta l}{l} \approx 0.01. \quad (4.30)$$

Погрешность определения концентрации паров ртути в схеме измерения четырех сигналов, при фиксированных положениях фазовой пластинки, можно оценить следующим образом.

Представим уравнение (4.27) в виде, удобном для анализа погрешности,

$$N_{Hg} = n \frac{\ln z_u}{\ln z_k}, \quad (4.31)$$

где $z = \frac{I_1 I_4}{I_2 I_3}$. Выражение для относительной погрешности $\frac{\delta N_{Hg}}{N_{Hg}}$ измерения величины N_{Hg} представляется как,

$$\frac{\delta N_{Hg}}{N_{Hg}} = \frac{\delta n}{n} + \frac{\delta(\ln z_u)}{\ln z_u} + \frac{\delta(\ln z_k)}{\ln z_k}. \quad (4.32)$$

Первое слагаемое этого выражения мы рассмотрели выше. С учетом того, что $z = \frac{I_1 I_4}{I_2 I_3}$, величина, определяющая относительную погрешность измерения величины $x = \ln z$, будет равна $\frac{\delta(\ln z)}{\ln z} = \frac{\delta z}{z \ln z}$. Нетрудно показать, что

$$\frac{\delta z}{z} = \frac{\delta I_1}{I_1} + \frac{\delta I_2}{I_2} + \frac{\delta I_3}{I_3} + \frac{\delta I_4}{I_4}. \quad (4.33)$$

С учетом того, что сигналы I_1, I_2, I_3, I_4 близки по величине и измеряются с одинаковой относительной погрешностью, получим: $\frac{\delta z}{z} \approx \frac{4\delta I}{I}$. Таким образом, относительная погрешность измерения величины x может быть оценена как $\frac{\delta x}{x} = \frac{4\delta I}{I \ln z}$. Так как величина x измеряется дважды (при измерении и калибровке), то:

$$\frac{2\delta x}{x} = \frac{4\delta I}{I} \left(\frac{1}{\ln z_u} + \frac{1}{\ln z_k} \right). \quad (4.34)$$

С учетом величины $\frac{\delta n}{n}$ выражение для относительной погрешности измерения концентрации ртути имеет следующий вид:

$$\frac{\delta N_{Hg}}{N_{Hg}} = \frac{\delta I}{I} + \frac{4\delta I}{I} \left(\frac{1}{\ln z_{и}} + \frac{1}{\ln z_{к}} \right). \quad (4.35)$$

Величину $\frac{\delta I}{I}$ в формуле (4.35) определяют следующие факторы:

- относительная погрешность измерения сигналов I_1, I_2, I_3, I_4 ;
- относительная нестабильность потока излучения в измерительном канале;
- дрейф нуля измерителя фототока;
- нестабильность измерительных характеристик газоанализатора, обусловленная внешними условиями и механическими деформациями конструкции измерительного канала.

(Примечание: погрешность установки фазовой пластинки в положения π и σ легко сводятся к минимальным значениям, которыми можно легко пренебречь и не принимать в расчет).

Отметим, что относительная погрешность, при использовании этого способа измерений, представляется весьма значительной, по причине практически восьмикратного усиления ошибки измерения сигналов I_1, I_2, I_3, I_4 .

Погрешность определения концентрации паров ртути в схеме с измерением разностного сигнала, при непрерывном вращении фазовой пластинки можно оценить следующим образом.

Представим уравнение (4.28) в виде, удобном для анализа погрешности измерений: $N_{Hg} = n \cdot \frac{r_{и}}{r_{к}} \frac{I_{к}}{I_{и}}$. Выражение для относительной погрешности имеет следующий вид:

$$\frac{\delta N_{Hg}}{N_{Hg}} = \frac{\delta n}{n} + \delta r \left(\frac{1}{r_{и}} + \frac{1}{r_{к}} \right) + \delta I \left(\frac{1}{I_{и}} + \frac{1}{I_{к}} \right). \quad (4.36)$$

Первое слагаемое этого выражения $\frac{\delta n}{n}$ мы рассмотрели выше. Второе слагаемое $\delta r \left(\frac{1}{r_{\text{и}}} + \frac{1}{r_{\text{к}}} \right)$ - сумма относительных погрешностей измерения амплитуды разностного сигнала, при измерении и при калибровке. Третье слагаемое $\delta I \left(\frac{1}{I_{\text{и}}} + \frac{1}{I_{\text{к}}} \right)$ - сумма относительных погрешностей измерения потока излучения (постоянной составляющей фототока) при измерении и при калибровке. Ввиду того, что значения $I_{\text{и}}$ и $I_{\text{к}}$ - близки по величине, выражение для относительной погрешности измерения концентрации ртути выше можно записать в следующем виде:

$$\frac{\delta N_{\text{Hg}}}{N_{\text{Hg}}} = \frac{\delta l}{l} + \delta r \left(\frac{1}{r_{\text{к}}} + \frac{1}{r_{\text{и}}} \right) + 2 \frac{\delta I}{I}. \quad (4.37)$$

Выражение (4.37) в общих чертах подобно выражению (4.35) т.е. опосредованно включает в суммарную погрешность:

- 1) относительную погрешность моделирования концентрации при калибровке;
- 2) относительную погрешность измерения сигналов $r_{\text{и}}$, $r_{\text{к}}$;
- 3) относительную нестабильность потока излучения в измерительном канале, обусловленную нестабильностью разряда в лампе;
- 4) относительную нестабильность токовой чувствительности фотодетектора;
- 5) относительную нестабильность характеристик при механических деформациях конструкции приора обусловленных внешними условиями.

Представление экспоненты первыми двумя членами ее разложения в ряд Тейлора $\exp(-x) \approx 1 - x$ безусловно вносит ошибку в оценку показателя поглощения. Однако, эта ошибка становится несущественной с уменьшением показателя экспоненты, относительно единицы (с уменьшением уровня наблюдаемой абсорбции). На рис. 4.20 показана зависимость ошибки оценки коэффициента поглощения от уровня абсорбции. Экспериментально определено,

что уровень абсорбции не превосходил значений $4 \div 6\%$, что вносит ошибку измерений, не превосходящую $0,1 \div 0,2 \%$.

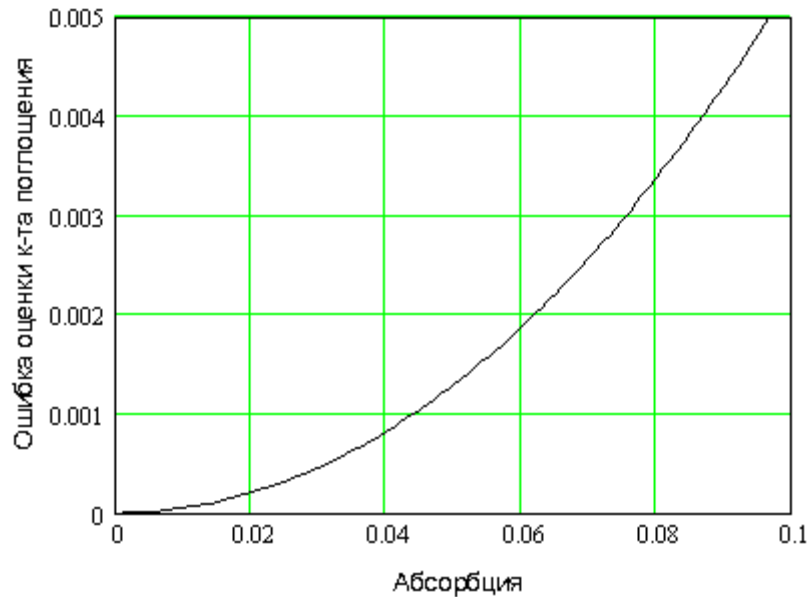


Рисунок 4.20 - Зависимость ошибки в оценке концентрации паров ртути от уровня наблюдаемой абсорбции

Отметим, что на основе сравнения оценок (4.35) и (4.37) погрешностей измерения, более предпочтительным для практического использования является способ измерения разностного сигнала при непрерывном вращении фазовой пластинки. В практическом отношении этот способ более устойчив к дрейфу нуля усилителя фототока детектора. Это обстоятельство решает задачу выбора в пользу измерения разностного сигнала при непрерывном вращении фазовой пластинки.

4.2.4.3 Диагностика газоанализатора непосредственно во время измерений может быть осуществлена с помощью дополнительной эталонной кюветы, входящей в состав газоанализатора. Эталонная кювета устанавливается на оптической оси измерительной кюветы в специальном термостатированном гнезде (рис. 4.17) и имитирует наличие паров ртути в измерительном тракте

газоанализатора с концентрацией, определяемой по формуле $n = N(t) \frac{l}{L}$ (здесь

$N(t)$ концентрация паров ртути в эталонной кювете, в зависимости от ее

температуры; l - толщина внутренней полости эталонной кюветы, мм; L - эффективная длина внешней кюветы газоанализатора, мм, в зависимости от числа проходов: 4 прохода – 1600 мм, 8 проходов 3200 мм). Калибровочный график зависимости $n(x) = a \cdot x$ приведен на рис. 4.21: по оси y отложена эффективная концентрация паров ртути нг/м^3 в кювете газоанализатора при температурах 30, 25, 20, 15, 10, 5 °С; по оси x – амплитуда разностного сигнала (в относительных единицах).

На рис. 4.22 приведены типичные результаты измерений содержания паров ртути в воздухе лаборатории, выполненные газоанализатором РГА-15 после описанного выше процесса калибровки.

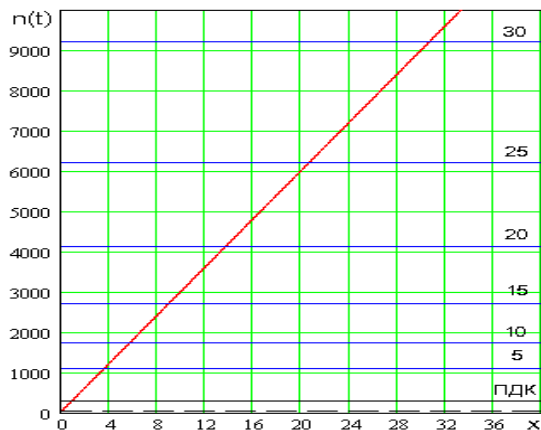


Рисунок 4.21- График линейной зависимости $n(x) = a \cdot x$: сплошная черная линия – уровень ПДК, штриховая линия – уровень 0,1 ПДК

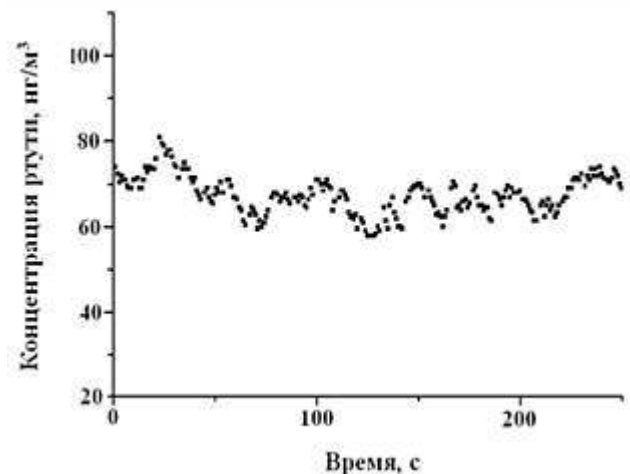


Рисунок 4.22 - Показания газоанализатора при измерении концентрации ртути в воздухе лаборатории (величина флуктуаций показаний не превышает 30 нг/м^3)

4.3 Оптический газоанализатор на основе метода ультразвуковой термометрии

4.3.1 Физические основы применения ультразвуковой термометрии в методе дифференциальной спектроскопии

4.3.1.1 Определение концентрации газовых компонент оптическими абсорбционными газоанализаторами, широко используемыми для контроля состава атмосферного воздуха, осуществляется на основе регистрации спектра, оптического излучения прошедшего через поглощающий излучение газ. Ключевым элементом абсорбционного газоанализатора является селективный фотоприемник, осуществляющий регистрацию оптических спектров.

Автором предложен новый способ регистрации оптического излучения и новый тип селективного фотоприемника, основанные на использовании метода акустической термометрии [21].

Поглощение газом электромагнитного (оптического) излучения приводит к увеличению температуры газа, которая определяется энергией излучения, а также оптическими и физико-химическими параметрами поглощающего газа (сечением поглощения молекулами газа излучения данного спектрального состава и теплоемкостью газа). Эта связь может быть выражена соотношением:

$$\Delta T = K \Delta E, \quad (4.38)$$

где ΔT - величина нагрева газа в градусах Кельвина, ΔE - количество поглощенной газом энергии электромагнитного излучения в джоулях, K - коэффициент пропорциональности, являющийся константой для данного сорта газа, геометрических размеров измерительной ячейки и давления газа в ячейке. Коэффициент пропорциональности K может быть рассчитан по известной теплоемкости используемого газа или определен эмпирически путем калибровочных измерений [205, 206].

Известно, что скорость распространения c звука в газе связана с его температурой T соотношением [81]:

$$c = \sqrt{\frac{\chi RT}{\mu}}, \quad (4.39)$$

где $\chi = C_p/C_v$ – отношение теплоемкостей данного газа при постоянном давлении и постоянном объеме, R – универсальная газовая постоянная, μ – молекулярный вес газа.

В соответствии с этим, изменение температуры газа может быть определено из соотношения

$$\Delta T = \frac{\mu}{\chi R} (c_2^2 - c_1^2), \quad (4.40)$$

где c_1 и c_2 – скорости распространения звука в газе при температурах T_1 и T_2 , или

$$\Delta T_k = \frac{\mu}{\chi R} L^2 \frac{(t_2^2 - t_1^2)}{t_1^2 t_2^2} \quad (4.41)$$

где L – геометрическая длина пути акустического сигнала, пропускаемого через измерительную ячейку, t_1, t_2 – времена прохождения этим сигналом длины L до (t_1) и после (t_2) поглощения газовой средой контролируемого электромагнитного излучения.

Высокая чувствительность ультразвукового метода измерения температуры газа, показанная в параграфе 2.1 настоящей работы, определяет, соответственно, высокую чувствительность фотоприемника. Оценим величину минимальной регистрируемой фотоприемником энергии.

Связь величины нагрева газа с поглощенной им порцией энергии ΔE определяется известным соотношением [205]:

$$\Delta E = C_y M (\Delta T), \quad (4.42)$$

где C_y – удельная теплоемкость газа, M – масса нагреваемого объема газа, ΔT – изменение температуры газа.

Для сухого газа в нормальных условиях выражение (4.38) можно записать в виде:

$$c \approx 20 \sqrt{T}, \quad (4.43)$$

и, подставив (4.43) в (4.42) получим:

$$\Delta E = \frac{\pi}{400} C_y M (c_2^2 - c_1^2), \quad (4.44)$$

где c_1 и c_2 – скорость звука в газовой среде до и после нагрева соответственно.

Выразим, пользуясь (4.40), величины c_1 и c_2 через времена пролета t_1 , t_2 акустического импульса эффективной длины измерительной кюветы L и учитывая, что

$$M = \pi r^2 L \rho, \quad (4.45)$$

где r – радиус сечения канала акустического луча, ρ – плотность газа в ячейке, получим:

$$\Delta E = \frac{\pi}{400} C_y r^2 L \rho \frac{(t-t)(t+t)}{t \cdot t}, \quad (4.46)$$

или, через приращение $\delta t = t_2 - t_1$:

$$\Delta E = \frac{\pi}{400} C_y r^2 L \rho \frac{(\delta t)(t+\delta t)}{t^2(t+\delta t)^2}. \quad (4.47)$$

Учитывая, что величина δt много меньше t_1 и t_2 , (4.47) можно записать в виде:

$$\Delta E = \frac{\pi}{400} C_y r^2 L \rho \frac{t \delta t}{t^4}. \quad (4.48)$$

Воспользуемся соотношением $t = L/c$, получим:

$$\Delta E = \frac{\pi}{400} C_y r^2 L^{-2} c^3 \rho \delta t. \quad (4.49)$$

Оценим величину ΔE для конкретного случая: кювета ($L = 10$ см) наполнена углекислым газом CO_2 ($C_y = 0,8$ кДж/кг·°С, $\rho = 2$ кг/м³, $c = 259$ м/с), радиус канала акустического луча $r = 5$ мм. Величина δt определяется временным разрешением системы измерения временных интервалов и, в случае акустических импульсов близких по форме к видеоимпульсу, определяется тактовой частотой задающего генератора. В метеокомплексе АМК-03 используется генератор с тактовой частотой 32 МГц, которую можно взять за основу для оценки пороговой чувствительности термоакустического фотопремника: $\delta t \approx 3 \cdot 10^{-8}$ с. Отсюда $\Delta E \cong 2 \cdot 10^{-6}$ Дж – минимальная порция энергии оптического излучения, поглощение

которой может зарегистрировать акустическая ячейка с приведенными выше параметрами.

Увеличение чувствительности термоакустического фотоприемника может быть достигнуто за счет подбора физико-химических параметров поглощающей оптическое излучение газовой среды, при которых обеспечивается более эффективное поглощение излучения и использования более чувствительных схем измерения времени распространения акустического сигнала в измерительной кювете.

Свойство спектральной селективности термоакустического фотоприемника обеспечивается соответствующим подбором газового наполнения кюветы.

Термоакустический фотоприемник имеет также преимущества при регистрации оптического излучения высокой мощности. Оценим его возможности для регистрации излучения мощного импульсного CO₂-лазера, часто используемого для дистанционного инициирования оптического пробоя (см. главу 3 настоящей работы).

В случае использования ячейки для регистрации излучения CO₂-лазера с центром полосы генерации на длине волны $\lambda = 10,6$ мкм, для определения пороговой чувствительности следует учитывать коэффициент поглощения излучения газовой средой (центр полосы поглощения CO₂ – 10,4 мкм), который из-за слабого перекрытия полос генерации и поглощения относительно невелик.

Согласно закону Бугера интенсивность ИК-излучения частоты ν [см⁻¹], прошедшего через кювету с поглощающим газом может быть записана в виде:

$$I^{np}(\omega) = I_0(\omega)e^{-k(\omega) \cdot P \cdot l} \quad (4.50)$$

где $I_0(\omega)$ - спектральная плотность излучения до прохождения кюветы [Дж·см], $k(\omega)$ - спектральная плотность коэффициента поглощения [см⁻¹·атм⁻¹], P – парциальное давление поглощающего газа [атм], l – длина кюветы [см].

Если излучение $I_0(\omega)$ имеет сложный спектральный состав, то плотность прошедшего через кювету излучения I^{np} имеет вид [206]:

$$I^{np} = \int_{O_1}^{\infty} I_0(\omega) e^{-k(\omega)*P*l} d\omega = \int_0^{\infty} I^{np}(\omega) d\omega. \quad (4.51)$$

Соответственно, поглощенная газом энергия равна:

$$\Delta I = I_0 - I^{np} = \int_0^{\infty} I_0(\omega) d\omega - \int_0^{\infty} I_0(\omega) e^{-k(\omega)*P*l} d\omega. \quad (4.52)$$

Для случая слабого поглощения:

$$\Delta I = \int_0^{\infty} I_0(\omega) k(\omega) * P * l * d\omega. \quad (4.53)$$

Переходя к численным величинам, полученным для случаев слабого поглощения, имеем:

$$\Delta I \approx 3 * 10^{-3} I_0 L. \quad (4.54)$$

Отсюда, с учетом оценки величины ΔE из соотношения (4.49) и полагая $L = 10$ см, получим $\Delta E \cong 10^{-4}$ Дж. Данная величина чувствительности позволяет использовать термоакустический фотоприемник для регистрации излучения CO_2 - лазера вместо широко распространенного измерителя мощности ИМО-2М.

Преимуществом данного фотоприемника при регистрации мощных лазерных импульсов является возможность использования его в проходных схемах измерения энергии оптического излучения без ответвления части лазерного пучка на чувствительный элемент приемника, что, в случае лазерных импульсов высокой мощности, сопряжено с рядом технологических проблем.

4.3.1.2 Для экспериментальной апробации способа была использована экспериментальная установка, представленная на рисунке 4.23 [208].

Объем газовой кюветы с ортогональной схемой совмещения путей распространения акустического и оптического излучений составлял 11 см^3 , диаметры ЭАП-излучателя и ЭАП-приемника – 12 мм, расстояние между ними – 64 мм, частота ультразвуковых колебаний – 120 КГц, частота следования акустических импульсов – 10 Гц, тактовая частота АЦП – 32 МГц. Расстояние между оптическими окнами кюветы (входным и выходным) составляло 25 мм. CO_2 -лазер с диаметром пучка 12 мм, обеспечивал генерацию импульсов с энергией $320 \cdot 10^{-3}$ Дж длительностью 50 нс.

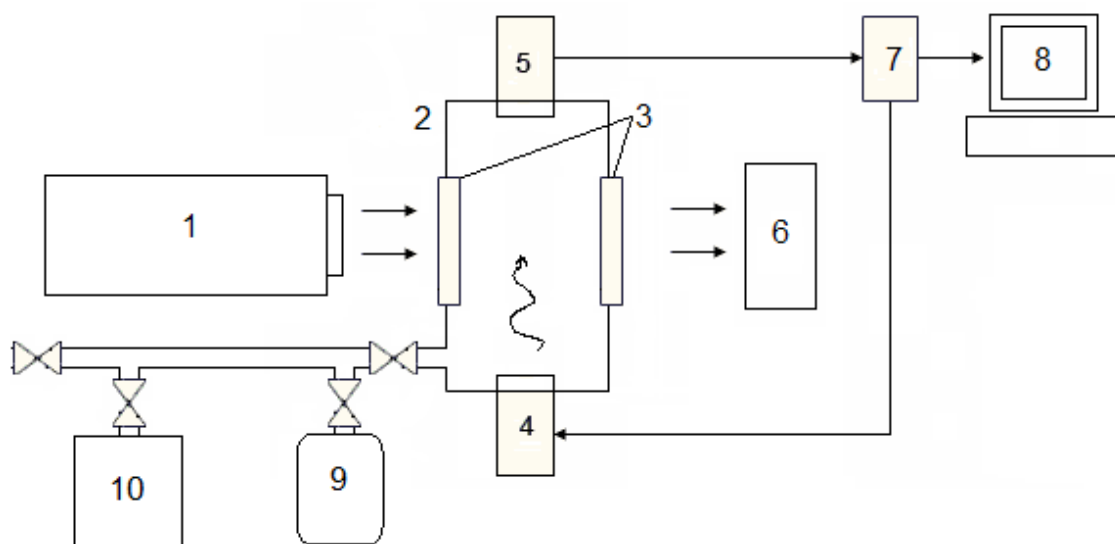


Рисунок 4.23 - Блок-схема экспериментальной установки: 1 - CO_2 - лазер (импульсы с энергией 320 ± 10 мДж, длительностью ~ 50 нс); 2 – измерительная камера наполненная газом ($V \sim 11 \text{ см}^{-3}$); 3 – окна камеры (CaF_2), 4 – излучатель ультразвуковых колебаний (частота 120 кГц, частота следования импульсов 10 Гц); 5 – приемник ультразвуковых колебаний; 6 – фотоприемник Ophir; 7 – блок питания и электроники; 8 – персональный компьютер; 9 – баллон с газом; 10 – форвакуумный насос

В качестве газа, поглощающего оптическое излучение в области 10,6 мкм, был выбран элегаз (SF_6), который обладает интенсивными полосами поглощения в данном диапазоне. Проведенный расчет показал, что ввиду высокого коэффициента поглощения ($\sim 60 \text{ см}^{-1}$) при его содержании в камере уже на уровне 0,05 атм происходит поглощение более 99,9% падающего излучения. Однако такая среда характеризуется крайне высоким коэффициентом затухания ультразвука. Ввиду этого был использован буферный газ, в качестве которого был выбран атмосферный воздух. Суммарное давление внутри камеры составляло 1 атм. При таких параметрах измерительной схемы минимальная регистрируемая величина изменения скорости звука внутри камеры составила $\sim 0,05$ м/с, что соответствует температурной чувствительности 0,09 К.

На рис. 4.24 приведены графики изменения температуры внутри камеры после воздействия лазерного импульса при различных парциальных давлениях рабочего газа.

Максимальная величина нагрева газа в кювете была зафиксирована при парциальном давлении SF_6 равном 0,022 атм и составила 4,3 К, что соответствует пороговой чувствительности фотоприемника около $7 \cdot 10^{-3}$ Дж. Дальнейшего улучшения пороговой чувствительности можно достичь увеличением частоты следования акустических импульсов и точности регистрации времени их пролета, применением соосной схемы совмещения оптического и акустического излучения, оптимизации размеров кюветы.

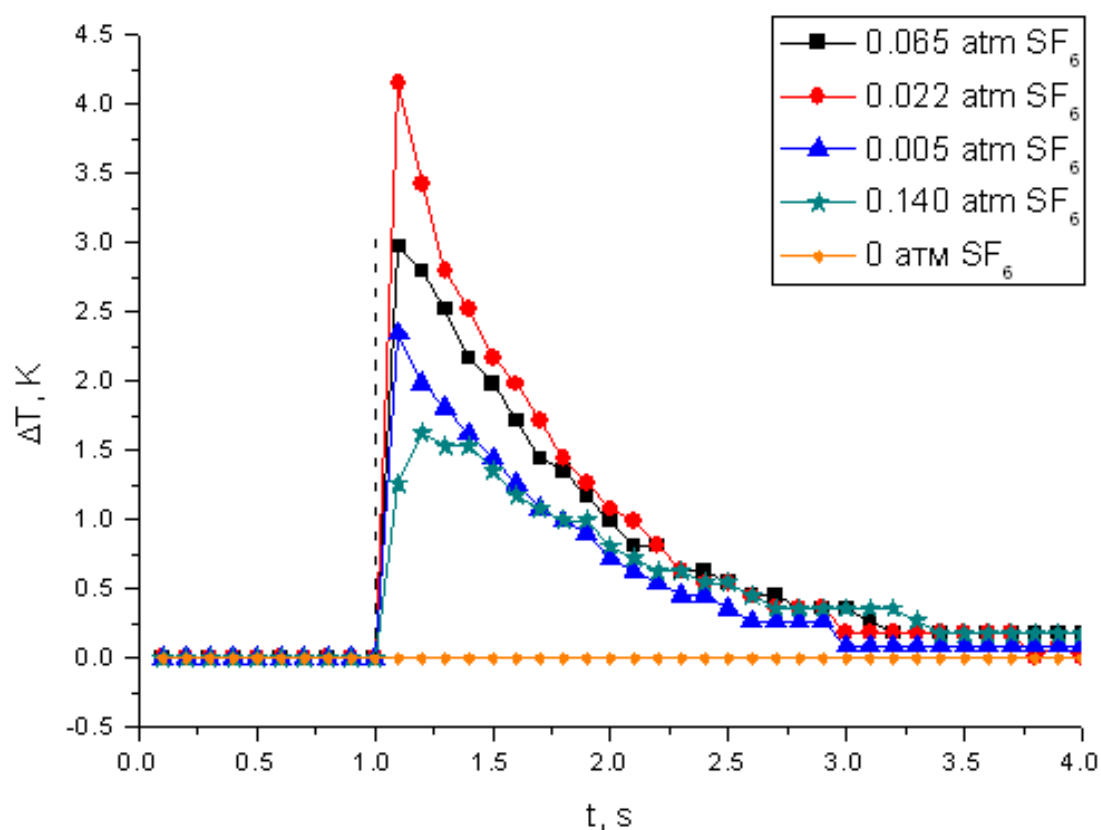


Рисунок 4.24 - Динамика изменения температуры газа в камере после воздействия лазерного импульса

4.3.2 Термоакустический фотоприемник

Термоакустический фотоприемник может быть реализован на основе схемы акустического термоанемометра (см. п.2.1.2 настоящей работы) [257]. Фотоприемник (рис. 4.25) содержит заполненную газом камеру, окно для входа излучения, излучатель и приемник акустических колебаний, а также схему регистрации временных интервалов [208]. Излучатель 5 и приемник акустических колебаний 4 расположены на торцах цилиндрической приемной камеры 3 длиной L , заполненной поглощающим газом.

Устройство работает следующим образом. Через входное окно 1 в приемную герметичную камеру 3 поступает исследуемое оптическое излучение, которое поглощается находящимся в камере 3 газом, что приводит к его нагреву. Электроакустический излучатель 5 запускается формирователем 6 и генерирует короткий ультразвуковой импульс.

Ультразвуковой импульс, прошедший расстояние L и имеющий временную задержку t регистрируется электроакустическим приемником 4, электрический сигнал с которого формируется усилителем-ограничителем 7 и поступает на измеритель временных интервалов 9.

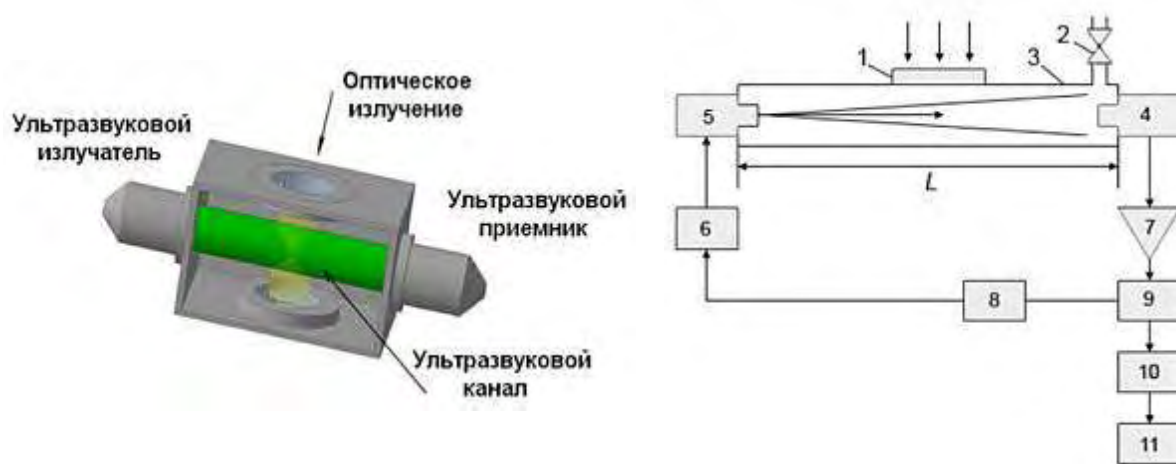


Рисунок 4.25 - Устройство и блок-схема фотоприемника с временной регистрацией прихода акустического импульса: 1 – входное окно, 2 – кран, 3 – приемная камера, 4 – приемник, 5 – излучатель, 6 – формирователь импульсов, 7 – усилитель-ограничитель, 8 – генератор тактовых импульсов, 9 – измеритель временных интервалов, 10 – интерфейс связи с ПЭВМ, 11 – ПЭВМ

Тактовый генератор 8 запускает формирователь 6 и подает тактовые импульсы с частотой 40 МГц на измеритель временных интервалов 9, где происходит счет числа тактовых импульсов с момента запуска ЭАП-излучателя 5 до прихода ультразвукового импульса на ЭАП-приемник 4. Кроме того, измеряется длительность полуволны ультразвукового импульса для определения его центра. Полученные данные через интерфейс связи с ПЭВМ 10, поступают на ПЭВМ 11 для последующей обработки по формулам (3.1), (3.7).

Более чувствительной к измерениям малых изменений температуры является схема с фазовой регистрацией акустических сигналов (рис. 4.26).

Устройство работает следующим образом. Генератор синусоидальных колебаний 9 с помощью усилителей 7 возбуждает излучатели 6, которые генерируют синусоидальные акустические колебания.

Эти колебания распространяясь через газовую среду в образцовой камере 4 и измерительной камере 3 поступают на акустические приемники 5, имея при этом некоторое значение фазы ϕ_1 и ϕ_2 для сигнала в образцовой и измерительной камерах соответственно.

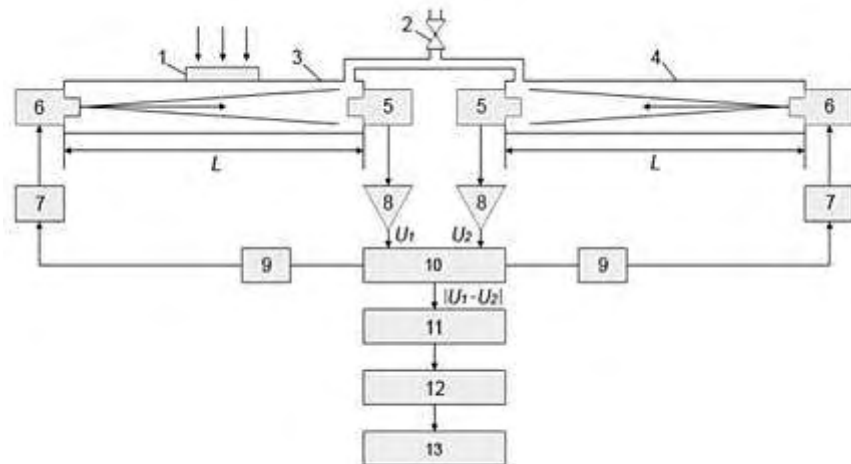


Рисунок 4.26 - Блок-схема дифференциального термоакустического фотоприемника с фазовой регистрацией прихода акустического импульса, где 1 - входное окно, 2 - кран, 3 - измерительная камера, 4 – образцовая камера, 5 - приемник, 6 - излучатель, 7 - блок питания, 8 - усилитель-ограничитель, 9 – генератор синусоидальных колебаний, 10 - фазовый детектор, 11 - АЦП, 12 – интерфейс связи с ПЭВМ, 13 – ПЭВМ

Разность фаз $\Delta\phi_0$ определяется конструктивными особенностями фотоприемника (несовпадениями длин камер 3 и 4, разбросом характеристик излучательных и приемных каналов и т.п.) и является константой для данного устройства. Акустические сигналы усиливаются усилителями 8 и поступают на фазовый детектор 10, где разность фаз сигналов с помощью подстроечных элементов устанавливается равной нулю.

При поступлении оптического излучения через входное окно 1 в измерительную камеру 3 в камере происходит нагрев газа, что, в соответствии с формулой (3.3) приводит к изменению скорости звука в находящейся в камере газовой среде и изменению фазы акустического сигнала на приемнике 5 камеры 3. На фазовом детекторе 10 возникает разность фаз $\Delta\phi$, пропорциональная мощности поглощенного в камере 3 оптического излучения. Далее электрический сигнал, соответствующий разности фаз $\Delta\phi$ преобразуется в цифровой код в АЦП 11 и через интерфейс 12 поступает на процессор 13, в котором с учетом калибровочных коэффициентов вычисляется мощность оптического излучения.

Устройства, использующие такую схему измерения, позволяют регистрировать изменение температуры газовой среды в измерительной камере с чувствительностью до нескольких тысячных градуса Цельсия.

В измерительных схемах, приведенных на рис. 4.25 и 4.26 направление оптического излучения, поступающего в измерительную камеру, ортогонально оси распространения ультразвукового сигнала. Такие схемы удобно применять для случая широкоапертурных пучков оптического излучения, когда диаметр пучка близок к эффективной длине измерительной камеры L . Для оптических пучков малой апертуры существенно уменьшается область взаимодействия оптического и акустического лучей, что приводит к снижению чувствительности фотоприемника. Для таких случаев более эффективна схема с соосным расположением оптического и акустического лучей (рис. 4.27) [23].

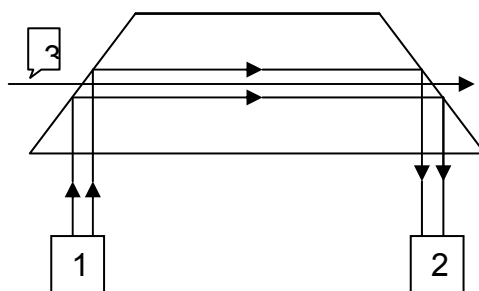


Рисунок 4.27 - Соосная схема совмещения оптического и акустического лучей:
1 – ультразвуковой излучатель, 2 – ультразвуковой приемник, 3 – оптический луч.

Эта схема позволяет максимально эффективно использовать область взаимодействия оптического и акустического лучей и увеличивать долю используемого для нагрева среды оптического излучения (тем самым повышать величину полезного сигнала приемника) за счет простого увеличения эффективной длины газовой кюветы L . Особенно полезным это свойство может быть при использовании такого фотоприемника в абсорбционном оптическом газоанализаторе.

4.3.3 Оптический газоанализатор на основе термоакустического фотоприемника

На основе термоакустического фотоприемника может быть построен абсорбционный газоанализатор, выполненный по схеме известных оптико-акустических газоанализаторов типа ГИАМ с ячейкой Голея [207], но имеющий в качестве детектора оптического излучения описанный выше термоакустический фотоприемник [22]. Блок-схема газоанализатора изображена на рис. 4.28.

Так же, как и газоанализатор ГИАМ, фототермоакустический газоанализатор содержит два оптических канала. В первом канале на одной оптической оси расположены широкополосный излучатель 1, фильтрационная кювета 2, измерительная кювета 3. Во втором канале на одной оптической оси расположены излучатель 4, фильтрационная кювета 5, сравнительная кювета 6.



Рисунок 4.28 - Фототермоакустический газоанализатор: 1, 4 – источники широкополосного инфракрасного излучения, 2, 5 – фильтрационные кюветы, 3 – измерительная кювета, 6 – сравнительная кювета, 7 – генератор электрических импульсов, 8, 9, 10, 11 – излучатели и приемники ультразвуковых колебаний.

Дополнительно, газоанализатор содержит генератор электрических импульсов 7, измеритель временных интервалов 12 и вычислительное устройство 13, а измерительная и сравнительная кюветы снабжены парами акустически согласованных излучателей и приемников ультразвуковых колебаний 8, 9 и 10, 11 [249].

Газоанализатор работает следующим образом. В первом канале широкополосное оптическое излучение, в спектре которого имеются составляющие, совпадающие со спектральными полосами поглощения контролируемой газовой компоненты, направляется от источника 1 через фильтрационную кювету 2 в измерительную кювету 3. Через измерительную кювету 3 принудительно прокачивают контролируемую газовую смесь, содержащую в той или иной концентрации искомую газовую компоненту. За счет содержания искомой компоненты в газовой среде происходит поглощение части оптического излучения, имеющего соответствующий спектральный состав, и, вследствие этого поглощения, происходит нагрев газовой среды. Во втором канале излучение от аналогичного источника 4 также поступает через фильтрационную кювету 5 в сравнительную кювету 6, но, в виду отсутствия в кювете 6 поглощающей оптическое излучение газовой компоненты, поглощения

оптического излучения в ней не происходит и не происходит, также, соответствующего нагрева газовой среды в кювете 6.

Электрические колебания с генератора 7 одновременно поступают на акустические излучатели 8 и 10, которые возбуждают ультразвуковые колебания, распространяющиеся, соответственно, в кюветах 3 и 6 к приемникам 9 и 11. Так как в измерительной кювете 3 произошел нагрев газовой смеси за счет поглощения соответствующей доли оптического излучения, а в сравнительной кювете такого нагрева не произошло, то, в силу известной зависимости скорости распространения акустического колебания в газовой среде от ее температуры, время прихода ультразвукового колебания на акустический приемник 9 кюветы 3 будет отличаться от времени прихода ультразвукового колебания на акустический приемник 11 кюветы 5, причем это отличие будет однозначно связано с относительной величиной нагрева газовой среды в кювете 3 и, соответственно, с концентрацией, поглощающей оптическое излучение искомой газовой компоненты. Электрические сигналы с выходов акустических приемников 9 и 11 поступают на измеритель временных интервалов 12, где происходит измерение времени задержки распространения ультразвуковых колебаний в сравнительной кювете 6 относительно измерительной кюветы 3, и, далее, в вычислительном устройстве 13 происходит вычисление непосредственно величины концентрации искомой газовой компоненты.

Система прокачки контролируемой газовой смеси через измерительную кювету 3 выполнена таким образом, что обеспечивает движение газовой смеси через кювету в направлении перпендикулярном оси распространения ультразвуковых импульсов от излучателя 8 к приемнику 9. Обеспечение взаимной ортогональности направления вектора движения прокачиваемой газовой смеси и вектора распространения акустических колебаний в измерительной кювете 3 необходимо для устранения влияния на время распространения ультразвукового колебания от излучателя 8 к приемнику 10 скорости движения прокачиваемой газовой смеси.

На рис. 4.29 приведен внешний вид дифференциальных измерительных кювет фототермоакустического газоанализатора с ортогональной (а) и сосной (б) схемой совмещения оптического и акустического лучей.

В заключении отметим, что в фототермоакустическом газоанализаторе может быть эффективно использовано одно из преимуществ термоакустического фотоприемника, вытекающее из принципа его работы, - протяженность чувствительного элемента, которым является газонаполненная кювета.



а)

б)

Рисунок 4.29 - Измерительная ячейка с ортогональной (а) и сосной (б) схемой совмещения оптического и акустического лучей

Эту протяженность можно сделать достаточно большой (до нескольких десятков сантиметров), соответственно такие же размеры может иметь и источник инфракрасного оптического излучения (например, нихромовая спираль, часто используемая в таких газоанализаторах). Поскольку чувствительность оптико-акустических газоанализаторов пропорциональна интенсивности источника инфракрасного излучения, которая в этом случае может быть повышена путем простого увеличения эффективной длины излучающей спирали, фототермоакустический газоанализатор имеет потенциальные преимущества и по этому параметру.

4.4 Оптические газоанализаторы

на основе эффекта спонтанного комбинационного рассеяния света

4.4.1 Физические основы применения эффекта СКР в задачах контроля состава многокомпонентных газовых сред

4.4.1.1 Эффект спонтанного комбинационного рассеяния заключается в способности молекулы газа рассеивать падающее на нее монохроматическое оптическое излучение с некоторым сдвигом частоты, причем если частота падающего излучения равна Ω_0 , частота рассеянного излучения равна Ω_i , то разность частот ($\Omega_0 - \Omega_i$) строго индивидуальна для каждого сорта молекул. На этом эффекте базируется метод СКР-газоанализа, основным достоинством которого является возможность одновременного детектирования всех молекулярных компонентов газовой среды с помощью одного лазера с фиксированной длиной волны излучения, при этом сигнал СКР любого молекулярного компонента строго индивидуален, пропорционален его концентрации, практически безынерционен и не зависит от состава газовой среды. Классическая теория комбинационного рассеяния света базируется на следующих физических положениях [73, 209]:

- молекулярное рассеяние света возникает вследствие вынужденных колебаний дипольного момента молекулы, индуцируемого полем падающей волны;
- свет рассеивается в основном электронной оболочкой молекулы, так как ядра молекулы под действием такого высокочастотного поля смещаются незначительно;
- комбинационное рассеяние света возникает вследствие того, что способность электронного облака молекулы деформироваться под действием электрического поля световой волны зависит от конфигурации ядер в данный момент времени. При колебаниях ядер около положения равновесия способность электронного облака деформироваться изменяется с частотой колебаний ядер.

Поэтому, комбинационное рассеяние света можно рассматривать как результат модуляции индуцированного дипольного момента молекулы колебаниями ядер.

Согласно классической теории [73, 209] поток энергии рассеянного излучения dI на комбинационных частотах $\nu \pm \nu_i$ в некотором направлении $\mathbf{n}$ (в телесном угле $d\Omega$), равен

$$dI = \frac{[\mathbf{n} \times \ddot{\mathbf{p}}]^2}{4\pi c^3} d\Omega = \frac{\overline{\ddot{\mathbf{p}}^2}}{4\pi c^3} \sin^2 \theta d\Omega, \quad (4.29)$$

где $\overline{\ddot{\mathbf{p}}^2}$ – усредненная по времени вторая производная дипольного момента, θ – угол между векторами $\mathbf{p}$ и $\mathbf{n}$. В данном случае

$$\begin{aligned} \overline{\ddot{\mathbf{p}}^2} &= 4\pi^4 (\nu \pm \nu_i)^4 \left(\frac{\partial \alpha}{\partial q_i} \right)_{q_i=0}^2 q_{i0}^2 E_0^2 \overline{\cos^2[2\pi(\nu \pm \nu_i)t \pm \delta]} = \\ &= 2\pi^4 (\nu \pm \nu_i)^4 \left(\frac{\partial \alpha}{\partial q_i} \right)_{q_i=0}^2 q_{i0}^2 E_0^2 \end{aligned} \quad (4.30)$$

$$dI = \frac{4\pi^4}{c^4} (\nu \pm \nu_i)^4 \left(\frac{\partial \alpha}{\partial q_i} \right)_{q=0}^2 q_{i0}^2 I_0 \sin^2 \theta d\Omega, \quad (4.31)$$

где

$$I_0 = \frac{c}{8\pi} E_0^2 \quad (4.32)$$

– интенсивность ($\text{эрг} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$) линейно поляризованного падающего излучения.

Выражение (4.34) дает поток энергии рассеянного излучения от одной молекулы. В случае рассеяния света на ансамбле одинаковых молекул выражение (4.32) должно быть умножено на N (N – число молекул в единице объема), поскольку рассеянное излучение от разных молекул некогерентно.

Таким образом, в рамках классической теории поток энергии рассеянного света пропорционален четвертой степени его частоты, интенсивности падающего излучения и концентрации рассеивающих молекул. Кроме того, необходимо подчеркнуть, что для появления рассеянного света с частотами $(\nu \pm \nu_i)$

необходимо, чтобы соответствующее колебание вызывало изменение поляризуемости молекулы.

В квантовой теории комбинационное рассеяние света – это процесс взаимодействия фотона $h\nu$ с молекулой, в котором между ними происходит обмен энергией [73, 209]. В результате такого взаимодействия появляется рассеянный фотон $h\nu'$, а молекула переходит с одного уровня энергии E_i на другой E_j (рис. 4.29). Разность частот падающего и рассеянного фотонов $\nu - \nu' = (E_j - E_i)/h$ определяется только структурой энергетических уровней молекулы и является ее индивидуальной характеристикой. Если в процессе взаимодействия молекула переходит из основного колебательного состояния в возбужденное, то рассеянный фотон $h\nu' = h\nu - h\nu_i$ ($h\nu_i$ – разность энергий основного и возбужденного колебательных состояний молекулы) и наблюдается стоксовое рассеяние. В противном случае, когда молекула переходит из возбужденного состояния в основное, рассеянный фотон $h\nu' = h\nu + h\nu_i$ и наблюдается антистоксовое рассеяние.

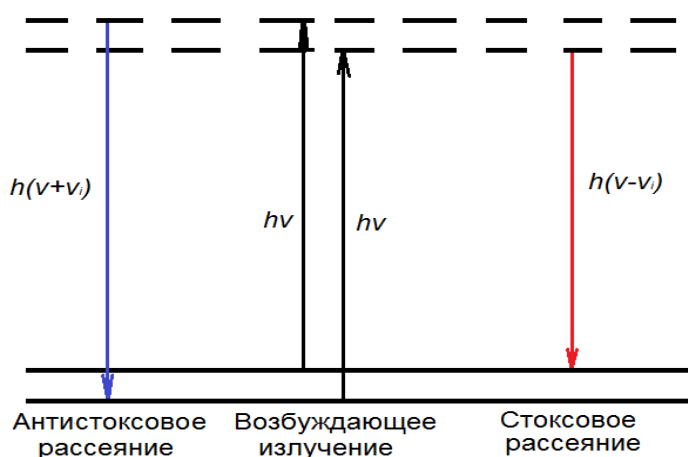


Рисунок 4.29 - Схема уровней энергии молекулы, иллюстрирующая спонтанное комбинационное рассеяние света

В случае многоатомных молекул (количество атомов в молекуле > 2) процесс рассеяния фотона на молекуле не однозначен: существует несколько каналов рассеяния фотона ($\nu \rightarrow \nu'$), которые определяются свойствами симметрии

рассеивающей молекулы. Совокупность всех каналов рассеяния (частоты $\nu - \nu'$) и вероятности их реализации формируют линейчатый спектр СКР данного молекулярного газа, который строго индивидуален для каждого сорта рассеивающих молекул.

В квантовой теории мощность рассеянного излучения из объема V в телесный угол $\Delta\Omega$ в направлении θ для отдельной колебательно-вращательной линии спектра СКР для молекул одного сорта может быть представлена в виде [73, 209]:

$$I_{\nu J \rightarrow \nu' J'}(\theta, T) = I_0 V N_{\nu J}(T) \sigma_{\nu J \rightarrow \nu' J'}(\theta) \Delta\Omega, \quad (4.33)$$

где ν, J и ν', J' – наборы колебательных и вращательных квантовых чисел начального и конечного состояния рассеивающей молекулы, θ – угол между направлением наблюдения и направлением колебания электрического вектора линейно поляризованного лазерного излучения, I_0 – интенсивность лазерного излучения, $N_{\nu J}(T)$ – концентрация молекул этого сорта в газовой среде, находящихся в состоянии с квантовыми числами ν и J , а T – температура газа. Дифференциальное сечение рассеяния $\sigma_{\nu J \rightarrow \nu' J'}(\theta)$ включает в себя инварианты тензора рассеяния с их угловыми функциями и зависимость от длины волны лазерного излучения. В условиях термодинамического равновесия газа $N_{\nu J}(T)$ описывается распределением Больцмана

$$N_{\nu J}(T) = N_0 f_{\nu J}(T), \quad 4.34$$

где N_0 – полная концентрация рассеивающих молекул данного сорта, а $f_{\nu J}(T)$ – нормированная функция распределения молекул по колебательно-вращательным состояниям с квантовыми числами ν и J .

Таким образом, и квантовая и классическая теории комбинационного рассеяния света показывают, что интенсивность отдельной колебательно-вращательной линии спектра СКР пропорциональна концентрации молекул данного сорта, интенсивности падающего излучения и не зависит от присутствия молекул другого сорта. В свою очередь набор данных линий спектра СКР строго индивидуален конкретному сорту молекул.

4.4.1.2 В настоящее время общепринятым методом измерения компонентного состава газовой среды методом СКР является использование дифференциальных сечений рассеяния для наиболее характерных полос в спектрах СКР различных молекул. Газовая среда представляет собой ансамбль практически свободно ориентирующихся молекул. В этих условиях каждая молекула газовой среды рассеивает лазерное излучение независимо от присутствия других молекул, причем рассеянное излучение от разных молекул некогерентное. Если при этом газовая среда является многокомпонентной смесью, то ее спектр СКР представляет собой сумму спектров СКР всех ее компонентов, причем вклад каждого компонента в суммарный спектр пропорционален его содержанию в газовой среде (см. рис. 4.30) [210]. С учетом этого интенсивность спектра СКР m -компонентной газовой смеси может быть представлена как

$$I^{cm}(\lambda, \theta, T) = \sum_{i=1}^m I_i(\lambda, \theta, T) = I_0 V \Delta \Omega \sum_{i=1}^m N_i \sigma_i^{\Pi}(\lambda, \theta, T) [1 + \rho_i(\lambda, \theta, T)], \quad (4.35)$$

где N_i – концентрация молекул i -го газа в смеси, а $\sigma_i^{\Pi}(\lambda, \theta, T)$ и $\rho_i(\lambda, \theta, T)$ – его эффективное дифференциальное сечение рассеяния и эффективная степень деполяризации сигнала СКР.

Одним из наиболее эффективных способов нахождения компонентного состава газовой смеси является разложение спектра СКР этой смеси по спектрам СКР ее отдельных компонентов (см. рис. 4.30). Сущность этого метода заключается в подгонке синтезированного спектра СКР газовой смеси, построенной из спектров СКР ее отдельных компонентов, к измеренному спектру СКР газовой смеси [214].

Для использования данной методики необходимо чтобы спектры эталонных газов и спектр газовой смеси были зарегистрированы при одной и той же настройке прибора.

В общем случае, поскольку давление газов при регистрации спектров СКР эталонных (отдельных) компонентов значительно превышает атмосферное,

необходимо учесть поправки на неидельность, обусловленные их сжимаемостью, при переходе от измеряемого давления газов к их концентрациям.

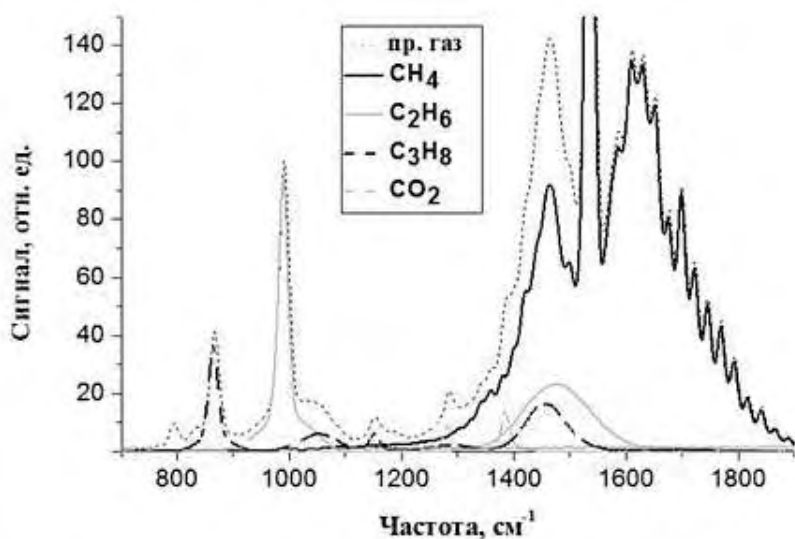


Рисунок 4.30 - Вклады спектров СКР отдельных компонентов природного газа в его спектр

4.4.2 Технические аспекты реализации метода СКР в газоанализаторах для контроля загрязнения приземной атмосферы

4.4.2.1 Регистрация спектра СКР представляет собой следующий технологический процесс:

- а) монохроматическое излучение от непрерывного лазера направляется в кювету, наполненную анализируемой газовой средой;
- б) внутри кюветы за счет взаимодействия с молекулами газа происходит спонтанное комбинационное рассеяние света;
- в) рассеянный свет под углом 90 градусов к оси лазерного луча собирается объективом и направляется на вход спектрального прибора;
- г) спектральный прибор разлагает данное излучение в спектр, который регистрируется многоканальным фотоприемником;

д) зарегистрированный спектр СКР оцифровывается и передается на персональный компьютер для его дальнейшей обработки согласно применяемым алгоритмам.

Атмосферный воздух представляет собой сложную многокомпонентную газовую смесь, состоящую как из основных компонентов атмосферы (азот, кислород, аргон, углекислый газ и пары воды), так и из более мелких примесей, образующихся в результате природных процессов или человеческой деятельности. К таковым примесям, присутствие которых в воздухе опасно для жизнедеятельности человека, в первую очередь, можно отнести оксид и диоксид углерода, оксид и диоксид азота, метан, метанол, диоксид серы, аммиак, сероводород формальдегид, бензол, толуол и пр. Спектры СКР всех этих компонентов исследованы в лабораторных условиях. Комбинационные частоты наиболее интенсивных линий и их относительные нормированные дифференциальные сечения рассеяния Σ для основных атмосферных компонентов приведены в табл. 4.7 [210].

Анализ приведенных в таблице данных показывает, что все основные и примесные компоненты атмосферы располагаются в диапазоне частот 0-4200 см^{-1} , что при возбуждении лазером с длиной волны 532 нм эквивалентно спектральному интервалу 532-680 нм. Данный диапазон может быть одновременно охвачен специализированным спектральным прибором и таким образом все требуемые компоненты могут быть одновременно определены. При этом необходимо отметить, что полосы СКР компонентов атмосферы расположены достаточно далеко друг от друга (не менее 30 см^{-1}), что значительно облегчает задачу их идентификации.

Возможный перечень измеряемых газовых загрязнений атмосферы не ограничивается компонентами, приведенными в табл. 4.7. Этот перечень может постоянно расширяться путем занесения в банк данных прибора значений сечений рассеяния и комбинационных частот рассеянного излучения новых газов.

Таблица 4.7 - Комбинационные частоты (ν) и относительные нормированные дифференциальные сечения рассеяния (Σ) основных атмосферных компонентов

Компонент	ν (см ⁻¹)	Σ
Азот	2331	1
Кислород	1555	1
Водород	4156	3.9
Оксид углерода	2143	0.9
Пары воды	3652	3
Углекислый газ	1388	1.1
	1285	0.8
Метан	2917	8.6
	1535	0.1
Оксид углерода	2143	0.8
Оксид азота	1877	0.3
Диоксид азота	1320	13
Метанол	2846	5
Диоксид серы	1151	4
Аммиак	3334	6.1
Формальдегид	3121	>1
Сероводород	2611	6.8
Бензол	3070	14
Толуол	1003	>1

Единственным ограничением газоанализатора, разрабатываемого на основе метода СКР, является то, что он позволяет регистрировать только молекулярные газовые компоненты атмосферы. Все инертные газы являются атомарными, не имеют колебательных частот в своем спектре, и поэтому не могут регистрироваться с помощью данного метода.

4.4.2.2 Главным недостатком метода СКР-газоанализа, препятствующим его широкому применению, является чрезвычайно низкий уровень рассеянного молекулами среды оптического сигнала (например, сечение рассеяния молекулы азота (Q-ветвь колебательно-вращательной полосы) составляет величину порядка 10^{-48} см⁶ср⁻¹). Основной технической проблемой, которую необходимо решить при создании СКР-газоанализатора, является повышение интенсивности сигнала СКР и увеличение отношения сигнал/шум в приемном тракте прибора.

Для оценки возможности достижения чувствительности измерений, необходимой для контроля загрязнений воздуха (порядка 50-100 ppb по требуемым химическим компонентам), был разработан и изготовлен макет СКР-газоанализатора (рис. 4.31) [211].

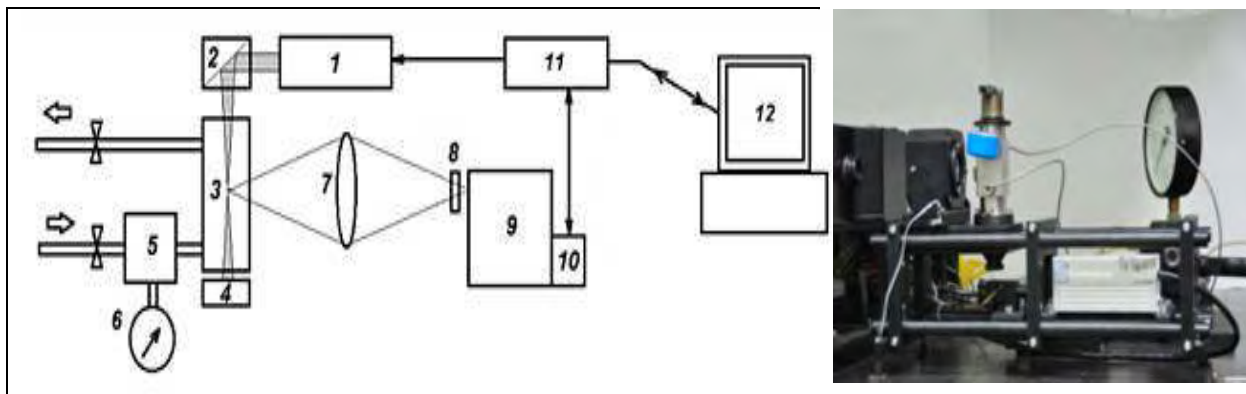


Рисунок 4.31 - Структурная схема и внешний вид макета СКР-газоанализатора: 1 – малогабаритный DPSS-лазер (1 Вт, $\lambda = 532$ нм); 2 – фокусирующая оптическая система; 3 – газовая кювета высокого давления; 4 – ловушка лазерного излучения; 5 – пневматическая помпа; 6 – манометр; 7 – объектив, 8 – светофильтр; 9 – спектральный прибор; 10 – ПЗС-матрица Hamamatsu S10141; 11 – блок управления; 12 – компьютер

Источником (1) возбуждающего линейно поляризованного излучения служит малогабаритный твердотельный лазер мощностью 1 Вт, работающий в непрерывном режиме в видимом диапазоне длин волн. С помощью оптической системы (2), состоящей из поворотной призмы и фокусирующей линзы, лазерный луч направляется параллельно входной щели монохроматора и фокусируется в центре кюветы с исследуемым газом. Кювета (3) представляет собой полый металлический цилиндр с окнами для ввода и вывода лазерного луча, а также перпендикулярно расположенным к ним окном для вывода рассеянного света. Кювета снабжена патрубками для ввода и вывода исследуемого газа. Давление исследуемого газа в кювете может достигать 40 атмосфер. Прошедшее кювету лазерное излучение возвращается в кювету сферическим зеркалом (4), служащим для увеличения эффективности его использования. Рассеянный свет из кюветы собирается светосильным объективом Canon EF 50mm f/1.8 II (7),

обеспечивающим угол сбора до 0,6 ср и через светофильтр (8) фокусируется на входную щель монохроматора МДР-12 (9). Система регистрации спектров СКР (10) выполнена на основе ПЗС-матрицы с охлаждением Пельтье до минус 10 °С. Блок управления (11) обеспечивает связь с внешним компьютером (12). Повышенное давление анализируемого воздуха в кювете (3) создается ручной пневматической помпой (5) и контролируется прецизионным манометром (4).

4.2.2.3 Разработанный макет СКР-газоанализатора предназначался для проведение экспериментальных исследований, целью которых было определение фактической пороговой чувствительности газоанализатора и выработки технических решений по ее увеличению.

Для этого на макете были проведены экспериментальные исследования по получению СКР-спектра метана и определению его концентрации в воздухе (контролируемая концентрация метана искусственно создавалась в измерительной кювете) (рис. 4.32) [212].

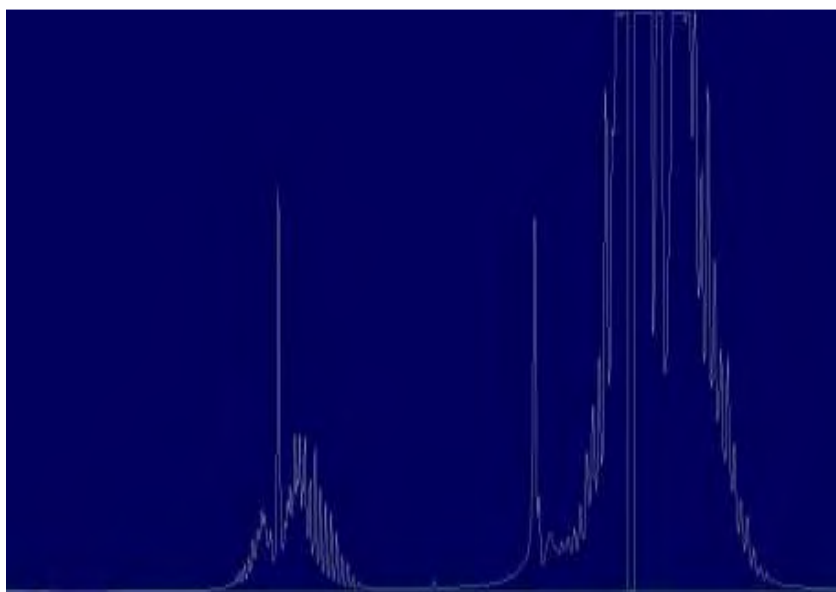


Рисунок 4.32 - Спектр метана, полученный на макете СКР-газоанализатора

Экспериментально полученная величина пороговой чувствительности устройства к метану (дифференциальное сечение $\sigma \sim 8$) составила около 1 ppm. На основании этого были проведены оценки технических параметров блоков СКР-газоанализатора, необходимых для достижения чувствительности ~ 50 -100 ppb

(оценка проводилась для оксида азота, имеющего минимальное дифференциальное сечение σ ($\sigma = 0.4$)).

Для повышения чувствительности газоанализа используется увеличение концентрации молекул в рассеивающем объеме, осуществляемое путем сжатия исследуемой газовой среды. Однако такой способ повышения чувствительности газоанализатора требует предварительного изучения концентрационных эффектов в спектрах СКР плотных газовых сред. Это связано с тем, что такие параметры СКР как частоты колебательных полос ($\omega - \omega'$) и их дифференциальные сечения рассеяния $\sigma_a(\omega \rightarrow \omega')$ для молекул газовой смеси уже не являются чисто молекулярным константами, а зависят от плотности окружающих молекул.

В таблице 4.8 приведены параметры макета, на котором проводились измерения и планируемые (технически достижимые) параметры экспериментального образца СКР-газоанализатора.

Таблица 4.8 - Параметры СКР-газоанализатора.

Параметр	Макет СКР-газоанализатора	Экспериментальный образец СКР-газоанализатора
Мощность лазерного источника	1 Вт	10 Вт
Давление в измерительной кювете	40 атм	100 атм
Количество проходов зондирующего луча в оптической системе	1	20
Дифференциальное сечение рассеяния σ	8 (метан)	0.4 (азот)
Телесный угол сбора рассеянного излучения	Ω (const)	Ω (const)

4.4.2.4 На основании результатов проведенных экспериментальных исследований метода СКР-газоанализа удалось сформулировать требования к основным блокам газоанализатора, необходимые для практического осуществления анализа состава атмосферного воздуха:

- 1) источник зондирующего оптического излучения должен иметь высокую выходную мощность излучения (5 – 10 Вт) в видимом оптическом диапазоне, узкую полосу генерации (не более 0,1 нм) и стабильность длины волны генерации (не хуже 0,05 нм), при этом лазер должен работать в непрерывном режиме, обладать высокой степенью надежности (наработка на отказ не менее 5 тысяч часов), иметь небольшие размеры и низкое энергопотребление и быть коммерчески доступным;
- 2) газовая кювета должна иметь оптические окна для ввода и вывода лазерного луча, перпендикулярно расположенное к их оптической оси окно для вывода рассеянного света, а также патрубки для ввода и вывода анализируемого газа; кювета должна быть изготовлена из химически стойких материалов и выдерживать высокое давление (не менее 100 атмосфер);
- 3) оптическая система сбора рассеянного излучения должна иметь максимальный угол сбора и обеспечивать высококачественную передачу изображения рассеивающего объема на входную щель спектрального прибора;
- 4) спектральный прибор должен работать в спектральном диапазоне не менее 532-680 нм и иметь разрешение не хуже $1 \div 5 \text{ см}^{-2}$, обладать высокой светосилой и низким уровнем рассеянного света;
- 5) система регистрации спектров должна иметь способность регистрировать весь спектр СКР анализируемого газа одновременно (многоканальная система), обладать высокой чувствительностью и низким уровнем шумов;

В соответствии с этим для реализации экспериментального образца СКР-газоанализатора были предложены следующие технические решения:

- в качестве источника оптического излучения использован непрерывный твердотельный лазер с диодной накачкой KLM-532/h ($P=10 \text{ Вт}$, $\lambda=532 \text{ нм}$);
- разработана специальная оптическая система (рис. 4.33) [26], обеспечивающая многократный проход зондирующего излучения через измерительную кювету;
- разработана специальная оптическая система (рис. 4.34) [27], обеспечивающая угол сбора рассеянного газовыми молекулами излучения близкий к 4π стерадиан;

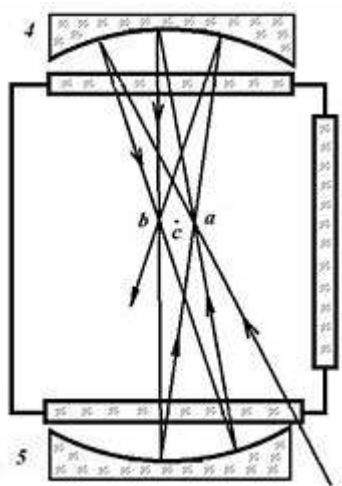


Рисунок 4.33 -

Измерительная кювета с многопроходной оптической системой (7 проходов через точки а и б): 4, 5 – сферические зеркала.

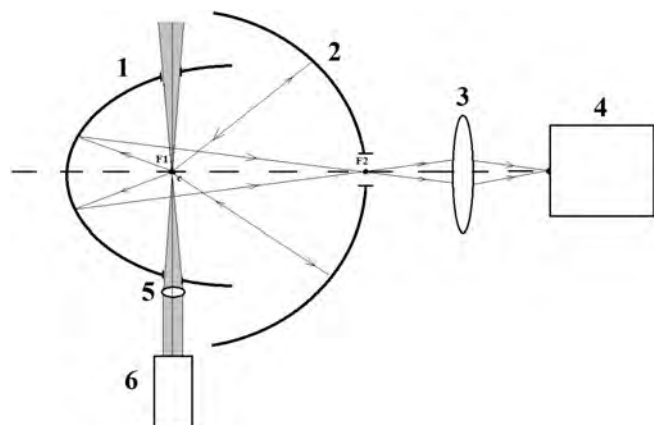


Рисунок 4.34 - Схема оптической

системы для эффективного сбора рассеянного излучения: 1 – эллиптическое зеркало, 2 – сферическое зеркало, 3 – фотообъектив, 4 – спектральный прибор, 5 – фокусирующая линза, 6 – лазер

- использован способ увеличения концентрации молекул в рассеивающем объеме за счет повышения давления в кювете с исследуемым воздухом до 80 – 100 атм;
- в качестве спектрального прибора использован специально разработанный в ИМКЭС СО РАН светосильный дифракционный спектрометр, оптимально согласованный с фотоприемной матрицей и имеющий обратную линейную дисперсию порядка 80 Å/мм в спектральном диапазоне 532-685 нм [213];
- в качестве многоканального фотоприемника для регистрации спектра СКР использована охлаждаемая ПЗС-матрица Hamamatsu S10141 с функцией вертикального биннинга, имеющая размер чувствительного элемента (пикселя) не превышающий 15 мкм;
- для обработки аналогового сигнала, снимаемого с ПЗС-матрицы с частотой 15 кГц, использован прецизионный усилитель OPT101 с 10-ти разрядным АЦП микроконтроллера Atmega128.

4.4.3 Экспериментальный образец СКР-газоанализатора

4.4.3.1 Разработанный СКР-газоанализатор предназначен для определения наличия в составе воздуха АПС концентраций загрязняющих газовых компонентов: оксида углерода, диоксида углерода, оксида азота, диоксида азота, метана, метанола, диоксида серы, аммиака, формальдегида, бензола и толуола с чувствительностью не менее 1 ПДК. Он, так же, может быть использован для определения состава природного газа [24] и функционировать в составе мобильного измерительного комплекса информационно вычислительной системы для мониторинга состояния АПС (см. главу 5 настоящей работы).

На рис. 4.35 представлена функциональная схема газоанализатора СКР/м.

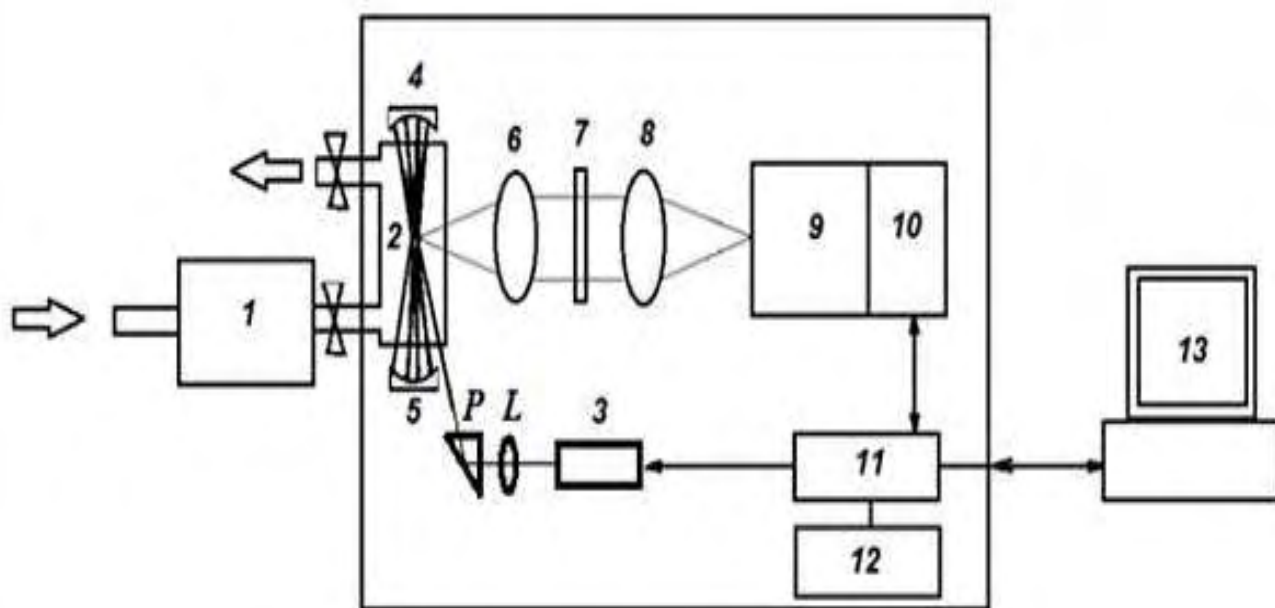


Рисунок 4.35 - Функциональная схема СКР/м: 1 – устройство пробоподготовки; 2 – газовая кювета; 3 – лазер; 4, 5 – сферические зеркала; 6, 8 – объективы; 7 – светофильтр; 9 – монохроматор; 10 – ПЗС-матрица; 11 – блок управления; 12 – блок питания; 13 – компьютер

Газоанализатор работает следующим образом. Анализируемый воздух, с помощью устройства для пробоподготовки (1), поступает в газовую кювету (2),

где сжимается до давления 100 атм. Возбуждение спектра СКР, поступившего в кювету газа, осуществляется малогабаритным твердотельным лазером с диодной накачкой (3), генерирующим непрерывное линейно поляризованное излучение с мощностью до 10 Вт на длине волны $\lambda = 532$ нм. Лазерное излучение с помощью поворотной призмы (P) и фокусирующей линзы (L) направляется внутрь кюветы. Около торцов кюветы, имеющих стеклянные окна для входа и выхода лазерного излучения, установлена оптическая многопроходная система, увеличивающая интенсивность сигнала СКР. Рассеянное молекулами газовой смеси излучение (СКР и рэлеевское) из центральной части кюветы через ее третье окно собирается светосильным объективом (6) и формируется в параллельный пучок света, который сначала проходит через голографический светофильтр (7), ослабляющий рэлеевское излучение на 6 порядков, а затем попадает на объектив (8), который фокусирует СКР излучение на входную щель монохроматора (9). Используемый монохроматор является специальным спектральным прибором и раскладывает СКР излучение в спектр, который регистрируется охлаждаемой элементами Пельтье до минус 10 °С ПЗС-матрицей (10), которая, в свою очередь, работает, за счет применения вертикального биннинга, в режиме ПЗС-линейки. При этом спектральный прибор обеспечивает согласование вертикального размера своей входной щели с высотой матрицы [214]. Сигналы с ПЗС-матрицы поступают в блок управления (11), который построен на основе микроконтроллера Atmega128. Блок управления также осуществляет генерацию управляющих сигналов для ПЗС-матрицы, проводит включение и выключение лазера, а также обеспечивает связь с внешним компьютером – ноутбуком (13). Питание блока управления осуществляется через блок питания (12). В ноутбук заносятся значения эталонных спектров контролируемых газов, а на его мониторе изображается развертка спектра исследуемой газовой смеси.

С учетом времени накопления регистрируемых сигналов СКР весь процесс измерения концентрации газовых компонентов занимает около 15 минут.

Конструктивные особенности разработанного СКР-газоанализатора обеспечивают возможность эксплуатации прибора как в лабораторных условиях, так и в составе мобильного измерительного комплекса (рис. 4.36) [215].

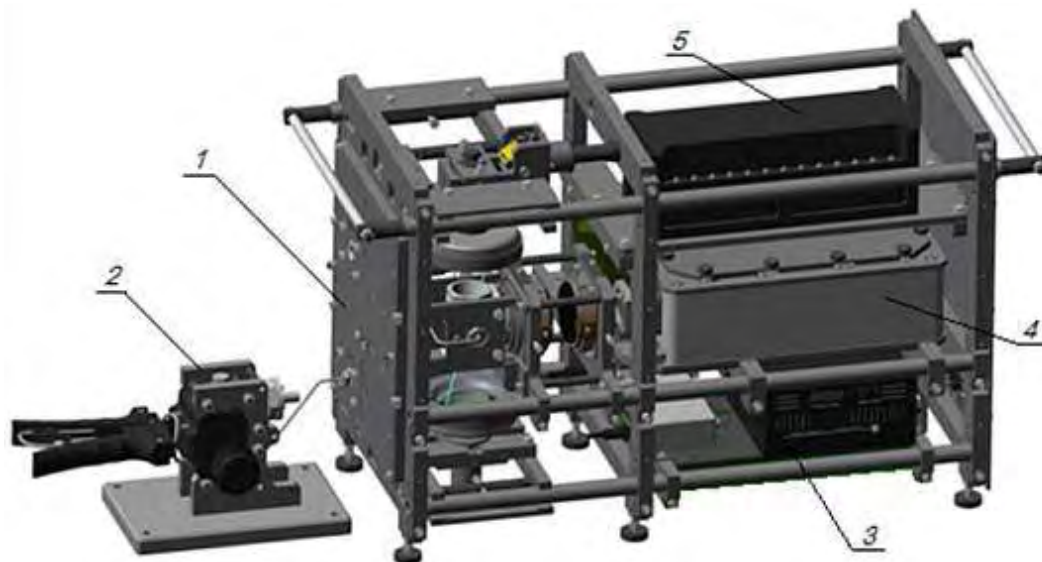


Рисунок 4.36 - Внешний вид газоанализатора СКР/м (без внешних стенок):

1 – несущий каркас; 2 – устройство пробоподготовки (помпа высокого давления); 3, 4, 5 – субблоки нижнего, среднего и верхнего уровней

Каркасная конструкция газоанализатора имеет три уровня. На первом (нижнем) уровне размещены блок питания и блок управления, а также помпа высокого давления устройства пробоподготовки (в отдельном модуле) (рис. 4.37,б).

На среднем уровне размещены спектрометр с ПЗС-матрицей, а также многопроходная оптическая система, объектив для сбора рассеянного света (рис. 4.38,а), светофильтр и газовая кювета. Газовая кювета выполнена в виде полого металлического цилиндра объемом $\sim 10 \text{ см}^3$ с окнами для проходов лазерного луча, а также окном для вывода рассеянного излучения. Кювета устойчива к агрессивным газам и рассчитана на давление анализируемого газа до 100 атм (рис. 4.37,в).

На верхнем уровне расположен лазер с фокусирующей линзой и призмой. Для повышения жесткости всей конструкции каркас газоанализатора состоит из

трех вертикальных плоских пластин соединенных между собой шестью полыми трубками. Каждая горизонтальная пара трубок задает один из трех уровней общего каркаса. Опорные площадки всей конструкции закреплены в торцах вертикальных плоскостей.

Питание источника вторичного питания газоанализатора, блока питания лазера, ПЭВМ осуществляется от сети 220В, 50 Гц через сетевые фильтры. В кювету компрессором, через клапан давления, накачивается анализируемый газ до давлений 100 кГ/см².



а)



б)



в)

Рисунок 4.37 - Конструкция блоков СКР-газоанализатора: *а* – лазер, блок питания и блок управления; *б* – помпа высокого давления устройства пробоподготовки; *в* – газовая кювета высокого давления



а)



б)

Рисунок 4.38 - Конструкция блоков СКР-газоанализатора: *а* – спектрометр СКР-газоанализатора (расположение оптических элементов и внешний вид),
б – многопроходная оптическая система и объектив для сбора рассеянного света

Управление работой впускного и выпускного клапана осуществляется контроллером через устройство управления, по сигналам датчика давления ДМП 333 в магистрали газового поста.

Через систему подготовки пробы (1), состоящей из компрессора, фильтра механических частиц (чистота 0,45 мкм) и впускного клапана, анализируемая воздушная смесь накачивается в кювету (3) до нужного давления ($P_{\max} = 100$ кГ/см²). Контроль давления осуществляется датчиком давления ВР1. После этого, проводится цикл измерений, по окончании которых через выпускной клапан производится сброс анализируемого газа из кюветы.

Для изготовления СКР-газоанализатора под руководством автора разработан комплект эскизной конструкторской документации АМЯ2.840.004, по которому в ООО «Сибаналитприбор» изготовлен экспериментальный образец прибора. СКР-газоанализатор использован в составе автоматизированной информационно-вычислительной системы, предназначенной для мезомасштабного метеорологического и экологического контроля состояния АПС (см. главу 5 настоящей работы).

4.4.4 Метрологическое обеспечение и результаты испытаний СКР-газоанализатора

4.4.4.1 В целях метрологического обеспечения экспериментального образца СКР-газоанализатора разработана «Программа и методика лабораторных испытаний АМЯ 2.840.004 ПМ».

Технология процессов калибровки и метрологических испытаний СКР-газоанализатора обеспечивается с помощью специально разработанного многокомпонентного газового поста DFG2.779.000 (рис. 4.39, табл. 4.9).

Многокомпонентный газовый пост обеспечивает наполнение измерительной кюветы СКР-газоанализатора эталонными газовыми смесями с требуемыми давлениями.

Для калибровки СКР-газоанализатора используются следующие газовые смеси:

оксид углерода (CO) (1 %) + диоксид азота (NO₂) (1 %) + азот (N₂);
 смесь (NO + SO₂) + азот (N₂) повышенной чистоты, сорт 1;
 аммиак (NH₃) (1 %) + азот (N₂);
 формальдегид (CH₂O) + азот (N₂);
 бензол (C₆H₆) + азот (N₂);
 метилбензол (толуол) (C₆H₅CH₃) + азот (N₂);
 двуокись углерода газообразная (CO₂) (1%) + азот (N₂) повышенной
 чистоты, сорт 1;
 метан (1 %) + азот (N₂) повышенной чистоты, сорт 1;
 метанол (CH₃OH) (1 %) + азот (N₂) повышенной чистоты, сорт 1.

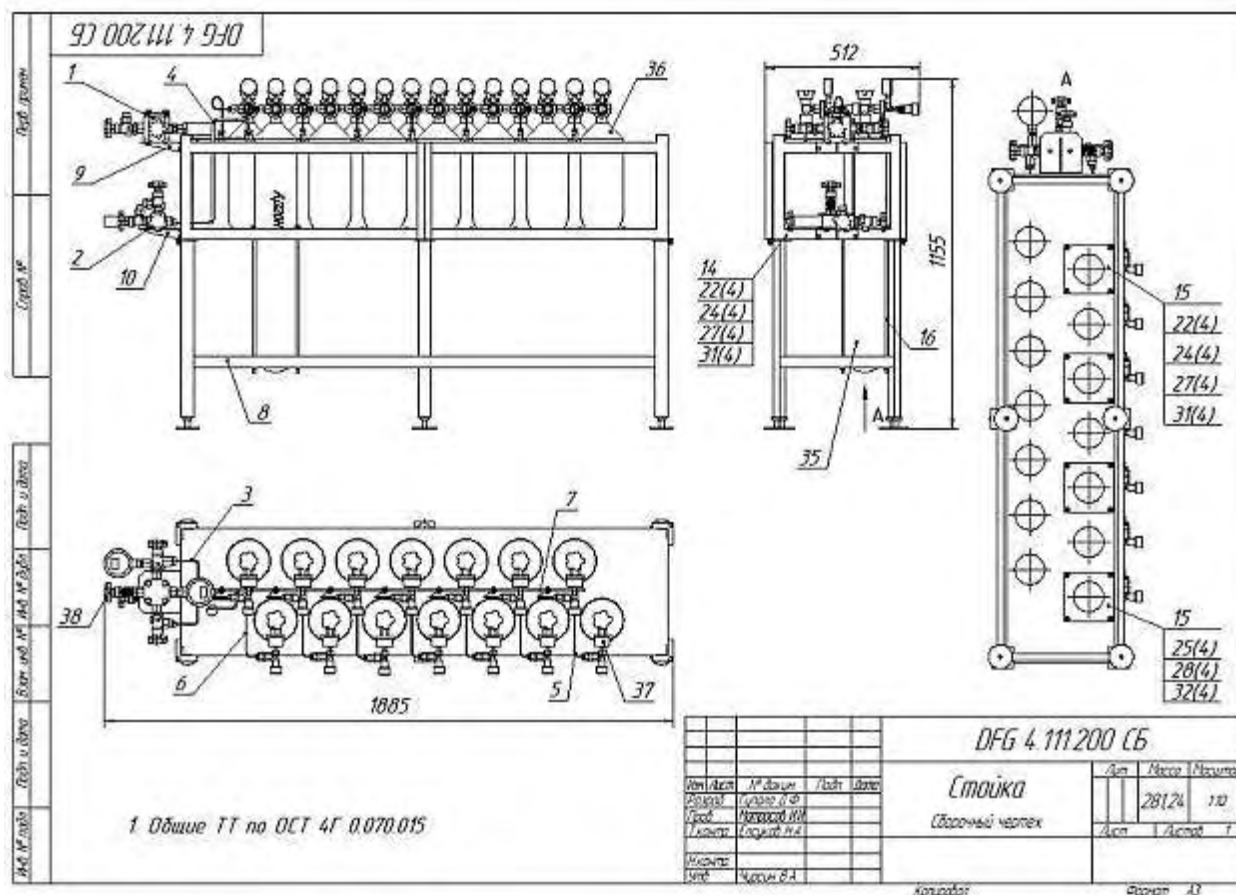
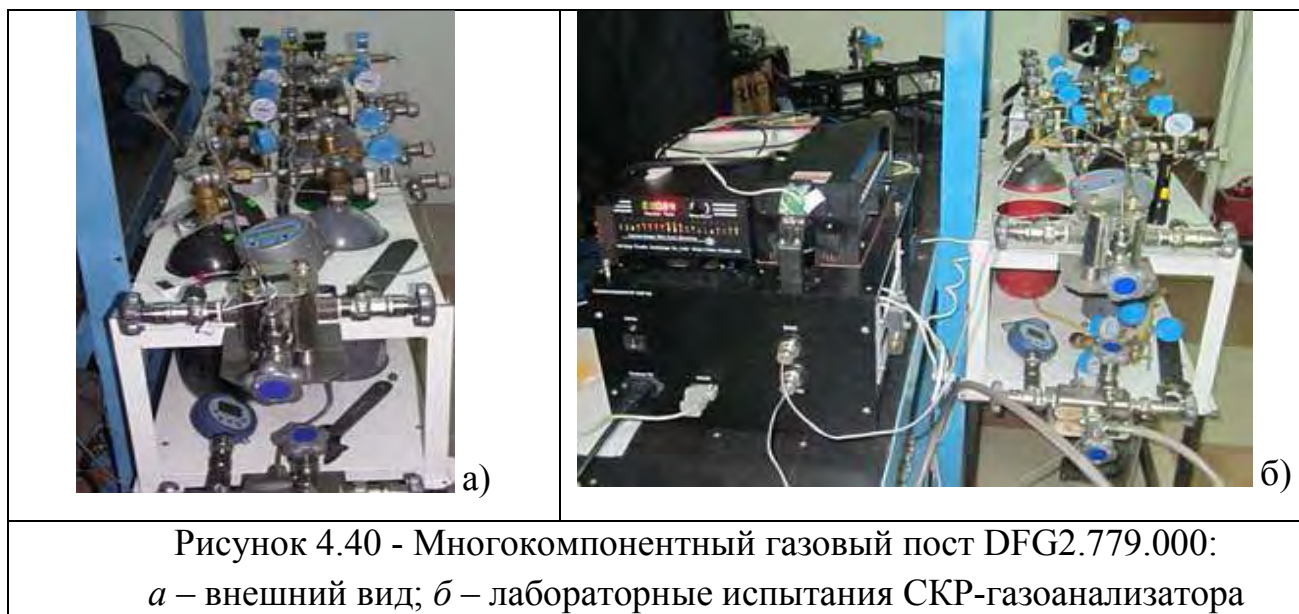


Рисунок 4.39 - Многокомпонентный газовый пост DFG2.779.000.

Сборочный чертеж

Таблица 4.9 - Технические характеристики МГП

Техническая характеристика	Значение
Погрешность состава формируемой газовой смеси, %	не хуже 0,015
Минимальное давление в смесительной камере, мм.рт.ст	не более 0,1
Максимальное давление в газовой магистрали, атм	150
Количество газовых баллонов в составе МГП	не менее 15



4.4.4.2 Для апробации разработанных методов и технологий газоанализа проведены натурные испытания СКР-газоанализатора в ходе которых выполнялись измерения состава атмосферного воздуха и других газовых смесей (биогаз, природный газ) [216].

На рис. 4.41 приведен зарегистрированный спектр СКР атмосферного воздуха. Регистрация спектра проводилась при давлении воздуха в кювете 6 атмосфер. В полученном спектре (рис. 4.41,*а*) отчетливо видны колебательные полосы основных компонентов воздуха: кислорода, азота и паров воды с частотами, соответственно, 1555 см^{-1} , 2331 см^{-1} и 3652 см^{-1} . На рис. 4.41, *б* приведен фрагмент этого же спектра в другом масштабе. Хорошо видно, что колебательные полосы азота и кислорода имеют сложную структуру: кроме интенсивной центральной полосы (Q-ветвь) наблюдаются две слабые полосы (Q - и S-ветви), расположенные с обеих сторон от центральной полосы. Причем на Q -

ветви колебательной полосы молекулы азота наблюдается слабая Q-ветвь с частотой 2291 см^{-1} изотопной разновидности молекулы азота $^{15}\text{N}^{14}\text{N}$. Кроме того, на этом рисунке отчетливо видны Q-ветви колебательных полос CO_2 с частотами 1285 см^{-1} и 1388 см^{-1} , интенсивности которых почти на порядок превышают величину флуктуаций шумовой дорожки в спектре. Поскольку концентрация углекислого газа в воздухе составляет около 0,04 %, можно утверждать, что данный экспериментальный образец СКР-газоанализатора регистрирует все молекулярные компоненты воздуха, содержание которых превышает 0,01 %.

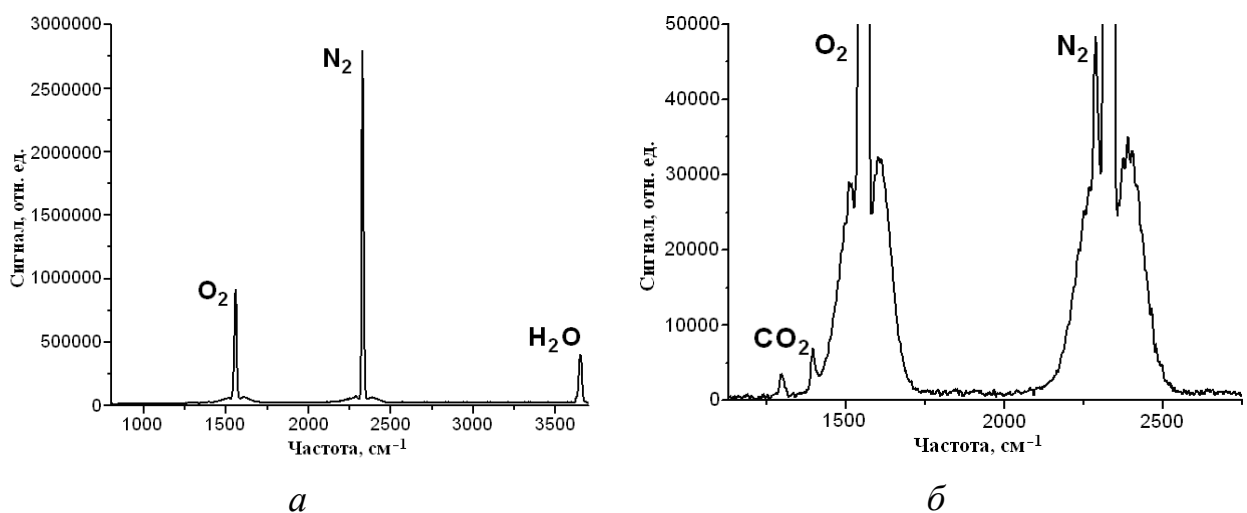


Рисунок 4.41 - Спектр СКР комнатного воздуха

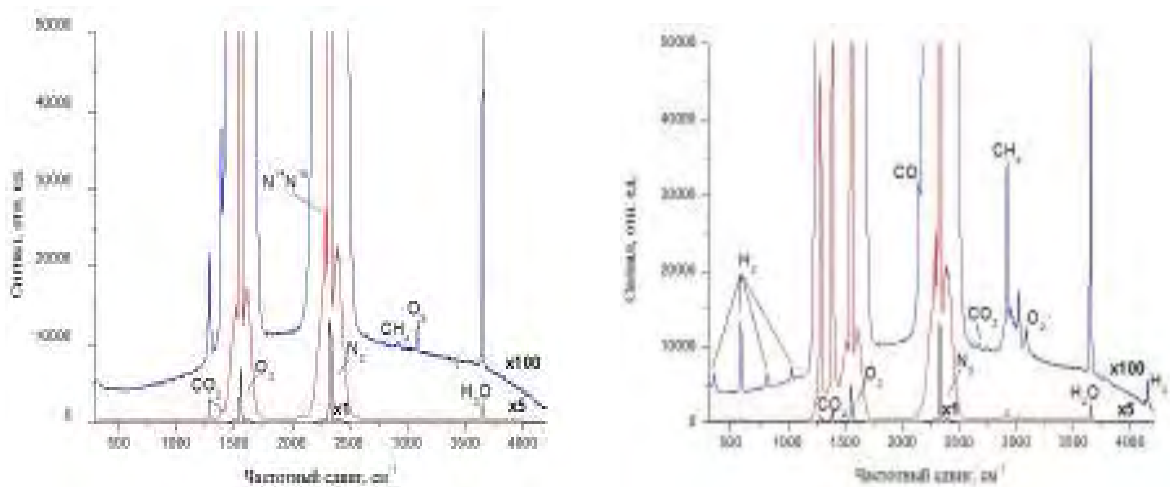


Рисунок 4.42 - Анализ загрязнений воздуха в лабораторном помещении

Для проверки возможностей СКР-газоанализатора в задачах экологического контроля был проведен анализ в чистого воздуха и воздуха, загрязненного в результате курения (измерения выполнялись последовательно в одном и том же лабораторном помещении) (рис. 4.42). При измерениях использовался метод концентрирования пробы воздуха в измерительной кювете (давление – 40 атм), длительность экспозиции (накопления полезного сигнала на ПЗС-матрице) – 1000 с. На спектре видно существенное повышение концентрации в воздухе угарного газа (CO), углекислого газа (CO₂) и метана (CH₄).

Газовой смесью более сложного состава является биогаз, являющийся продуктом метанового брожения биомассы. Зарегистрированный спектр СКР биогаза при давлении 1 атм приведен на рис. 4.43.

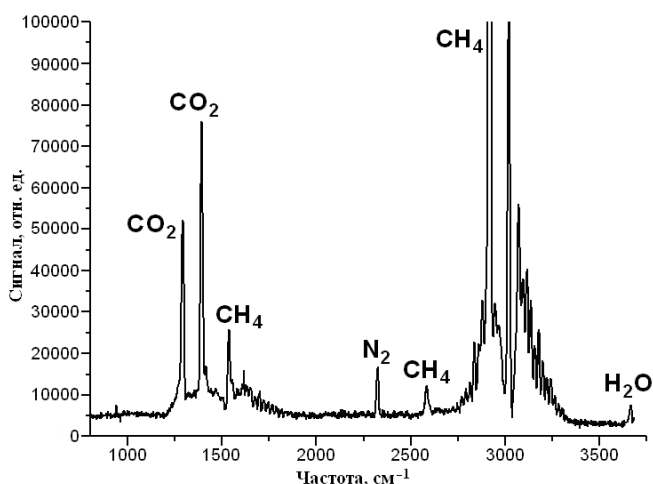


Рисунок 4.43 - Спектр СКР биогаза.

Спектр содержит как описанные выше колебательные полосы молекул углекислого газа, метана, азота и паров воды, так и основную наиболее интенсивную полосу метана, расположенную в области 2750–3300 см⁻¹. Содержание зарегистрированных компонентов биогаза было рассчитано на основании соотношения (1), при этом необходимые значения дифференциальных сечений рассеяния были взяты из [210]. Расчет показал, что данный биогаз содержит 68 % метана, 25 % углекислого газа, 6 % азота и 1 % паров воды.

Для проверки возможности использования СКР-газоанализатора в качестве прибора контроля состава природного газа в автоматизированных системах управления технологическими процессами проведены измерения газовых проб, взятых из магистрального газопровода [214].

Спектр СКР природного газа зарегистрированный газоанализатором приведен на рисунке 4.44 (давление в кювете 30 атмосфер).

Центральную часть на полученном спектре ($\sim 1300\text{--}1900\text{ см}^{-1}$) занимает колебательная полоса молекулы метана CH_4 , имеющая сложную структуру. Молекуле метана также принадлежит и колебательная полоса с частотой 2568 см^{-1} .

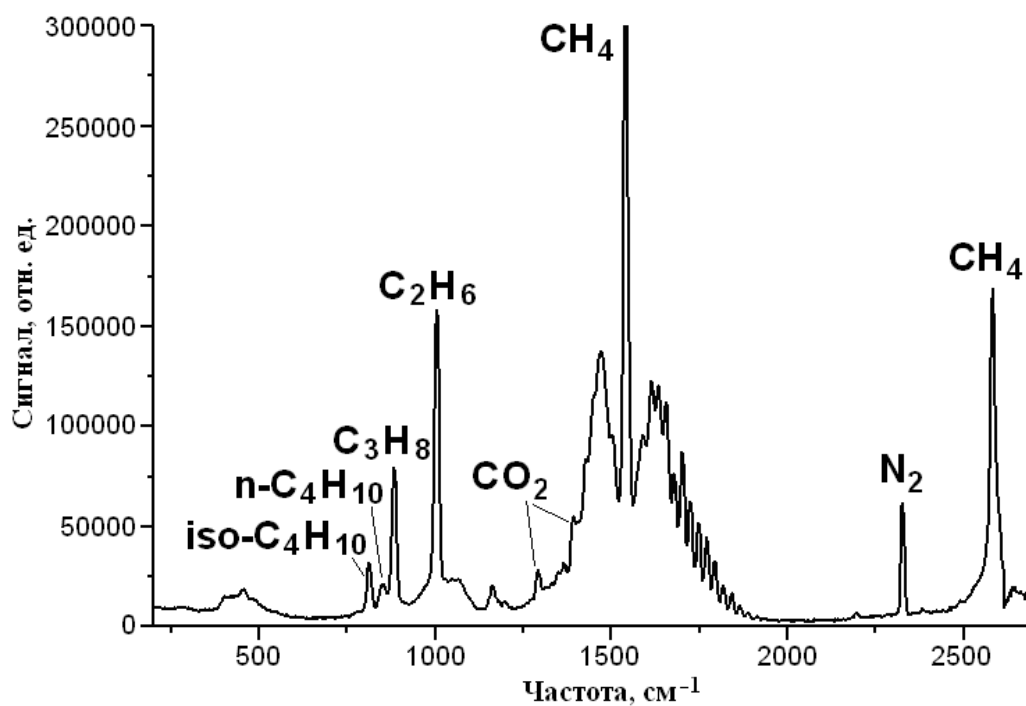


Рисунок 4.44 - Спектр СКР природного газа.

В области малых комбинационных частот расположены колебательные полосы более тяжелых углеводородных компонентов природного газа: этана (C_2H_6), пропана (C_3H_8), н-бутана ($\text{n-C}_4\text{H}_{10}$) и изо-бутана ($\text{iso-C}_4\text{H}_{10}$) с частотами, соответственно, 993 см^{-1} , 870 см^{-1} , 827 см^{-1} и 794 см^{-1} . В спектре СКР природного газа видны также колебательные полосы углекислого газа (1285 см^{-1} и 1388 см^{-1}) и азота (2331 см^{-1}). Обращает на себя внимание, что, несмотря на сложный вид

спектра СКР природного газа, полосы его отдельных компонентов вполне выделяемы и могут быть пригодны для газоанализа.

Количественный анализ компонентного состава пробы велся по девяти основным компонентам природного газа: метана, этана, пропана, *n*-бутана, изобутана, *n*-пентана, изопентана, азота и углекислого газа, кроме того определялась концентрация паров воды (эталонные спектры всех этих газов предварительно были получены и внесены в банк данных СКР-газоанализатора). Одновременно в испытательной лаборатории ООО «Газпром Трансгаз Томск» на штатном хроматографе «Кристалл-2000М» были проведены референтные измерения этих же проб природного газа. Результаты сравнительного анализа приведены в таблице 4.10. [215].

Таблица 4.10 - Результаты анализа природного газа

Компонент	СКР-газоанализатор %	Хроматограф «Кристалл-2000М», %
Метан, CH ₄	92,311 ± 0,108	92,26 ± 0,15
Этан, C ₂ H ₆	3,550 ± 0,069	3,45 ± 0,14
Пропан, C ₃ H ₈	1,145 ± 0,042	1,26 ± 0,08
<i>n</i> -Бутан, <i>n</i> -C ₄ H ₁₀	0,171 ± 0,009	0,224 ± 0,014
изо-Бутан, iso-C ₄ H ₁₀	0,178 ± 0,006	0,192 ± 0,012
<i>n</i> -Пентан, <i>n</i> -C ₅ H ₁₂	0,053 ± 0,009	0,040 ± 0,003
изо-Пентан, iso-C ₅ H ₁₂	0,039 ± 0,007	0,047 ± 0,003
Азот, N ₂	1,961 ± 0,032	1,95 ± 0,08
Углекислый газ, CO ₂	0,569 ± 0,012	0,54 ± 0,03
Кислород, O ₂	—	0,008 ± 0,002
Водород, H ₂	—	0,004 ± 0,001
Гелий, He	—	0,018 ± 0,002
Высшие углеводороды	—	0,023 ± 0,002
Пары воды, H ₂ O	0,023 ± 0,005	—

Проведенные исследования показали, что результаты анализа, выполненные двумя различными методами, хорошо согласуются между собой. Созданный экспериментальный образец СКР-газоанализатора способен надежно и с достаточной точностью регистрировать все молекулярные составляющие

природного газа, содержание которых превышает 0,01% (в том числе содержание паров воды, которые не регистрируются хроматографом) [217].

4.2.4.4 С целью определения возможности использования метода спонтанного комбинационного рассеяния света для контроля технологических процессов были проведены исследования метрологических характеристик экспериментального образца СКР-газоанализатора по определению компонентного состава природного газа. Экспериментальные исследования проводились в соответствии с Программой и методикой испытаний, разработанной ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» (г. Санкт-Петербург).

Исследования проводились с использованием трех стандартных образцов утвержденного типа (ГСО) – имитаторов природного газа и трех ГСО имитаторов водяных паров в метане, аттестованные значения молярной доли компонентов которых приведены в таблице 4.11.

Таблица 4.11 - Компонентный состав ГСО, использованный при проведении исследований

Наименование компонентов	Молярная доля компонентов в ГСО, %		
	Смесь 1	Смесь 2	Смесь 3
Метан	99.93542	95.9913	49.0235
Этан	0.00496	0.997	15.1
Пропан	0.00474	0.509	6.05
И-Бутан	0.00497	0.102	0.816
Н-Бутан	0.00493	0.105	0.709
Диоксид углерода	0.0047	1.00	10.1
Азот	0.0054	1.039	15.1
Н-Пентан	0.00503	0.0474	0.205
И-Пентан	0.00522	0.0472	0.19
Кислород	0.0048	0.0198	2.01
Водород	0.00559	0.102	0.5
Н-Гексан	0.00445	0.0236	0.131
Нео-Пентан	0.0048	0.0100	0.0511
Метанол	0.00499	0.0067	0.0144
Водяные пары	0.00113	0.0055	0.060

При выборе компонентного состава и диапазона молярной доли компонентов в ГСО для исследований использовались положения ГОСТ 5542-2014, ГОСТ 31371.7-2008 и ГОСТ 31369-2008, регламентирующие требования к качеству природного газа и методикам анализа компонентного состава, а также учитывались особенности СКР-газоанализатора, в частности, ограничение по регистрируемым компонентам и ограничение по минимальному давлению подаваемой в газоанализатор газовой пробы.

При установлении метрологических характеристик СКР-метода оценивались следующие показатели:

- повторяемость результатов измерений молярной доли в условиях сходимости;
- повторяемость результатов измерений молярной доли в условиях воспроизводимости;
- границы рабочего диапазона измерений молярной доли;
- достоверность результатов измерений молярной доли.

Показатель повторяемости результатов измерений молярной доли в условиях сходимости оценивался по значению относительного расхождения результатов измерений, зарегистрированных при выполнении одной серии с (10 единичных измерений).

Показатель повторяемости результатов измерений молярной доли в условиях воспроизводимости оценивался по значению относительного расхождения результатов измерений, зарегистрированных при выполнении всех серий измерений молярной доли компонента в одной и той же смеси.

Границы рабочего диапазона измерений молярной доли устанавливались с учетом оценки показателей повторяемости (неопределенность не должна превышать 25-30%).

Достоверность результатов измерений молярной доли оценивалась по разности между паспортным и измеренным значением молярной доли компонента в ГСО.

Для каждой из смесей ГСО выполнялось от 20 до 100 измерений.

В результате выполненных метрологических исследований установлено:

- 1) при низких значениях молярной доли компонентов (около 0.005%) для всех компонентов наблюдается большой разброс результатов как в рамках одной серии измерений, так и между сериями (оценка относительной точности измерений составляет от 30 до 100%);
- 2) при значениях молярной доли компонентов свыше 0.02 – 0.05% оценка относительной точности измерений составляет не более 5%;
- 3) наблюдается прямая зависимость между содержанием компонента и достоверностью результата измерений его молярной доли для всех компонентов, кроме пентанов и гексанов, для которых может иметь место смещение из-за некорректности базовых спектров этих компонентов;
- 4) для определения нижней границы диапазона измерений молярной доли компонентов нужны дополнительные измерения с использованием ГСО с низкой концентрацией компонентов.

Выводы из выполненных метрологических исследований [218]:

- 1) метод СКР представляет является перспективным с точки зрения принципиальной возможности обеспечения одновременного количественного определения практически всех компонентов природного газа кроме гелия;
- 2) метод СКР может быть использован для анализа искусственных газовых смесей и природного газа при содержании компонентов не менее 0.02 – 0.05% молярной доли;
- 3) в соответствии с требованием норматива ГОСТ 31369-2008 на минимально определяемое содержание компонента (0.005% молярной доли) имеется ограничение возможности применения метода, реализованного в конкретном исследованном экспериментальном образце СКР-газоанализатора, в целях контроля состава природного газа в сфере государственного регулирования;
- 4) анализаторы, принцип действия которых основан на методе СКР, могут найти широкое применение для целей определения компонентного состава природного газа, продуктов его технологической переработки, а также газовых смесей аналогичного состава (биогазы, попутные нефтяные газы, газы

нефтепереработки и пр.) в областях, не являющихся сферой государственного регулирования обеспечения единства измерений.

Заключение ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» по результатам испытаний метода СКР приведено в приложении В3 настоящей работы.

4.5 Выводы по главе 4

4.5.1 Основные выводы из результатов работ, описание которых приведено в главе 4:

1) Приведено обоснование возможности использования оптического метода дифференциальной спектроскопии в УФ-диапазоне для измерения концентрации окиси азота и двуокиси серы в воздухе и найдены новые технические решения, позволившие осуществить практическую реализацию метода.

2) С использованием новых технических решений созданы опытные образцы оптических газоанализаторов для автоматического непрерывного контроля содержания окиси азота и двуокиси серы в дымовых газах тепловых электростанций, обладающих лучшими техническими и эксплуатационными характеристиками по сравнению с отечественными аналогами. Разработаны комплекты технической документации, на основании которой организовано промышленное производство и внедрение оптических газоанализаторов ДОГ-1М.

3) Разработано метрологическое обеспечение газоанализаторов ДОГ-1М и ДОГ-4 и проведена их сертификация в качестве типа средств измерений РФ.

4) Приведено обоснование возможности использования метода ДААС для определения концентрации паров ртути в воздухе на основе поперечного эффекта Зеемана с использованием капиллярных ламп с естественным изотопным составом ртути. На основе найденных технических решений разработан экспериментальный образец газоанализатора, имеющий лучшие технические и эксплуатационные характеристики по сравнению с аналогами.

8) На основе метода акустической термометрии впервые предложен новый способ регистрации оптического излучения и разработан малоинерционный

(постоянная времени ~ 10 мс) селективный фотоприемник инфракрасного диапазона.

9) Предложены технические решения, позволяющие использовать метод акустической термометрии в фотоприемном устройстве оптических газоанализаторов ИК-диапазона.

10) Приведено обоснование возможности использования метода СКР для контроля состава воздуха и других многокомпонентных газовых сред. На основе новых технических решений разработан экспериментальный образец СКР-газоанализатора для экологического мониторинга и контроля технологических процессов, имеющий лучшие технические и эксплуатационные характеристики по сравнению с аналогами.

4.5.2 Представленные в главе 4 результаты работ приведены в 37 авторских публикациях [72, 74, 176, 179–191, 198–204, 208, 211, 212, 214–218, 245–249, 257], на новые технические решения получено 8 патентов РФ [21–28].

Результаты работ по развитию метода дифференциальной спектроскопии в ультрафиолетовой области оптического спектра и созданию на его основе автоматических газоанализаторов окиси азота в дымовых газах в 1997 и 2000 годах вошли в перечень основных научных результатов СО РАН.

Результаты работ по развитию метода спонтанного комбинационного рассеяния света и разработке СКР-газоанализатора в 2012 г. вошли в перечень основных научных результатов РАН.

На основании полученных результатов сформулированы третье и пятое защищаемое положение (см. Введение. Защищаемые положения).

4.5.4 Описанные в главе 4 результаты получили дальнейшее развитие в главе 5 настоящей работы, где представлены первые результаты разработки автоматизированных измерительно-вычислительных систем для мезомасштабного метеорологического и экологического контроля состояния АПС, в составе которых использованы разработанные газоаналитические комплексы.

5 Автоматизированные системы для мезомасштабного экологического и метеорологического мониторинга атмосферного пограничного слоя

5.1 Методическое обеспечение системы мезомасштабного экологического и метеорологического мониторинга атмосферного пограничного слоя

5.1.1 Метод статистической пространственно-временной экстраполяции метеорологических данных и его апробация на сети УАМС АМК-03

В основе разрабатываемых технологий экологического и метеорологического мониторинга АПС и прогнозирования изменений его параметров лежит решение задачи восстановления полей метеорологических величин над мезомасштабной территорией, на которой с некоторой плотностью размещена сеть измерительных постов, осуществляющих в режиме реального времени синхронные измерения метеорологических, турбулентных и экологических параметров атмосферы. Данная задача решается на основе математических (диагностических) моделей, описывающих взаимосвязь полей метеорологических величин в конкретный фиксированный момент времени [255].

Задачу многомерной (пространственно-временной) экстраполяции в общем виде можно сформулировать следующим образом. Пусть задана функция $\xi(\delta^{(1)}, \delta^{(2)}, \dots, \delta^{(n)})$ нескольких независимых переменных, в данном случае описывающая значения некоторого метеорологического параметра. Проведем через точки, в которых известны значения этой функции, n -мерную сферу минимального радиуса. В соответствии с [219], под интерполяцией будем понимать оценивание значений рассматриваемой функции внутри этой сферы. Аналогично, под экстраполяцией – оценивание ее значений за внешними границами этой сферы.

Данную задачу можно поставить, используя некоторый математический аппарат применительно к случайному многомерному полю в пространстве R^m , в данном случае 4-х мерному. Каждая точка в пространстве R^m задается радиус-

вектором $\mathbf{p}_i$ с декартовыми координатами x_i, y_i, z_i и временем t_i . Пусть в точках $\mathbf{p}_i \in W_x \subset R^m$ ($i = 1, 2, \dots, n$ – номер выделяемой точки в замкнутом множестве W_x пространства R^m) заданы значения статистически однородного и центрированного (с вычетом его среднего значения) поля $\xi(\mathbf{p})$ [219].

Процедура интерполяции значений поля $\xi(\mathbf{p})$ в точку $\mathbf{p}_i \in W_x \subset R^m$ или их экстраполяции в точку $\mathbf{p}_i \notin W_x \subset R^m$ (нахождения значения поля $\xi(\mathbf{p}_0)$ внутри или вне множества W_x по известным его значениям $\xi(\mathbf{p}_i)$ в точках $\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \dots, \mathbf{p}_n$ множества R^m) формально описывается как

$$\hat{\xi}(\mathbf{p}_0) = \Xi[\xi(\mathbf{p}_1), \xi(\mathbf{p}_2), \dots, \xi(\mathbf{p}_n)], \quad (5.1)$$

где Ξ – функция преобразования исходных данных, определяемая примененным способом интерполяции (экстраполяции) и взаимным расположением точек $\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \dots, \mathbf{p}_n$.

Выражение (5.1) записано в предположении, что известны истинные значения поля $\xi(\mathbf{p}_i)$ в точках $\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \dots, \mathbf{p}_n$. Однако, в реальности могут быть известны лишь результаты измерений значений поля $\xi(\mathbf{p}_i)$ в этих точках

$$\tilde{\xi}(\mathbf{p}_i) = \xi(\mathbf{p}_i) + \delta_{\xi}(\mathbf{p}_i), \quad (5.2)$$

которые отличаются от истинных значений $\xi(\mathbf{p}_i)$ на величину ошибки $\delta_{\xi}(\mathbf{p}_i)$, обусловленной как аппаратными погрешностями измерения $\xi(\mathbf{p}_i)$, так и изменчивостью поля вследствие влияния мелкомасштабной атмосферной турбулентности. С учетом этого процедура интерполяции (экстраполяции) должна описываться вместо (5.2) выражением

$$\hat{\xi}(\mathbf{p}_0) = \Xi[\tilde{\xi}(\mathbf{p}_1), \tilde{\xi}(\mathbf{p}_2), \dots, \tilde{\xi}(\mathbf{p}_n)]. \quad (5.3)$$

Простейшим и практически наиболее важным случаем (5.2) является возможность представить функцию Ξ как линейную однородную функцию от своих аргументов $\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \dots, \mathbf{p}_n$, т.е.

$$\Xi[\tilde{\xi}(\mathbf{p}_1), \tilde{\xi}(\mathbf{p}_2), \dots, \tilde{\xi}(\mathbf{p}_n)] = a_1 \tilde{\xi}(\mathbf{p}_1) + a_2 \tilde{\xi}(\mathbf{p}_2) + \dots + a_n \tilde{\xi}(\mathbf{p}_n) = \sum_{i=1}^n (a_i \tilde{\xi}(\mathbf{p}_i)), \quad (5.4)$$

где $a_1, a_2, \dots, a_n$ – некоторые коэффициенты, значения которых непосредственно не зависят от измеряемых значений $\tilde{\xi}(\mathbf{p}_1), \tilde{\xi}(\mathbf{p}_2), \dots, \tilde{\xi}(\mathbf{p}_n)$ и определяются существенно более медленной изменчивостью общей синоптической ситуации в регионе измерений.

Интерполяцию (экстраполяцию) поля $\xi(\mathbf{p})$, осуществляемую по формуле

$$\hat{\xi}(\mathbf{p}_0) = \sum_{i=1}^n a_i \cdot \tilde{\xi}(\mathbf{p}_i), \quad (5.5)$$

называют линейной по отношению к наблюдаемым значениям поля $\xi(\mathbf{p})$, а коэффициенты a_i – весовыми множителями (коэффициентами) интерполяции. Основная задача интерполяции сводится к отысканию значений весовых множителей a_i , причем таким образом, чтобы ошибка интерполяции (экстраполяции) поля $\xi(\mathbf{p})$ в точку $\mathbf{p}_0$ была бы минимальной, т.е.

$$E^2 = \mathbf{M} \left\{ \left[\xi(\mathbf{p}_0) - \sum_{i=1}^n a_i \tilde{\xi}(\mathbf{p}_i) \right]^2 \right\} \rightarrow \min. \quad (5.6)$$

(здесь E^2 – дисперсия ошибки интерполяции (экстраполяции); $\mathbf{M}$ – оператор математического ожидания; $\xi(\mathbf{p}_0)$ – истинное значение поля $\xi(\mathbf{p})$ в точке $\mathbf{p}_0$ [219]).

Наиболее часто в практике для определения весовых множителей a_i традиционно используется метод наименьших квадратов (см., например, [219]).

Заметим, что с помощью выражения (5.6), если в нем заменить истинное значение поля $\xi(\mathbf{p})$ на его измеренное значение $\tilde{\xi}(\mathbf{p}_0)$ в точке $\mathbf{p}_0$, можно оценить не только дисперсию ошибки интерполяции (экстраполяции), но и дисперсию ошибки сопоставления спрогнозированного значения с данными наблюдений в точке $\mathbf{p}_0$. В этом случае выражение (5.6) принимает вид

$$E^2 = \mathbf{M} \left\{ \left[\tilde{\xi}(\mathbf{p}_0) - \sum_{i=1}^n a_i \tilde{\xi}(\mathbf{p}_i) \right]^2 \right\} \rightarrow \min. \quad (5.7)$$

Вышеизложенное дает общие положения, применяемые при разработке методов статистической экстраполяции (интерполяции), широко применяемых

для пространственно-временного анализа метеорологических полей [220]. Использование в описанной методике разработанных УАМС АМК-03 (см. параграф 2.3 настоящей работы) в качестве приборной основы измерительной сети позволяет приступить к практическому решению задачи восстановления полей метеорологических величин и сверхкраткосрочного прогнозов их дальнейшей временной эволюции. При выполнении АМК-03 измерений метеорологических величин с сохранением их значений в базе данных получаются временные ряды со значениями каждой из измеряемых величин $\xi_k = \xi(t_k)$ в дискретные моменты времени t_k , относящиеся к одной пространственной точке. Подобные ряды можно использовать для прогностических оценок их дальнейшей временной эволюции на основе применения алгоритмов с использованием фильтра Калмана [221]. Один из вариантов такого фильтра (Калмана-Бьюси) был синтезирован на компьютере, и с его помощью выполнены сверхкраткосрочные прогнозы (до 6 часов) временной эволюции температуры воздуха T , атмосферного давления P , абсолютной влажности воздуха q , зональной U и меридиональной V составляющих скорости ветра. При этом использовалось временное усреднение значений ξ_k на интервале 20 минут с периодичностью δ регистрации усредненных значений, равной также 20 минутам [222].

В качестве математической модели временной эволюции для каждой из измеряемых метеорологических величин ξ был применен алгебраический полином с изменяющимися во времени весовыми коэффициентами $a_0(t), a_1(t), a_2(t), \dots, a_n(t)$:

$$\xi(t_0 + \tau) = a_0(t_0 + \delta) + a_1(t_0 + \delta) \tau + a_2(t_0 + \delta) \tau^2 + \dots + a_n(t_0 + \delta) \tau^n. \quad (5.8)$$

Здесь t_0 – время последнего измерения параметра ξ ; τ – интервал временной экстраполяции ξ ; $a_1, a_2, \dots, a_n$ считаются медленно меняющимися на интервале τ случайными процессами, значения которых для последующего срока измерения $t_0 + \delta$ вычисляются в каждый текущий момент t_0 .

Для вычисления коэффициентов $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$, входящих в (5.8), использовалась фильтрация Калмана их значений для прогнозируемой величины $\xi(t_k)$, измеренных в предыдущие моменты времени $t_k = t_0 - (k - 1)\delta$, где $k = 1, 2, 3, \dots, m$ (m – используемое число циклов работы фильтра Калмана). При этом применялось дополнительное априорное условие $a_0(t_0 + \delta) = \xi(t_0)$. Параметр $\delta t = (m - 1)\delta$ является периодом упреждения для начала выполнения измерений метеовеличины ξ , который требуется для набора объема данных измерений $\xi(t_k)$ к моменту t_0 , достаточного для минимизации ошибки прогнозирования.

В рамках теории фильтрации Калмана коэффициенты $a_0(t), a_1(t), a_2(t), \dots, a_n(t)$ сводятся в дискретный по времени вектор-столбец состояний анализируемой динамической системы

$$\mathbf{X}(k) = [X_1(k), X_2(k), X_3(k), \dots, X_{n+1}(k)]^T, \quad (5.9)$$

где интервал дискретизации между соседними значениями k можно задавать только кратным или равным периоду δ поступления данных измерений. Фильтр Калмана обеспечивает оценку $\hat{\mathbf{X}}(k+1)$ вектора состояния системы на последующий $(k+1)$ -ый шаг цикла его работы с минимальной дисперсией. Используя ее, можно далее выполнять прогнозы $\hat{\xi}$ значений ξ на требуемые интервалы времени τ вперед по формуле, вытекающей из принятой модели (5.8):

$$\hat{\xi} = \hat{X}_1 + \hat{X}_2\tau + \hat{X}_3\tau^2 + \dots + \hat{X}_{n+1}\tau^n. \quad (5.10)$$

Для определения оптимальных параметров используемого алгоритма прогнозирования были выполнены оценки $\hat{\xi}$ с использованием полиномов со степенями n от 1 до 6 включительно и с интервалами упреждения δt в 1, 2, 3, ..., 7 часов. Прогноз значений ξ выполнялся на 1, 2, 3, ..., 6 часов вперед. При этом дополнительно вычислялись ошибки прогноза как $\Delta\xi = \hat{\xi} - \xi$ и далее из них – среднеквадратическая за выбранный период наблюдений погрешность прогноза – СКО(ξ). Расчеты показали, что предлагаемый метод позволяет выполнять с хорошей точностью прогнозы значений всех основных метеорологических величин на сроки τ , не превышающие 6 часов [222]. Исследуя метод для

различных комбинаций параметров калмановской фильтрации, можно сделать вывод, что оптимальной с точки зрения минимизации погрешности прогнозирования является использование комбинации полинома 3-й степени с интервалом упреждения δt , примерно равным сроку прогнозирования τ , в котором выполняется не менее 9-ти циклов работы фильтра Калмана [221].

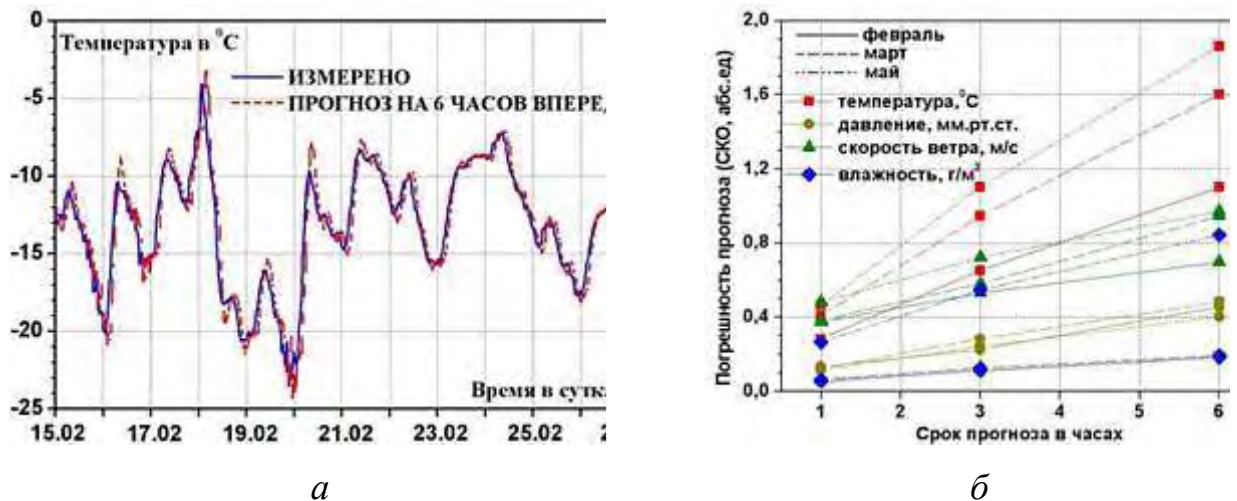


Рисунок 5.1 - Результаты прогнозирования метеорологических величин по результатам измерений АМК-03: *а* – сравнение измеренных с интервалом 20 минут значений температуры воздуха и ее шестичасовых прогнозов за 12 дней февраля; *б* – среднеквадратическая ошибка прогноза (СКО) различных метеорологических величин для трех разных месяцев года

Качество краткосрочных прогнозов можно оценить из рис. 5.1, *а*, где сплошной линией показан временной ход значений температуры воздуха, измеренных АМК-03, а штриховой - ее значения, спрогнозированные на 6 часов вперед. Подобные рисунки, построенные для других метеорологических величин (P , q , U и V), показывают еще меньшие погрешности прогнозирования. Наилучшие результаты для используемого метода получаются для временных участков, на которых прогнозируемая величина непрерывно возрастает или убывает. При этом изменения модуля скорости возрастания или убывания значения метеорологической величины практически не сказываются на качестве прогнозов. Наиболее критичными являются случаи, когда временная производная

в суточном ходе значений метеорологической величины резко изменяет свой знак. Это обусловлено тем, что фильтр Калмана обладает некоторой инерционностью в прогнозировании коэффициентов a_i , равной здесь двум циклам его работы. Из рисунка 5.1,*а* видно, что когда временная производная температуры меняет свой знак, фильтр подстраивает соответствующим образом значения коэффициентов a_1 и a_2 только через 40 минут. Тем не менее, абсолютные ошибки прогноза даже в этом случае оказываются сопоставимыми с погрешностью измерений многих традиционных средств метеорологических измерений.

На рис 5.1,*б* приведены значения среднеквадратической за месяц погрешности прогноза на 1, 3 и 6 часов для всех исследуемых метеорологических величин, вычисленные для трех разных месяцев (в каждом месяце использовано более 2-х тысяч измерений АМК-03). Очевидно, что во всех случаях погрешность прогноза возрастает с увеличением срока прогнозирования. Наилучшее качество прогноза независимо от времени года получается для наиболее инерционной характеристики атмосферы – атмосферного давления. Меньшая погрешность прогноза абсолютной влажности воздуха в феврале и марте здесь обусловлены только тем, что при отрицательных температурах атмосфера содержит значительно меньше влаги, чем в теплые периоды года. Большие погрешности прогноза для температуры воздуха по сравнению с другими метеорологическими величинами обусловлены регулярными суточными колебаниями ее значений, приводящими к частой повторяемости случаев, когда ее временная производная быстро изменяет свой знак. Для Томска в мае и марте характерны наибольшие разности между пиковыми значениями ночной и дневной температуры воздуха, иногда превышающие 20 °С. Поэтому для этих месяцев получились наибольшие погрешности прогноза значений температуры.

Наличие сети пространственно-разнесенных УАМС АМК-03 позволяет расширить описанный выше метод прогнозирования на 3-х мерный (пространственно-временной) случай [221]. При этом метеорологические величины ξ рассматриваются как функции времени t и двух пространственных координат x и y . Соответственно вместо (5.8) используется разложение $\xi(t, x, y)$ в

ряд Тейлора по 3-м аргументам, а в (5.9) для описания состояния динамической системы вместо вектора-столбца используется трехмерная матрица. Это позволит реализовывать не только временные прогнозы, но и интерполяцию, и экстраполяцию значений метеорологических величин над контролируемой мезомасштабной территорией.

5.1.2 Корреляционные свойства

приземных метеорологических данных измерений сети УАМС АМК-03

Важнейшим условием успешного применения статистической интерполяции (экстраполяции) метеорологических величин над территорией, охваченной ограниченным количеством постов приборных метеорологических наблюдений, является пространственно-временная корреляция имеющихся данных измерений. Ее наличие позволяет применять различные динамико-стохастические методы (см., например, [223]) для реализации относительно коротких (по пространству и времени) прогнозов эволюции полей метеорологических величин, а также решать такую классическую задачу для прикладной метеорологии как объективный анализ полей метеорологических величин в пространственно-временных сетках различного разрешения. Отметим, что в подобных задачах рассматривают значения метеорологических величин, усредненные за время порядка нескольких минут, для которых влияние мелкомасштабной атмосферной турбулентности практически не значимо. Поэтому корреляционные свойства метеорологических величин, которые будут измеряться с помощью создаваемой ЭО ИВС, для случая наземных наблюдений можно рассмотреть, исходя имеющихся экспериментальных данных, полученных на ее прототипе – измерительной метеорологической системе (ИМС), описанной ниже в подразделе 5.2.1.

Для метеорологических данных каждого из постов ИМС [221 – 223] были выполнены расчеты временных автокорреляционных функций $B_i(\tau)$ (i – номер поста), нормируемых на значение дисперсии D_i . Кроме внешнего вида этих функций наибольший интерес представляют значения интервалов времени

корреляции Δt_{cor} , оцениваемых здесь по уровню 0,5 от максимума $B_i(\tau)$ при $\tau = 0$, а также влияние на них используемого времени усреднения первичных данных измерений Δt_{aver} . Время корреляции Δt_{cor} для имеющихся значений метеорологических величин в существенной степени задает максимальный интервал времени, на котором еще можно относительно достоверно выполнить стохастическими методами временной прогноз их дальнейшей эволюции. В вычислениях $B_i(\tau)$ время усреднения данных измерений Δt_{aver} варьировалось от 1 до 20 минут. Оказалось, что выбор его значения из этого диапазона почти не влияет на интервалы временной корреляции Δt_{cor} для температуры, влажности и давления (отличия составляли в единицы минут). В то же время для скорости и направления ветра выбранное из этого же диапазона значение Δt_{aver} может изменить для них значение Δt_{cor} на величину порядка 1 часа и более. Наиболее значимо это влияние усреднения характеристик ветра при $\Delta t_{aver} < 5$ минут.

Вычисления нормированных временных автокорреляционных функций $B_i(\tau)$ выполнялись по классической формуле из теории вероятностей:

$$B_i(\tau) = B_i(n) = \frac{1}{D_i} \sum_{k=0}^{N-n-1} (\xi_{i,k} - m_i)(\xi_{i,k+n} - m_i). \quad (5.11)$$

Здесь $n = \tau/\Delta t_{reg}$ ($n = 0, 1, 2, 3 \dots$) – аргумент функции в виде ее целочисленного номера (при дискретно-числовой обработке на компьютере) для ее временного аргумента τ ; $\xi_{i,k}$ – значение метеорологической величины ξ на i -ом посту наблюдений для k -ого дискретного отсчета во временном потоке регистрации ее данных; $N \approx \Delta t_o/\Delta t_{reg}$ (целое число) – количество значений $\xi_{i,k}$ на выбранном для их анализа периоде наблюдений Δt_o (суточном, недельном или более; например, при $\Delta t_{reg} = 10$ минут для недельных наблюдений $N = 1008$);

$m_i = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \xi_{i,k}$ и $D_i = \frac{1}{N-1} \sum_{k=0}^{N-1} (\xi_{i,k} - m_i)^2$ – среднее и дисперсия величин $\xi_{i,k}$ за период наблюдений Δt_o на посту i .

Также вычислялись нормированные временные функции взаимной корреляции $B_{ij}(\tau)$ для метеорологических данных, полученных на разных постах наблюдений ИВС (с номерами i и j):

$$B_{ij}(\tau) = B_{ij}(n) = \frac{1}{\sqrt{D_i D_j}} \sum_{k=0}^{N+n-1} (\xi_{i,k-n} - m_i)(\xi_{j,k} - m_j) \text{ при } n < 0; \quad (5.12)$$

$$B_{ij}(\tau) = B_{ij}(n) = \frac{1}{\sqrt{D_i D_j}} \sum_{k=0}^{N-n-1} (\xi_{i,k} - m_i)(\xi_{j,k+n} - m_j) \text{ при } n \geq 0; \quad (5.13)$$

где аргумент n функции B_{ij} может быть отрицательным числом. В этих функциях наиболее значима величина их абсолютного максимума при некотором значении n , как правило, не равном нулю, определяющая коэффициент пространственной корреляции R_{ij} временных рядов данных измерений в разнесенных постах наблюдений.

Корреляционный анализ метеорологических данных, полученных нами с постов ИМС [224], проводился для 4-х периодов недельных наблюдений: 1) с 17 по 24 августа 2011 г.; 2) с 10 по 17 октября 2011 г.; 3) с 14 по 20 ноября 2012 г. и 4) с 12 по 18 декабря 2012 г. Рис. 5.2 на примере обработки данных, полученных на посту "Богашево" (см. схему постов в п. 5.2.1 на рис. 5.10) для этих 4-х периодов, показывает нормированные временные автокорреляционные функции $B_i(\tau)$ для давления (P), температуры (T), скорости (V) и направления (D) горизонтального ветра при 10-минутном усреднении результатов измерений. Аналогичные функции также вычислялись для температуры точки росы (T_d) и для всех других постов ИМС. В табл. 5.1 приведены вычисленные значения интервала времени корреляции Δt_{cor} в часах для данных всех постов ИМС за указанные периоды наблюдений [243].

На вид автокорреляционных функций для температуры, в отличие от аналогичных функций для давления и параметров ветра, существенное влияние оказывают обычно наблюдаемые для этой метеорологической величины периодические изменения от местного времени (суточные колебания). Поэтому эти функции часто, в особенности при значительной солнечной радиации, выглядят как затухающие колебания с тем же периодом в 24 часа, имея

отрицательную корреляцию с абсолютным максимумом при аргументе τ , равном 12 часов. В подобных ситуациях практически значимый интервал корреляции для температуры не превышает 6-ти часов. Этот фактор (в меньшей степени) также влияет на вид автокорреляционных функций для температуры точки росы.

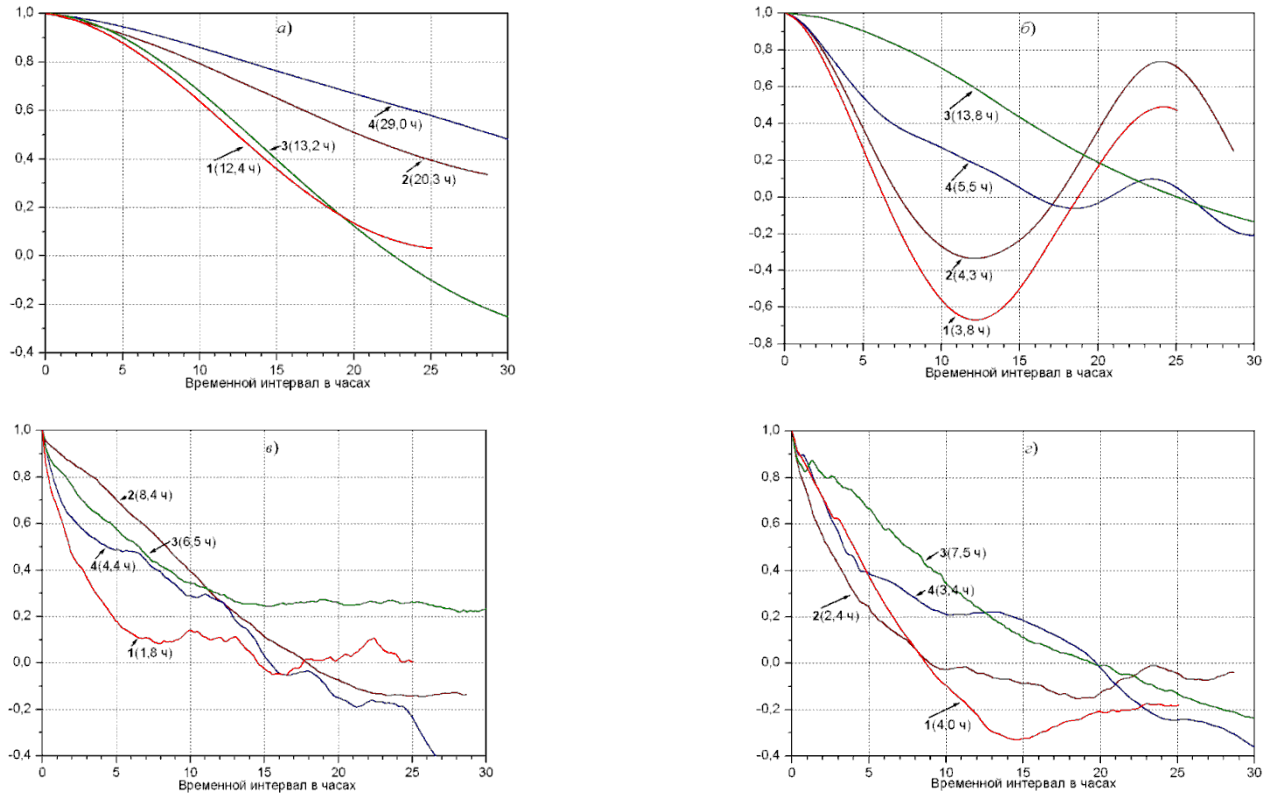


Рисунок 5.2 - Нормированные временные автокорреляционные функции метеорологических величин, измеренных на посту "Богашево" в различные периоды наблюдений, при их обработке с 10-минутным усреднением: а) – для давления; б) – для температуры; в) - для скорости горизонтального ветра; г) – для его направления. Здесь: 1 – за период 17÷24/08/2011; 2 – 10÷17/10/2011; 3 – 14÷20/11/2012; 4 – 12÷18/12/2012. В скобках приведены соответствующие периоду значения интервала времени корреляции в часах

Таблица 5.1 - Значения интервала времени корреляции в часах для метеорологических данных всех постов ИМС при их обработке с 10-минутным усреднением за периоды наблюдений, что и на рис. 5.2

	"Богашево"				"ИМКЭС"				"Курлек"			"Половинка"	
	1	2	3	4	1	2	3	4	2	3	4	3	4
P	12,4	20,3	13,2	29,0	12,4	20,0	13,3	6,2	13,6	13,2	29,0	14,1	26,0
T	3,8	4,3	13,8	5,5	4,7	4,0	14,2	5,8	3,9	13,5	5,9	14,9	5,3

V	1,8	8,4	6,5	4,4	1,8	5,9	3,8	0,9	3,9	5,5	2,0	4,7	5,7
D	4,0	2,4	7,5	3,4	4,0	4,8	6,6	14,3	1,8	4,7	2,2	5,2	0,6
T_d	4,8	6,3	13,0	3,6	4,7	6,0	13,7	5,5	6,2	12,4	6,3	14,7	6,1

Выполненные расчеты автокорреляционных функций $B_i(\tau)$ и из них интервалов корреляции Δt_{cor} позволяют констатировать:

- для всех основных метеорологических величин интервал корреляции Δt_{cor} имеет значения порядка нескольких часов и практически никогда не превышает одних суток;
- значения Δt_{cor} могут заметно изменяться в зависимости от текущей синоптической обстановки в регионе (при смене периода наблюдений), но при этом их изменения в горизонтальном пространственном масштабе порядка 20-50 км происходят практически синхронно;
- для каждой из метеорологических величин, измеряемой в одном месте и в один срок наблюдения, величина интервала корреляции Δt_{cor} имеет индивидуальное значение (например, типично, что наибольшие значения Δt_{cor} характерны для наиболее инерционной величины – атмосферного давления, а наименьшие – для скорости и направления ветра);
- при наступлении антициклона интервал корреляции для давления может существенно возрасти, а для температуры наоборот уменьшаться (вследствие увеличения амплитуды ее суточных колебаний).

На рис. 5.3 показаны нормированные временные функции взаимной корреляции $B_{ij}(\tau)$ между значениями P , T , V и D , измеряемыми на всех постах наблюдений ИМС в один и тот же период (здесь с 14 по 20 ноября 2012 г.). В отличие от автокорреляционных функций их максимумы всегда меньше единицы и смещены по аргументу τ (или n) от нулевого значения. В большинстве метеорологических условий коэффициенты корреляции R_{ij} для атмосферного давления, температуры и влажности воздуха, измеряемых на всех постах ИМС, были больше величины 0,9.

Наиболее слабая пространственная корреляция всегда наблюдалась (см. рис. 5.3) для параметров ветра: для скорости ветра V и его направления D она

обычно не превышала величины порядка $0,6 \div 0,7$. При этом ветровые данные низко размещенных постов "Курлек" и "Половинка" (см. табл. 5.2 в п. 5.2.1) при слабых ветрах имели значительно меньшую корреляцию с аналогичными данными постов "Богашево" и "ИМКЭС" – здесь сказывалось влияние ландшафта местности на результаты приземных измерений ветра.

Особым случаем оказался период зимнего антициклона с 12 по 18 декабря 2012 г., когда наблюдались продолжительные приземные температурные инверсии с практическим отсутствием регионального переноса воздушных масс.

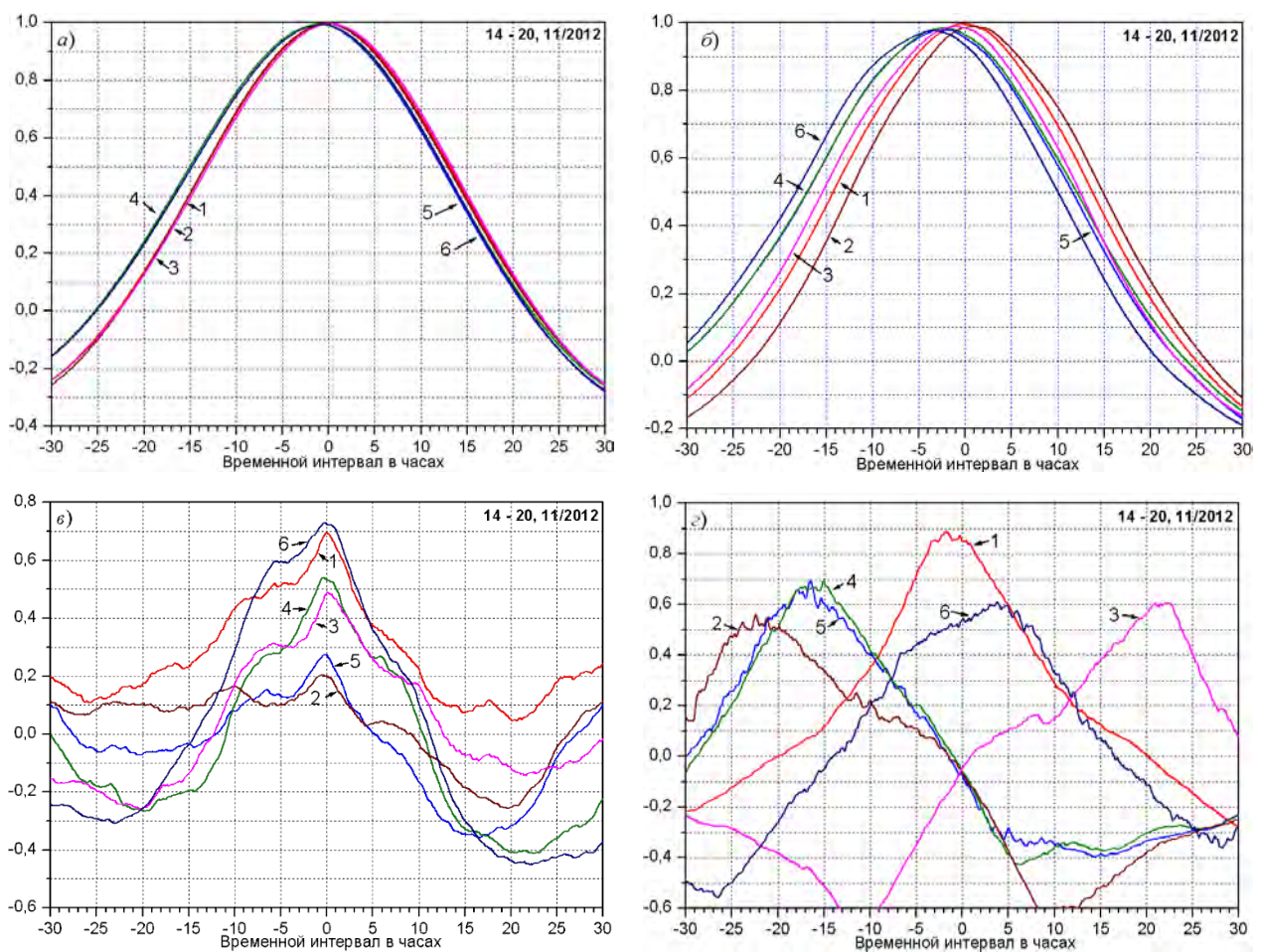


Рисунок 5.3 - Нормированные временные функции взаимной корреляции метеорологических величин, измеренных на 4-х постах ИМС в период с 14 по 20 ноября 2012 г., при их обработке с 10-минутным усреднением: а) - для давления; б) - для температуры; в) - для скорости горизонтального ветра; г) – для его направления. Здесь: 1 – при сравнении данных постов "Богашево" и "ИМКЭС"; 2

– "Богашево" и "Курлек"; 3 – "ИМКЭС" и "Курлек"; 4 – "ИМКЭС" и "Половинка";
5 – "Богашево" и "Половинка" и 6 – "Курлек" и "Половинка"

В этом случае в окрестности каждого поста ИМС в приземном слое атмосферы обычно формировались индивидуальные локальные температурно-ветровые условия, связанные с образованием местных температурных инверсий, практически не имеющие корреляции между собой в своих временных вариациях.

Соответственно в таких условиях статистическая интерполяция-экстраполяция метеорологических величин над территорией возможна только при наличии метеорологических данных выше границы температурной инверсии, т. е. при измерениях их высотных профилей до высот хотя бы в несколько сотен метров.

Таким образом, наличие в ИМС автокорреляции в данных измерений метеорологических величин позволяет применять методы статистической экстраполяции для временного прогноза их дальнейшей эволюции на каждом из постов (в отдельности) на сроки в пределах текущих суток (в среднем до 6 часов вперед), периоды достоверности которых определяются текущим значением интервала корреляции.

Аналогично, наличие взаимной корреляции в данных измерений разных постов сети позволяет оценивать пространственное распределение значений метеорологических величин по территории (решать задачу их объективного анализа).

Знание значений интервалов корреляции в текущих метеорологических условиях дает информацию о правомерности применения в разрабатываемом ЭО ИВС указанных методов: оно позволяет принимать принципиальное решение о текущей целесообразности их использования, выбирать оптимальный математический алгоритм и оценивать граничные сроки достоверности в выполняемых прогнозных расчетах. При последующем развитии ИВС на ее информационном сервере можно реализовать оперативное, в режиме on-line, вычисление корреляционных функций измеряемых метеорологических величин

по их усредненным значениям, сохраняемым в базе данных за предшествующий период порядка $5 \div 7$ суток.

Опыт эксплуатации ИМС (прототипа ЭО ИВС) показал, что он, кроме количественного увеличения постов наблюдений, требует принципиальной доработки, связанной с реализацией предварительных вычислений метеорологических величин и их статистической обработки непосредственно на постах до их передачи на сервер. В этом случае существенно уменьшается используемый трафик сотовой связи (стоимость эксплуатации ИВС) и появляется возможность кардинально повысить информативность системы за счет предварительной обработки данных об атмосферной турбулентности непосредственно на постах наблюдений. Кроме усредненных значений метеорологических величин (их статистических моментов первого порядка) необходимо передавать на информационный сервер и другие их статистические характеристики, например, начальные и смешанные корреляционные моменты второго порядка и выше, определяющие значения стандартных числовых параметров, применяемых для описания атмосферной турбулентности.

5.1.3 Методы определения типа стратификации в приземном слое атмосферы на основе данных УАМС АМК-03/3у

5.1.3.1 Термодинамический режим атмосферной турбулентности в приземном слое (ПС), в котором наиболее существенно проявляются эффекты взаимодействия атмосферы с граничной поверхностью (земной или водной), в значительной степени определяется вертикальными турбулентными потоками тепла H , импульса τ и влаги E , причем влияние E сравнимо с H и τ только над водной поверхностью [225, 226, 227]. Данные параметры могут быть вычислены через смешанные корреляционные моменты турбулентных флуктуаций продольной (вдоль среднего вектора горизонтального ветра) u' и вертикальной w' компонент скоростей ветра, температуры T' и влажности q' , измеренных за конечный промежуток времени Δt , по формулам:

$$H = c_p \rho \langle T' \cdot w' \rangle, \quad \tau = -\rho \langle u' \cdot w' \rangle, \quad E = \rho \langle q' \cdot w' \rangle. \quad (5.14)$$

Здесь ρ – плотность воздуха, c_p – удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении, $\langle \dots \rangle$ – обозначение статистического усреднения величины, заключенной в угловые скобки, за некоторый интервал времени Δt .

Параметры H и τ позволяют в свою очередь вычислить динамическую скорость

$$u^* = \sqrt{\tau / \rho} = \langle u' \cdot w' \rangle \quad (5.15)$$

и масштаб температуры

$$T^* = -H / (c_p \rho \cdot u^*) = -\langle T' \cdot w' \rangle / u^*, \quad (5.16)$$

которые в соответствии с теорией подобия Монина-Обухова определяют вертикальную структуру ПС. В частности, последние два параметра позволяют оценивать характерный высотный масштаб, обычно называемый масштабом Монина-Обухова, как (здесь $\chi = 0.4$ – постоянная Кармана; $g = 9.81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения; $\langle T \rangle$ – усредненное значение температуры воздуха в градусах Кельвина)

$$L^* = \langle T \rangle (u^*)^2 / (\chi \cdot g \cdot T^*). \quad (5.17)$$

Значение и знак величины L^* характеризует термодинамическую устойчивость атмосферы в ПС: при ее неустойчивом состоянии $L^* < 0$, а при устойчивом состоянии $L^* > 0$. В случае нейтральной (безразличной) стратификации в ПС значение параметра L^* может неограниченно возрастать, а его знак принимать любое значение. Обычно считают (см., например, [228]), что стратификация в ПС очень неустойчива, если $0 > L^* > -10$; умеренно неустойчива, если $-10 > L^* > -40$; слабо неустойчива, если $-40 > L^* > -100$; нейтральная (безразличная), если $|L^*| > 100$; слабоустойчива, если $10 < L^* < 100$; устойчива, если $0 < L^* < 10$.

При любой стратификации ПС параметр $u^* > 0$, т.е. знак L^* определяется исключительно знаком T^* (или H). Поэтому при неустойчивой стратификации $T^* < 0$ и $H > 0$ (поток тепла направлен вверх от земной поверхности – имеет место

конвекция), а при устойчивой – $T^* > 0$ и $H < 0$ (нисходящий поток тепла, обычно наблюдаемый в случае приземной инверсии). При этом, в среднем неустойчивой атмосфере в ПС могут наблюдаться кратковременные нисходящие потоки воздуха и, наоборот, в среднем устойчивой атмосфере могут наблюдаться кратковременные восходящие потоки. Вследствие этого время усреднения Δt при вычислении H и τ для оценки представительного (статистически устойчивого) значения L^* должно быть достаточно большим (порядка 10-20 минут).

В теории подобия Мони́на-Обухова [225, 226] вертикальные градиенты метеорологических величин описываются как функции безразмерного параметра $\xi = z/L$ (z – высота измерений в метрах):

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{u^*}{z\chi} \varphi_u(\xi), \quad \frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{T^*}{z\chi} \varphi_T(\xi), \quad (5.18)$$

где $\frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{\partial T}{\partial z} - \gamma_a$ – градиент потенциальной температуры θ , связанный с градиентом обычной температуры $\partial T/\partial z$ через сухоадиабатический градиент $\gamma_a = -0,0098$ °C/м; $\varphi_u(\xi)$ и $\varphi_T(\xi)$ – так называемые универсальные функции подобия для профилей ветра и температуры, соответственно.

Очевидно, что значение безразмерного параметра $\xi = z/L^*$, называемого числом Мони́на-Обухова, вычисленное по результатам измерений на какой-либо фиксированной высоте, например, при $z = 1$ м, также как величина L^* характеризует термодинамическую устойчивость атмосферы в ПС.

Функции $\varphi_u(\xi)$ и $\varphi_T(\xi)$ имеют всегда положительные значения, большие или равные 1, причем они принимают значение, близкое к 1, только при нейтральной стратификации, когда $|\xi| \rightarrow 0$. При этом эти функции, в отличие от формул (5.17), являются эмпирическими, т.е. их получают не из строгих аналитических выводов, а путем обобщения многочисленных экспериментальных данных синхронных измерений в атмосфере градиентов скорости ветра и температуры и параметров атмосферной турбулентности. В частности, в [229] они приводятся в виде:

$$\varphi_u = \begin{cases} (1-15\xi)^{-1/4}, \dots \xi < 0 \\ 1+4.7\xi, \dots \xi > 0 \end{cases}, \quad \varphi_T = \begin{cases} 0.74(1-9\xi)^{-1/2}, \dots \xi < 0 \\ 0.74+4.7\xi, \dots \xi > 0 \end{cases}. \quad (5.19)$$

Использование (5.19) в (5.18) для оценивания градиентов метеорологических величин дает только их приближенные значения и существует некоторая вероятность ошибки принятия решения.

В качестве критерия термодинамической устойчивости атмосферы также очень часто используется градиентное число Ричардсона [229]

$$R_i = \frac{g}{\langle T \rangle} \cdot \frac{\partial \theta / \partial z}{(\partial u / \partial z)^2} \approx \frac{g}{\langle T \rangle} \cdot \frac{\partial T / \partial z}{(\partial u / \partial z)^2}. \quad (5.20)$$

которое с точностью до множителя $\beta = \varphi_T(\xi) / \varphi_u^2(\xi)$ совпадает с числом Монина-Обухова ($R_i \approx \beta \xi$, где β положительное число, при нейтральной стратификации равное 1).

Традиционные средства измерений метеорологических величин обладают существенной инерционностью и малой чувствительностью, что не позволяет использовать их для измерений турбулентных пульсаций u' , w' и T' . По этой причине для оценивания стратификации атмосферы в ПС на протяжении многих десятилетий использовали в основном только градиентные измерения. Т.е. выполнялись измерения средних значений температуры T и скорости горизонтального ветра u на разных высотных уровнях z с последующим вычислением их вертикальных градиентов.

В практических методиках, реализующих этот подход, очень часто учитывают логарифмический закон возрастания в ПС скорости ветра u с высотой z , который, строго говоря, хорошо выполняется только в случае нейтральной стратификации. Это предположение позволяет измерять скорость ветра на одной высоте z и считать измеренное ее значение примерно равным приращению скорости ветра от уровня $z/2$ до $2z$, т.е. полагать:

$$u(2z) - u(z/2) \approx u(z). \quad (5.21)$$

Градиентные измерения наиболее часто выполняют при высоте среднего уровня z , равной 1 м. В этом случае последнее соотношение записывается как

$$u(2) - u(0,5) \approx u(1). \quad (5.22)$$

С учетом изложенного, вместо (5.20) имеем формулу для оценивания числа R_i при использовании градиентного метода определения стратификации атмосферы в ПС

$$R_i = \frac{g}{\langle T \rangle} \cdot \frac{z(T(2z) - T(z/2))}{u^2(z)} \text{ или, если } z = 1 \text{ м, то } R_i = \frac{g}{\langle T \rangle} \cdot \frac{(T(2) - T(0.5))}{u^2(1)}. \quad (5.23)$$

В качестве критерия вертикальной устойчивости воздуха применяется, так же, термодинамический критерий (TK), определяемый из градиентных измерений как

$$TK = \{T(0.5) - T(2)\} / u^2(1). \quad (5.24)$$

Термодинамический критерий TK отличается от числа Ричардсона, вычисленного по (5.23), только знаком и числовым коэффициентом $\langle T \rangle / g$, т.е.

$$TK = -\frac{\langle T \rangle}{g} R_i. \quad (5.25)$$

В этой методике считают, что при $TK \geq 0,1$ имеет место конвекция (неустойчивая стратификация в ПС), при $TK \leq -0,1$ – температурная инверсия (устойчивая стратификация), а при $0,1 \geq TK \geq -0,1$ – случай изотермии (безразличной стратификации).

Таким образом, существует два основных метода определения типа стратификации в ПС, которые теоретически взаимосвязаны между собой, но используют разные подходы к проведению измерений. Первый метод, его можно назвать статистическим, основан на прямых измерениях турбулентных пульсаций температуры T' , продольной u' и вертикальной w' компонент скоростей ветра с дальнейшим вычислением потоков тепла H и импульса τ , а затем масштаба Монины-Обухова L^* (или числа $\xi = z/L^*$). Второй метод (градиентный) основан на измерениях усредненных значений температуры и скорости ветра на разных высотных уровнях с последующим вычислением градиентного числа Ричардсона.

5.1.3.2 Трехуровневые ультразвуковые метеостанции типа АМК-03/3у (см. п. 2.3.1 настоящей работы) позволяют на практике использовать оба метода оценивания стратификации в ПС:

- статистический (основанный на прямых измерениях турбулентных пульсаций температуры T' , продольной u' и вертикальной w' компонент скоростей ветра);
- градиентный (основанный на измерениях усредненных значений температуры и скорости ветра на разных высотных уровнях).

На рис. 5.4 приведены результаты статистической обработки реальных мгновенных данных измерений УАМС АМК-03, полученных при двух противоположных типах стратификации в АПС [230]. В данном случае обрабатывались данные измерений за два 10-ти минутных интервала в течение одних и тех же суток, каждый из которых содержит по 48292 отсчета мгновенных значений метеорологических величин с частотой их дискретизации в 80 Гц. Первый интервал со сроком наблюдения в 2 часа местного времени соответствует случаю устойчивой стратификации (вычисленное по формуле (5.17) значение L^* составило 17,9 м) во время приземной температурной инверсии, характерной для летней ночи. Второй интервал со сроком наблюдения в 11 часов соответствует случаю неустойчивой стратификации ($L^* = -27,7$ м) с восходящими конвективными потоками тепла от нагреваемой солнцем земной поверхности.

На рис. 5.5 и 5.6 приведены вычисленные для них гистограммы распределения плотности вероятности мгновенных значений метеовеличин, показывающие значительное увеличение дисперсии флуктуаций температуры T' и горизонтального ветра u' в случае неустойчивой стратификации [230]. На рис. 5.7 значения максимумов нормированных функций взаимной корреляции для флуктуаций температуры T' и скорости вертикального ветра w' имеют разные знаки, соответствующие изменению направления потока тепла H при переходе от неустойчивой стратификации к устойчивой.

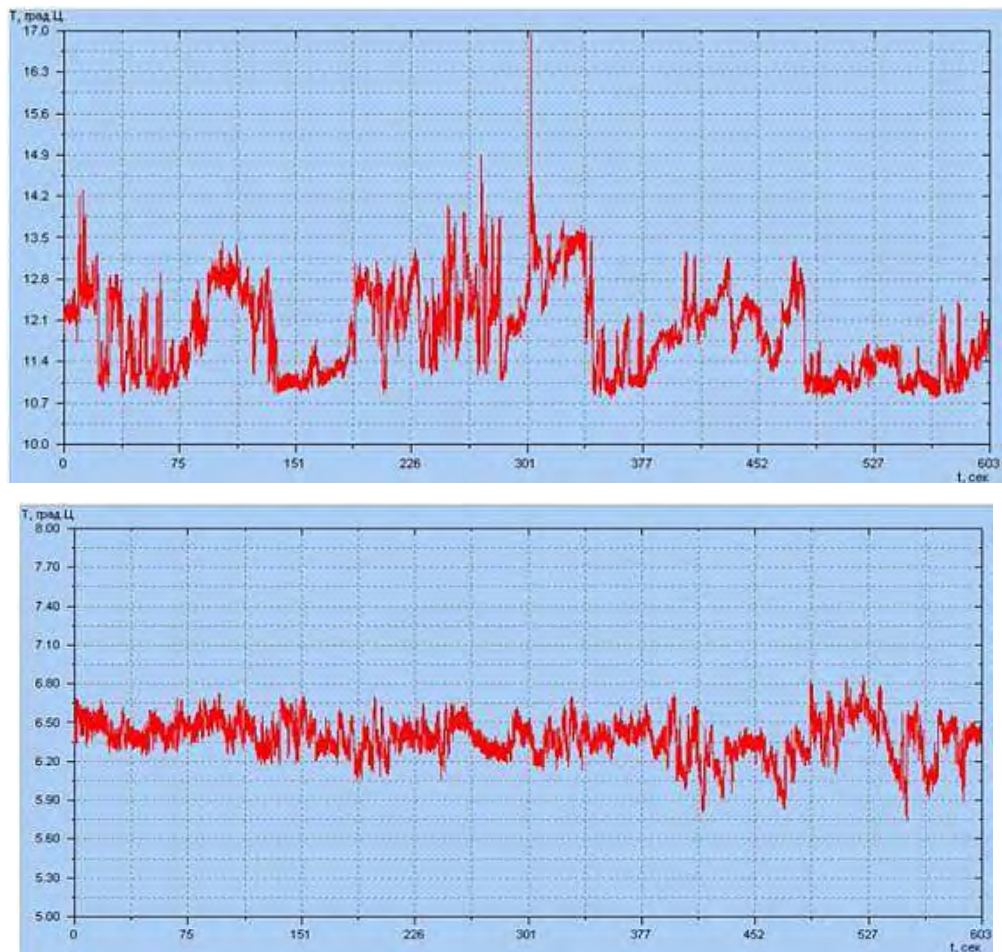


Рисунок 5.4 - Примеры измеряемых 10-ти минутных реализаций мгновенных значений T при неустойчивой (сверху) и устойчивой (снизу) стратификации

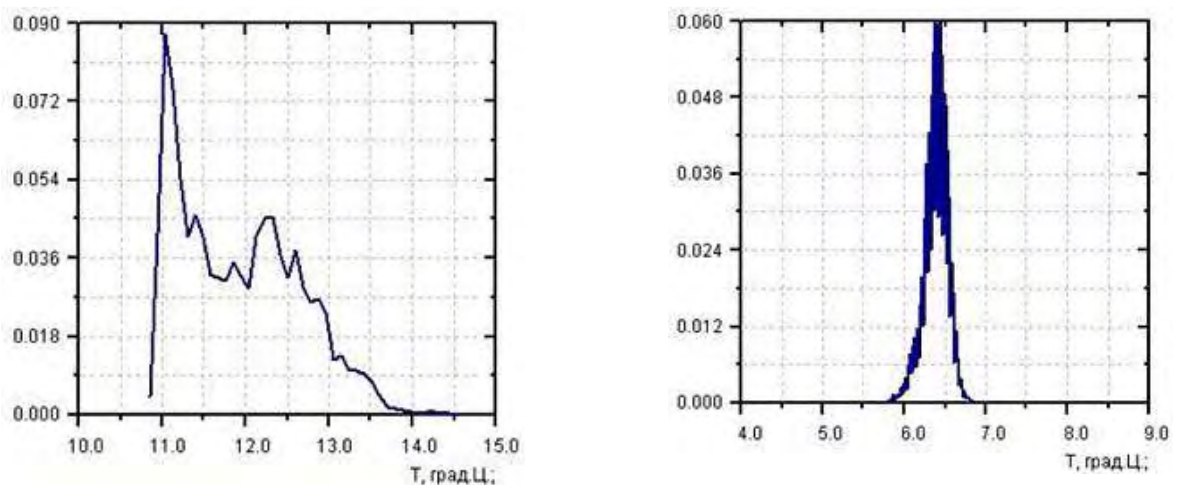


Рисунок 5.5 - Гистограммы распределения плотности вероятности мгновенных значений температуры воздуха в случае неустойчивой с $L^* = -27,7$ м (слева) и устойчивой с $L^* = 17,9$ м (справа) стратификации в ПС

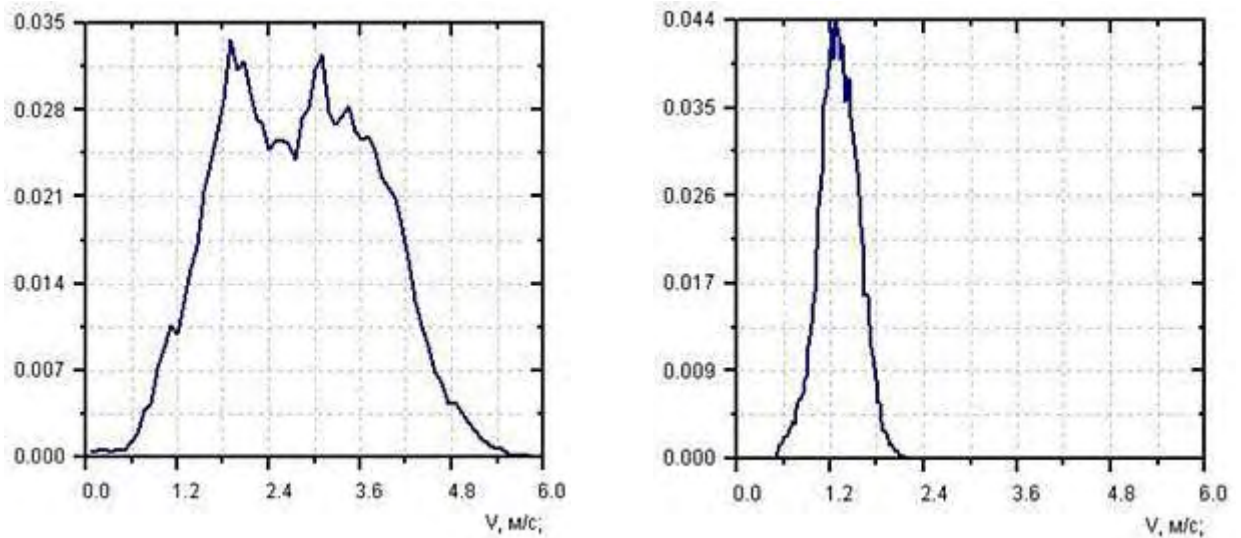


Рисунок 5.6 - Гистограммы распределения плотности вероятности мгновенных значений скорости горизонтального ветра в случае неустойчивой с $L^* = -27,7$ м (слева) и устойчивой с $L^* = 17,9$ м (справа) стратификации в ПС

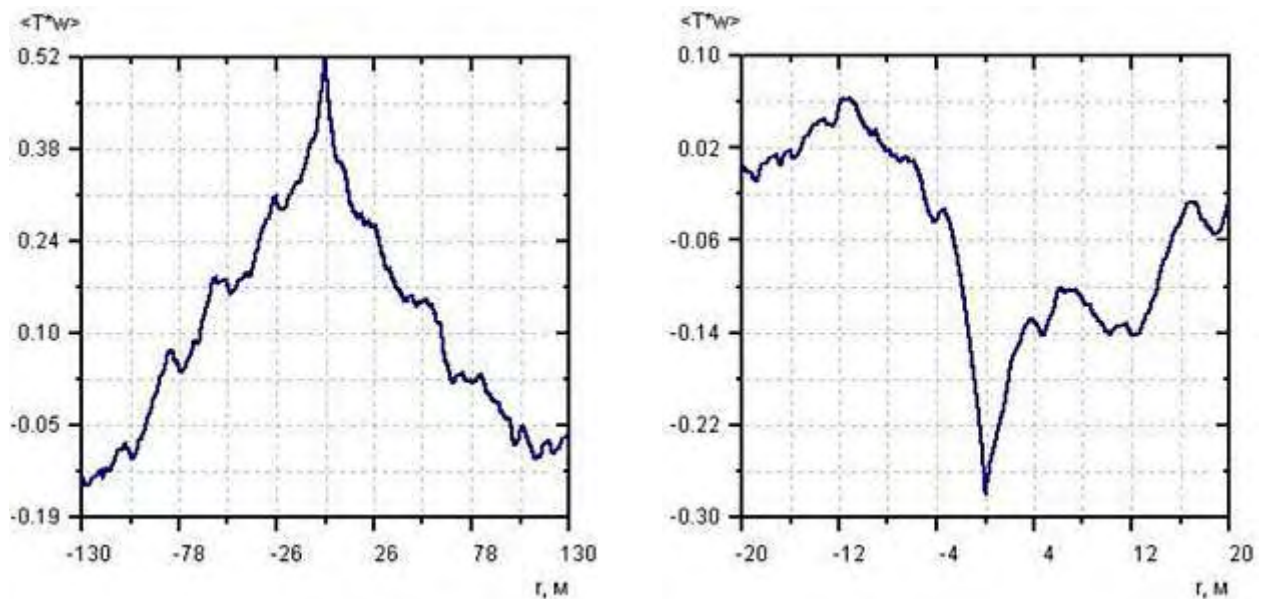


Рисунок 5.71 - Нормированные функции взаимной корреляции для флуктуаций температуры воздуха T и скорости вертикального ветра w в случае неустойчивой с $L^* = -27,7$ м (слева) и устойчивой с $L^* = 17,9$ м (справа) стратификации в ПС

5.1.4 Методы восстановления высотных профилей метеорологических величин в приземном слое атмосферы с использованием трехуровневой УАМС АМК-03/ЗУ

Для модельного восстановления профилей температуры $T(z)$ и скорости горизонтального ветра $u(z)$ (в ПС его направление полагается $D(z) = \text{const}$) необходимо выполнить интегрирование по высоте z функций $\partial\theta(z)/\partial z$ и $\partial u(z)/\partial z$, описываемых (5.18). Данное интегрирование можно выполнить аналитически с учетом граничных условий (значений T и u на поверхности или в точке измерений). При этом получаются следующие результаты в зависимости от типа стратификации в ПС [231].

1) *Случай нейтральной (безразличной) стратификации*

$$(|L^*| > 100 \text{ и } \varphi_u(\xi) = \varphi_T(\xi) = 1).$$

В этом случае после интегрирования имеем:

а) для скорости ветра:

$$u(z) = \frac{u^*}{\chi} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right); \quad (5.26)$$

б) для потенциальной температуры:

$$\theta(z) = \frac{T^*}{\chi} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right). \quad (5.27)$$

Здесь z_0 – параметр шероховатости подстилающей поверхности (параметр, имеющий размерность высоты, который косвенно характеризует коэффициент трения земной поверхности для прилегающего к ней потока воздуха). Приведенные в (5.26) и (5.27) профили применимы начиная с высоты z , в несколько раз превышающей z_0 . При больших значениях z_0 (высокая трава, лес и т.п.) обычно вводится высота вытеснения d , определяющая уровень, от которого следует отсчитывать логарифмический профиль ветра. С ее учетом формулы (5.26) и (5.27) используются в виде:

$$u(z) = \frac{u^*}{\chi} \ln \left(\frac{z-d}{z_0} \right) \text{ и } \theta(z) = \frac{T^*}{\chi} \ln \left(\frac{z-d}{z_0} \right), \quad (5.28)$$

где для перехода от $\theta(z)$ к профилю температуры $T(z)$ необходимо учесть сухоадиабатический градиент γ_a как $T(z) = \theta(z) + \gamma_a(z - d)$.

Обычно средние значения T и u также измеряются на некоторой высоте измерений z_n , на которой размещен ультразвуковой термоанемометр, и поэтому они являются известными величинами. Это позволяет в формулах (5.28) дополнительно исключать модельный параметр z_0 , т.е. в программных расчетах профилей использовать соотношения

$$u(z) = u(z_n) + \frac{u^*}{\chi} \ln \left(\frac{z-d}{z_n-d} \right) \quad \text{и} \quad T(z) = T(z_n) + \frac{T^*}{\chi} \ln \left(\frac{z-d}{z_n-d} \right) + \gamma_a(z - z_n) \quad (5.29).$$

2) *Случай неустойчивой стратификации (конвекции)* ($|L^*| < 100$ и $L^* < 0$)

В этом случае вместо (5.28) получается:

а) для скорости ветра

$$u(z) = \frac{u^*}{\chi} \left\{ \ln \left(\frac{(1 - F_u(z)) / (1 + F_u(z))}{(1 - \tilde{F}_u(z_0)) / (1 + \tilde{F}_u(z_0))} \right) + 2 \left[\arctg(F_u(z)) - \arctg(\tilde{F}_u(z_0)) \right] \right\} \quad (5.30)$$

где $F_u(z) = \sqrt[4]{1 - 15(z-d) / L^*}$ и $\tilde{F}_u(z_0) = \sqrt[4]{1 - 15z_0 / L^*}$;

б) для потенциальной температуры

$$\theta(z) = \frac{0,74T^*}{\chi} \ln \left(\frac{(F_T(z)-1) / (F_T(z)+1)}{(\tilde{F}_T(z_0)-1) / (\tilde{F}_T(z_0)+1)} \right), \quad (5.31)$$

где $F_T(z) = \sqrt{1 - 9(z-d) / L^*}$ и $\tilde{F}_T(z_0) = \sqrt{1 - 9(z_0-d) / L^*}$.

При этом аналогично (5.29) можно записать расчетные соотношения в виде:

$$u(z) = u(z_n) + \frac{u^*}{\chi} \left\{ \ln \left(\frac{(1 - F_u(z)) / (1 + F_u(z))}{(1 - F_u(z_n)) / (1 + F_u(z_n))} \right) + 2 \left[\arctg(F_u(z)) - \arctg(F_u(z_n)) \right] \right\} \quad (5.32)$$

$$T(z) = T(z_n) + \frac{0,74T^*}{\chi} \ln \left(\frac{(F_T(z)-1) / (F_T(z)+1)}{(F_T(z_n)-1) / (F_T(z_n)+1)} \right) + \gamma_a(z - z_n) \quad (5.33).$$

3) *Случай устойчивой стратификации (приземной инверсии) ($|L^*| < 100$ и $L^* > 0$)*

В этом случае вместо (5.28) получается:

а) для скорости ветра:

$$u(z) = \frac{u^*}{\chi} \left\{ \ln \left(\frac{z-d}{z_0} \right) + 4,7(z-d-z_0)/L^* \right\}, \quad (5.34)$$

б) для потенциальной температуры:

$$\theta(z) = \frac{T^*}{\chi} \left\{ 0,74 \ln \left(\frac{z-d}{z_0} \right) + 4,7(z-d-z_0)/L^* \right\}. \quad (5.35)$$

Соответственно расчетные соотношения имеют вид:

$$u(z) = u(z_n) + \frac{u^*}{\chi} \left\{ \ln \left(\frac{z-d}{z_n-d} \right) + 4,7(z-z_n)/L^* \right\}, \quad (5.36)$$

$$T(z) = T(z_n) + \frac{T^*}{\chi} \left\{ 0,74 \ln \left(\frac{z-d}{z_n-d} \right) + 4,7(z-z_n)/L^* \right\}.$$

Высота приземного слоя атмосферы $H_{\text{пр}}$, до которой теоретически обосновано применение приведенных здесь соотношений для модельных расчетов профилей метеорологических величин, в большинстве случаев не превышает нескольких десятков метров. Только в относительно редких случаях, когда стратификация атмосферы близка к безразличной (при $|L^*| > 100$), $H_{\text{пр}}$ может значительно превышать 100 м. Учитывая опытные данные, обычно полагают, что при устойчивой стратификации $H_{\text{пр}}$ является величиной, сравнимой с L^* ($H_{\text{пр}} \sim L^*$), а при неустойчивой стратификации – $H_{\text{пр}} \sim 5 |L^*|$.

Использование УАМС АМК-03/3У позволяет непосредственно получить данные для граничных условий интегрирования и аналитически определить параметры стратификации приземного слоя атмосферы. На рис. 5.8 и 5.9 приведены примеры восстановления профилей $T(z)$ и $u(z)$ из мгновенных данных УАМС АМК-03/3У измеренных в два 10-ти минутных интервала, соответствующих противоположным типам стратификации в ПС [224].

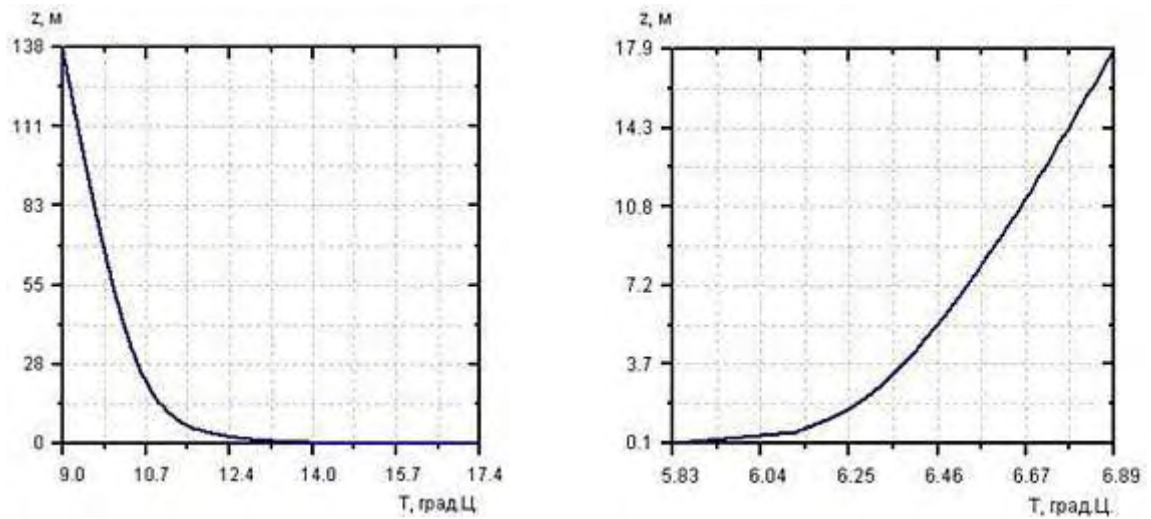


Рисунок 5.8 - Восстановленные профили $T(z)$ в случае неустойчивой с $L^* = -27,7$ м (слева) и устойчивой с $L^* = 17,9$ м (справа) стратификации в ПС

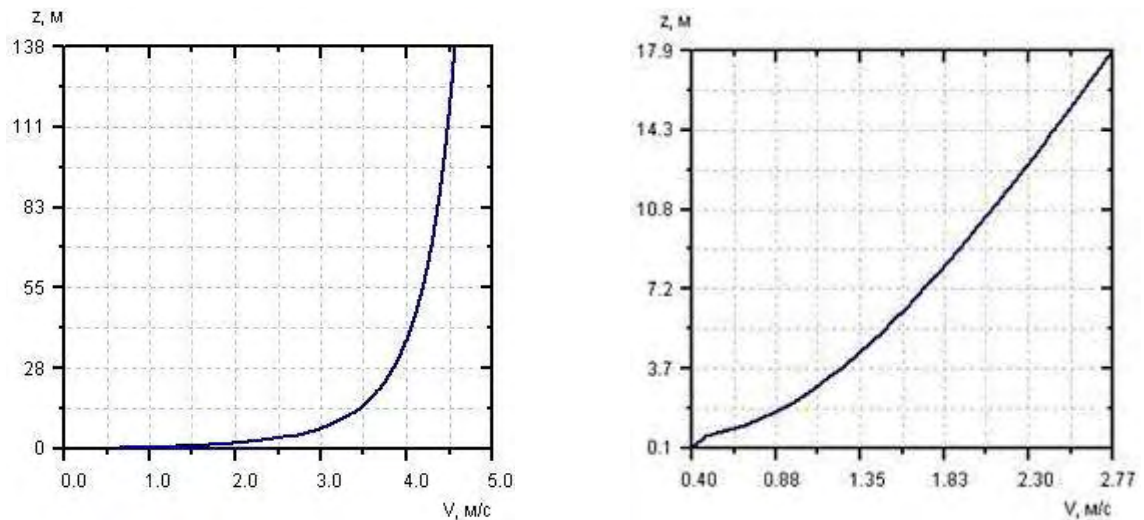


Рисунок 5.9 - Восстановленные профили $u(z)$ в случае неустойчивой с $L^* = -27,7$ м (слева) и устойчивой с $L^* = 17,9$ м (справа) стратификации в ПС

5.2 Технические аспекты реализации системы мезомасштабного экологического и метеорологического мониторинга АПС

5.2.1 Измерительно-вычислительная система ИМС-МЕТЕО-3

5.2.1.1 Для экспериментальной апробации методов контроля АПС и используемых технических решений был предварительно разработан, создан и размещен в окрестностях г. Томска прототип системы ЭО ИВС (измерительно-

вычислительная система ИМС-МЕТЕО-3) [222, 223, 224], инструментальную основу которой составляла сеть стационарных постов УАМС АМК-03 (см. 2.3.1 настоящей работы).

Места территориального расположения постов наблюдений в ИМС-МЕТЕО-3 выбирались, исходя из нескольких критериев: 1) нахождение в розе основных ветров Томской области; 2) близость расположения к стационарным источникам питания; 3) возможность использования сотовой связи для передачи данных с постов АМС на сервер сбора информации; 4) вандализационность мест установки аппаратуры [239].

ИМС-МЕТЕО-3 включала в себя три стационарных метеорологических поста наблюдений (цифра «3» в названии системы говорит о количестве измерительных постов). Первый пост был пространственно совмещен с сервером в ИМКЭС СО РАН (на восточной окраине г. Томска), а два других были вынесены из г. Томска – один в аэропорт "Богашево"; второй на научный стационар ИМКЭС СО РАН "Кедр" в с. Курлек (в 300 м от берега р. Томь). На рис. 5.10,а показано размещение указанных постов наблюдений ИМС-МЕТЕО-3 с указанием расстояний между ними (в километрах). На рис. 5.10,б показана ИМС с временным постом "Половинка" [250, 251, 252]. При этом расстояния между всеми постами были уточнены.

В табл. 5.2 приведены значения географических координат всех постов и высоты точек измерений относительно уровня моря и поверхности земли.

Таблица 5.2 - Параметры размещения постов наблюдений в ИМС-МЕТЕО-3

Наименование поста	Высота измерений, м, над		Широта	Долгота	Год введения в работу
	уровнем моря	поверхностью земли			
"ИМКЭС"	198	30	56°28'33,1"	85°03'14,7"	2009
"Богашево"	214	27	56°22'24,3"	85°11'30,9"	2010
"Курлек"	99	12	56°13'32,7"	84°51'57,9"	2011
Половинка"	71	4	56°42'37,1"	84°22'59,3"	2013-2014

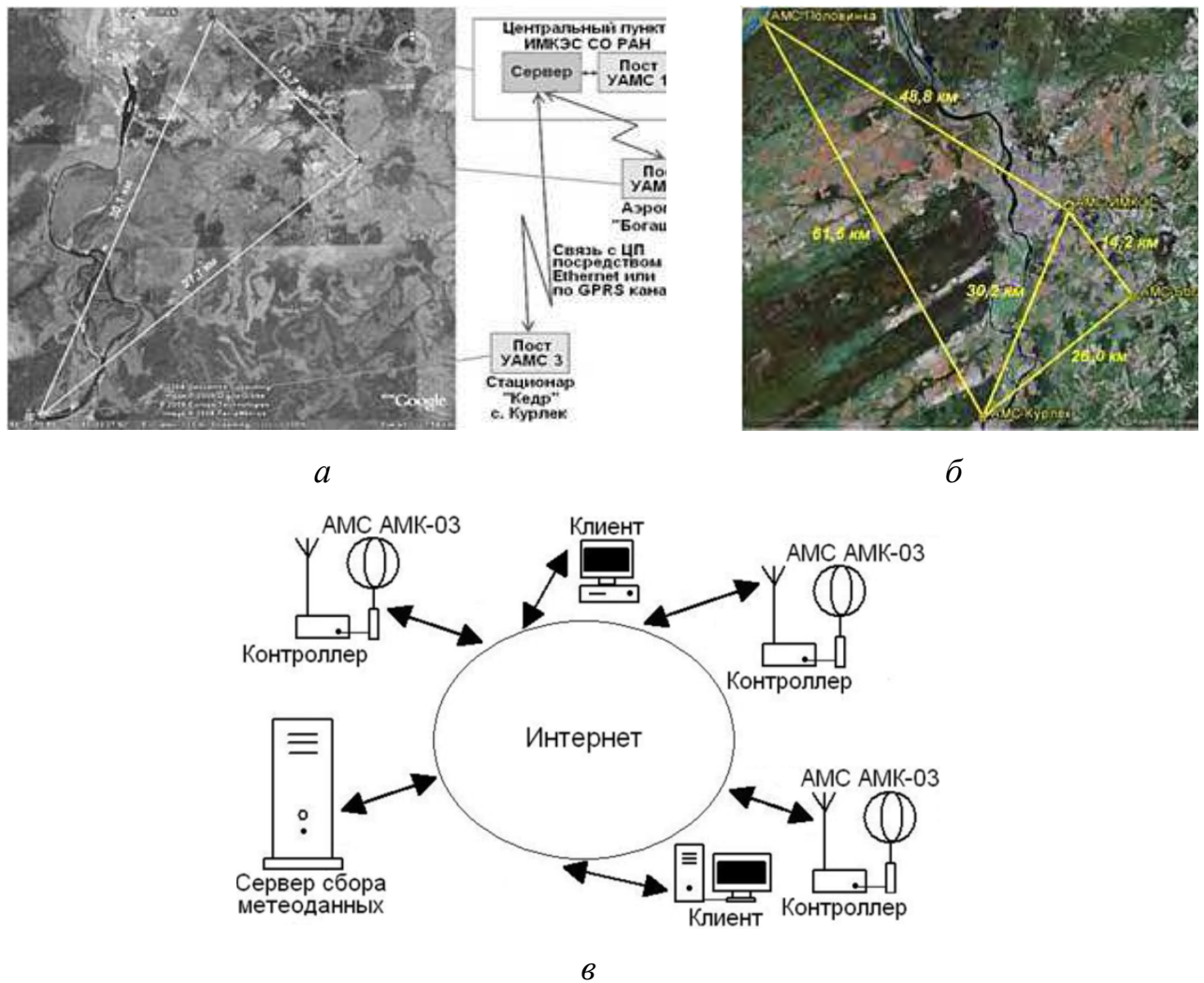


Рисунок 5.10 - Территориально-распределенная ИМС МЕТЕО-3: *а* – схема размещения постов наблюдений с УАМС АМК-03; *б* – схема размещения с временным постом "Половинка"; *в* – схема построения системы связи и обмена информацией между постами и сервером

5.2.1.2 Для построения ИМС-МЕТЕО-3 были использованы специально разработанные под требования АМК-03 коммутационные контроллеры [232], которые могут осуществлять передачу на сервер информационных пакетов с первичными данными измерений УАМС АМК-03 (рис. 5.11) [250, 251].

Каждый используемый контроллер соединяется с сервером сбора данных через Интернет (рис. 5.11,б) с помощью встроенных в него интерфейса связи Ethernet (кабельный канал) и/или GSM-GPRS модема (канал сотовой связи).

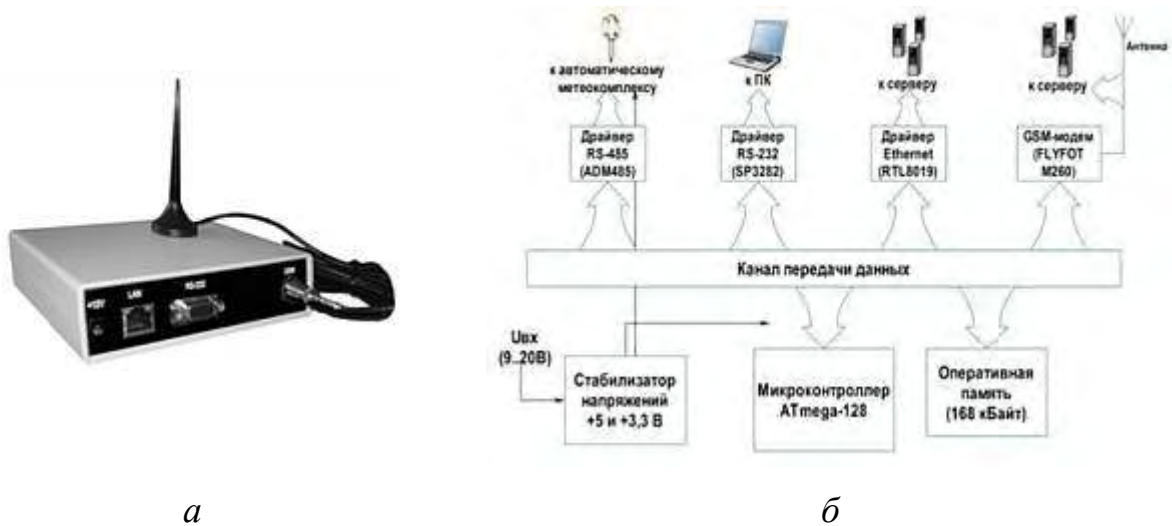


Рисунок 5.11 - GPRS-контроллер: а – внешний вид; б – структурная схема

Наличие в модеме лифтов для двух SIM-карт обеспечивает беспроводную работу контроллера в сетях двух операторов мобильной связи стандарта GSM. Для обеспечения буферизации, первоначальной обработки и передачи данных устройство оснащено оперативной памятью емкостью 64 кбайт [233]. Алгоритм работы контроллера обеспечивает специально разработанная компьютерная программа [234].

5.2.2 Программное обеспечение системы ИМС-METEO

Функционирование ИМС-METEO [235] обеспечивают специализированные компьютерные программы: «METEO-SERBER» (устанавливается на центральном сервере системы) и «AMK-netClient» (устанавливается на ПК пользователя) которые совместно выполняют следующие задачи [231]:

- проверку работоспособности УАМС АМК-03, используемых в сети [252 – 256];
- установку периодичности передачи GPRS-контроллером информационных пакетов;
- установку времени усреднения данных измерений УАМС АМК-03, включаемых в информационные пакеты GPRS-контроллера, или отказаться от их усреднения (с прореживанием данных УАМС АМК-03 в соответствии с установленным значением Δt_{reg});

- декодирование и сохранение данных, поступающих от метеостанций на сервере;
- формирование, кодирование, передачу и декодирование команд управления режимами работы метеостанций;
- обработку и форматирование данных, поступающих с метеостанций, и передачу их на клиентские рабочие станции;
- вычисление фактических значений метеорологических величин по первичным данным, полученным от метеостанций, и представление их в формате, доступном пользователю;
- удаление при необходимости в базе данных некорректных записей;
- организацию системы санкционированного доступа пользователей к ресурсам информационно-измерительной системы.

На рис. 5.12 представлено главное окно программы «МЕТЕО-СЕРВЕР», предназначенное для выбора пользователем метеостанции (группы метеостанций, до $Z = 15$), с которых запрашивается информация [235].

В 1-м столбце таблицы показано количество пакетов информации, полученных от метеостанции и ее состояние на данный момент времени: зеленым цветом выделяются метеостанции, передающие информацию в момент соединения, желтым – метеостанции, соединение с которыми осуществлено, но информация, по каким-либо причинам, не поступает, красным – метеостанции, соединение с которыми на данный момент времени отсутствует. Это позволяет оператору быстро оценивать функциональное состояние системы в целом. Также указываются серийные (или порядковые) номера метеостанции, подключенных к системе, места их расположения, телефонные номера и IMEI-коды. Кроме того, приводится установленная частота передачи данных для каждой метеостанции.

Все параметры системы, включая регистрацию новых и удаление имеющихся пользователей, управление их правами и пр., доступны для редактирования администратору системы.

Приборы	Пользователи	Импорт данных	Выйти			
ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ ПРИБОРОВ 01.08.2011 16:09:27						
Коннект	Серийный номер	Размещение	Телефон	IMEI-код	Усреднение (кадров)	Добавить
2	66	Отладочный	+790627801081	353098003375356	10	редактировать удал
15418399	67	Анжино	+7913-869-51-98	353098003375357	10	редактировать удал
1723934	68	ИМКЭС	Ethernet	353098007344978	10	редактировать удал
2063061	69	Богашево	+7913-869-62-52	353098003375358	10	редактировать удал
213073	70	Польнянка	+790627801084	353098003375359	100	редактировать удал
213148	71	Новый 2		353098003372510	10	редактировать удал
213148	72	Новый 3		353098003836134	1	редактировать удал
213148	73	Новый 4			300	редактировать удал
213148	74	Новый 5		359986013187189	60	редактировать удал
213148	75	Новый 6			1	редактировать удал
213148	76	Autoappend		353098007344978	10	редактировать удал
213148	1000	Autoappend		353098007344978	60	редактировать удал
213148	10066	Autoappend		353098003372510	1	редактировать удал

Рисунок 5.12 - Главное окно ПО «МЕТЕО-СЕРВЕР»: страница контроля и управления ИВС-МЕТЕО-Z (Z – число контролируемых АМС)

В программе "АМК-netClient" реализована система автоматической подготовки (математического усвоения) метеорологических данных для их последующего практического использования в прикладных задачах. Она выполнена как создание для выбранного поста наблюдений, с учетом установленных пользователем параметров обработки, упорядоченных временных рядов значений метеорологических величин с одинаковым временем усреднения Δt_{aver} (от 1 до 20 минут) и с одинаковым интервалом между моментами времени их регистрации Δt_{reg} (от 1 минуты до 24 часов). При этом, данные сервера анализируются на их достоверность по критерию резкого изменения временной производной вычисленных метеорологических величин (их природные изменения происходят на порядки более медленно, чем вследствие возможных технических сбоев в работе ИМС). Отбракованные вычисленные значения метеорологических величин в программе "АМК-netClient" заменяются на их интерполяционные значения по соседним по времени достоверным данным выбранной метеостанции. Из созданных ею временных рядов значений метеорологических величин

формируются числовые массивы выходных данных, которые могут записываться в файлы для передачи в другие программы и/или отображаться на экране монитора в виде временных графиков.

В клиентском окне программы (рис. 5.13) отображаются не только метеорологические величины, измеряемые метеостанцией, но и характеристики самой станции – ее номер, углы отклонения датчика метеопараметров от вертикали (G_x° , G_y°), значения которых учитываются при вычислении параметров ветра, параметры усреднения метеоданных, статус соединения с сервером и др.

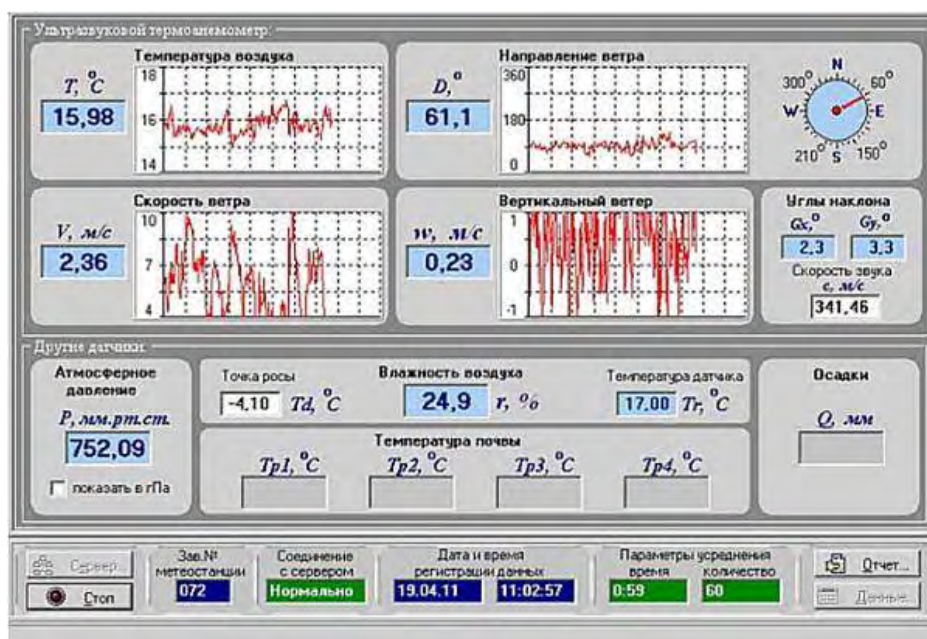


Рисунок 5.13 - Интерфейс пользователя программы «АМК-netClient».

На рис. 5.14 показан пример, как выглядят графически после обработки в "АМК-netClient" с усреднением за $\Delta t_{aver} = 1$ минута и при $\Delta t_{reg} = \Delta t_{aver}$ данные измерений метеорологических параметров P , T , V и D на 4-х постах ИМС при их синхронном наложении [236].

Несмотря на взаимную удаленность на десятки километров постов наблюдений в ИМС, здесь заметно прослеживается подобие временной изменчивости измеряемых в них значений метеорологических величин (отличия абсолютных значений давления обусловлены в основном разностями высот точек измерений над уровнем моря, см. табл. 5.2)

Рис. 5.14 отображает типичное для г. Томска развитие зимы: ее начальный период с неустойчивой погодой и с продолжительными снежными осадками с переходом к условиям сибирского антициклона с его экстремально высокими значениями для атмосферного давления и низкими для температуры воздуха при отсутствии облачности [254, 255].

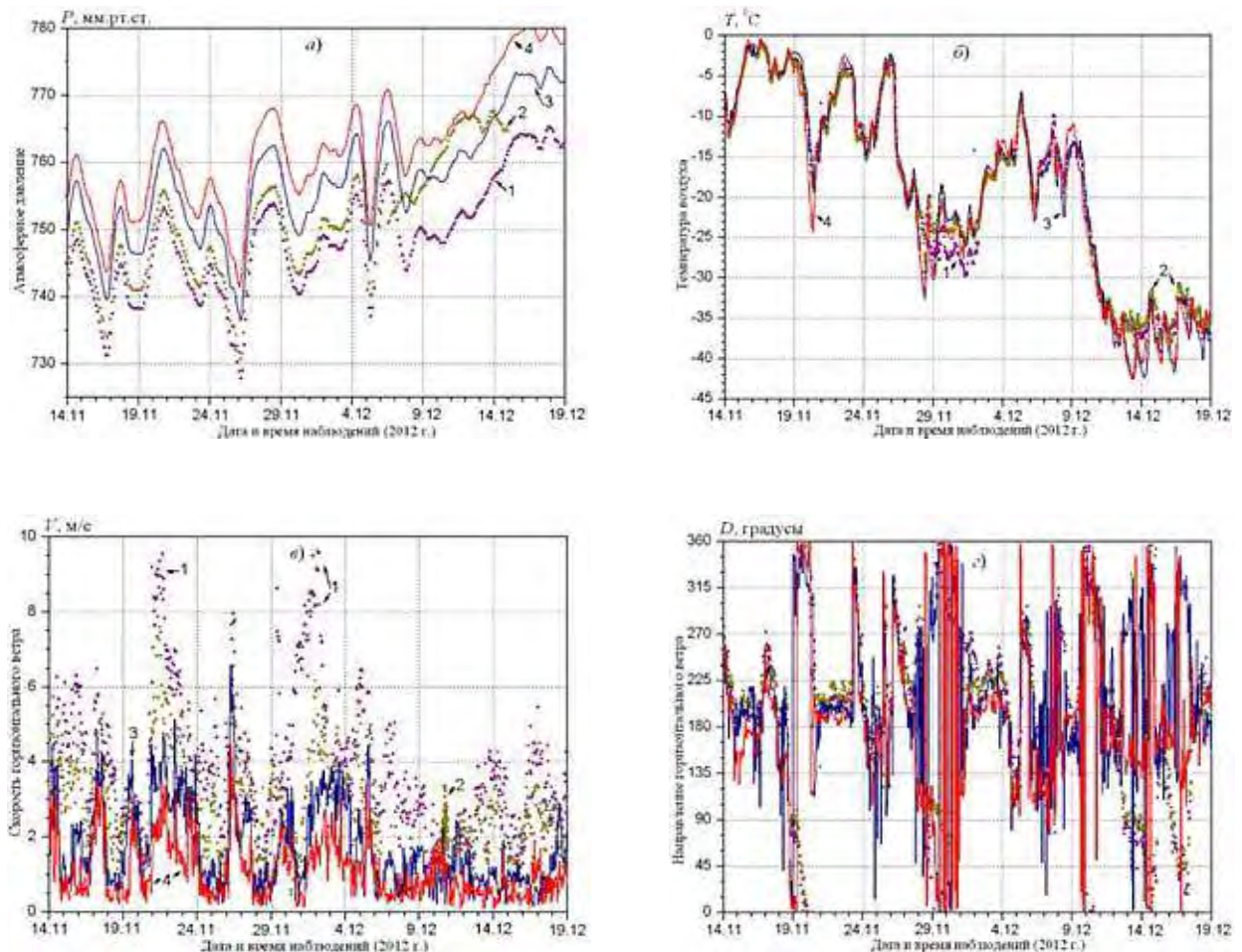


Рисунок 5.14 - Пример сравнительного наложения данных синхронных измерений на всех 4-х постах ИМС за период с 14 ноября по 18 декабря 2012 г. при их 1-минутном усреднении: а) – для давления; б) – для температуры; в) – для скорости горизонтального ветра; г) – для его направления. Здесь: 1 (точки фиолетового цвета) – данные для поста "Богашево"; 2 (точки зеленого цвета) – для поста "ИМКЭС" (для этого поста имеется пропуск наблюдений с 10:40 6.12.2012 по 11:30 10.12.2012); 3 (сплошные линии синего цвета) – для поста "Курлек" и 4 (сплошные линии красного цвета) – для поста "Половинка". Для уменьшения плотности отображения часть данных в виде точек показана выборочно

5.3 Автоматизированная система ЭО ИВС для реализации технологии мезомасштабного экологического и метеорологического мониторинга состояния АПС

5.3.1 Архитектура и состав автоматизированной системы ЭО ИВС

5.3.1.1 Проведенный аналитический обзор и теоретические исследования новых методов экологического и метеорологического контроля состояния АПС, созданный и экспериментально апробированный прототип системы контроля метеорологических и турбулентных параметров приземной атмосферы (ИМС-МЕТЕО), а также разработанные программно-аппаратные комплексы и приборы для локального и дистанционного контроля характеристик АПС и содержащихся в воздухе атмосферы поллютантов, позволяют разработать концепцию комплексной автоматизированной системы для реализации технологии мезомасштабного экологического и метеорологического мониторинга состояния АПС, а также для исследований новых методов и натурной апробации алгоритмов восстановления мезомасштабных полей метеорологических величин и сверхкраткосрочного прогнозирования развития метеорологической ситуации [237, 240].

Комплексная автоматизированная система должна состоять из некоторого количества стационарных измерительных комплексов, образующих пространственно-разнесенную мезомасштабную измерительную сеть (рис.5.15). Конфигурация сети должна позволять применять алгоритмы интерполяции и экстраполяции для восстановления значений метеорологических величин в произвольных точках контролируемой территории. Расстояния между стационарными постами должны соответствовать радиусам корреляции метеорологических величин, определенных в п. 5.2 настоящей главы.

Стационарные измерительные посты должны быть дополнены мобильным измерительным комплексом, позволяющим выполнять измерения экологических и метеорологических характеристик АПС в произвольных точках контролируемой территории. Мобильный измерительный комплекс существенно расширяет

функциональные возможности системы контроля, позволяет изменять конфигурацию системы в зависимости от фактической экологической и метеорологической ситуации, выполнять контрольные измерения при тестировании новых алгоритмов восстановления полей метеорологических параметров АПС и прогнозирования развития метеоситуации [254, 255].

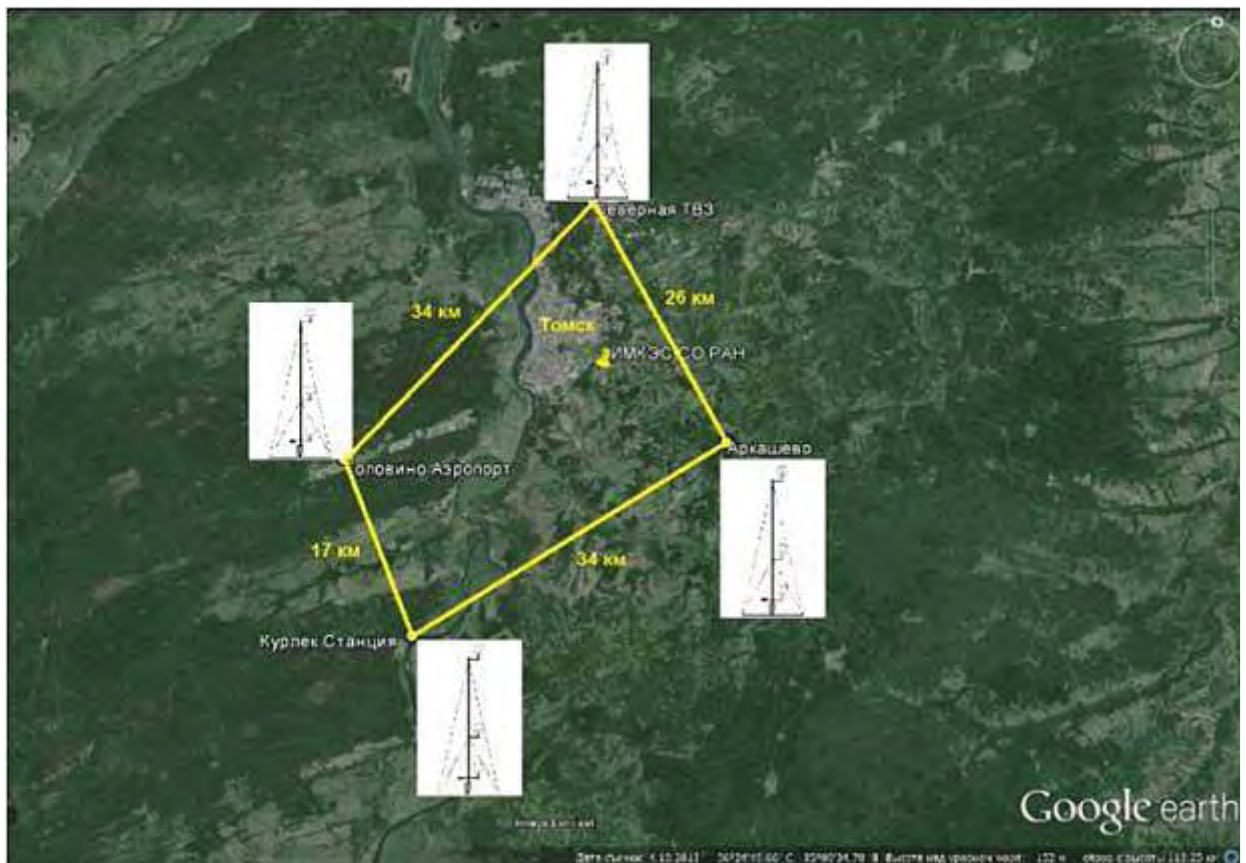


Рисунок 5.15 - Схема территориального размещения стационарных измерительных постов системы ЭО ИВС

Практическая реализация автоматизированной системы ЭО ИВС выполнена на основе новых измерительных приборов и комплексов, подробное описание которых приведено в диссертации:

- УАМС АМК-03/3у (АМК-03/3у(О)) – в п. 2.3.1;
- переносной метеокомплекс «ЭКСМЕТЕО» – в п. 2.3.2;
- бортовой автоматический метеокомплекс АМК-03Б – в п. 2.3.3;
- оптический измеритель осадков ОПТИОС – в п. 2.2.3;

- портативная ультразвуковая метеостанция ПУМС-БПЛА – в п. 3.1.3;
- портативная электронная метеостанция ПЭМС – в п. 3.1.3;
- мобильный ртутный газоанализатор (РГА/м) – в п. 4.2.3;
- мобильный многокомпонентный СКР-газоанализатор СКР/м – в п. 4.4.3;
- контроллер сбора и обработки данных (КСОД) – в п. 5.3.1.

Согласно выработанной концепции ЭО ИВС имеет в своем составе стационарный измерительный комплекс (СТИК), мобильный измерительный комплекс (МИК) и центр обработки данных (ЦОД) ИВС (рис. 5.16) [42, 237– 240].

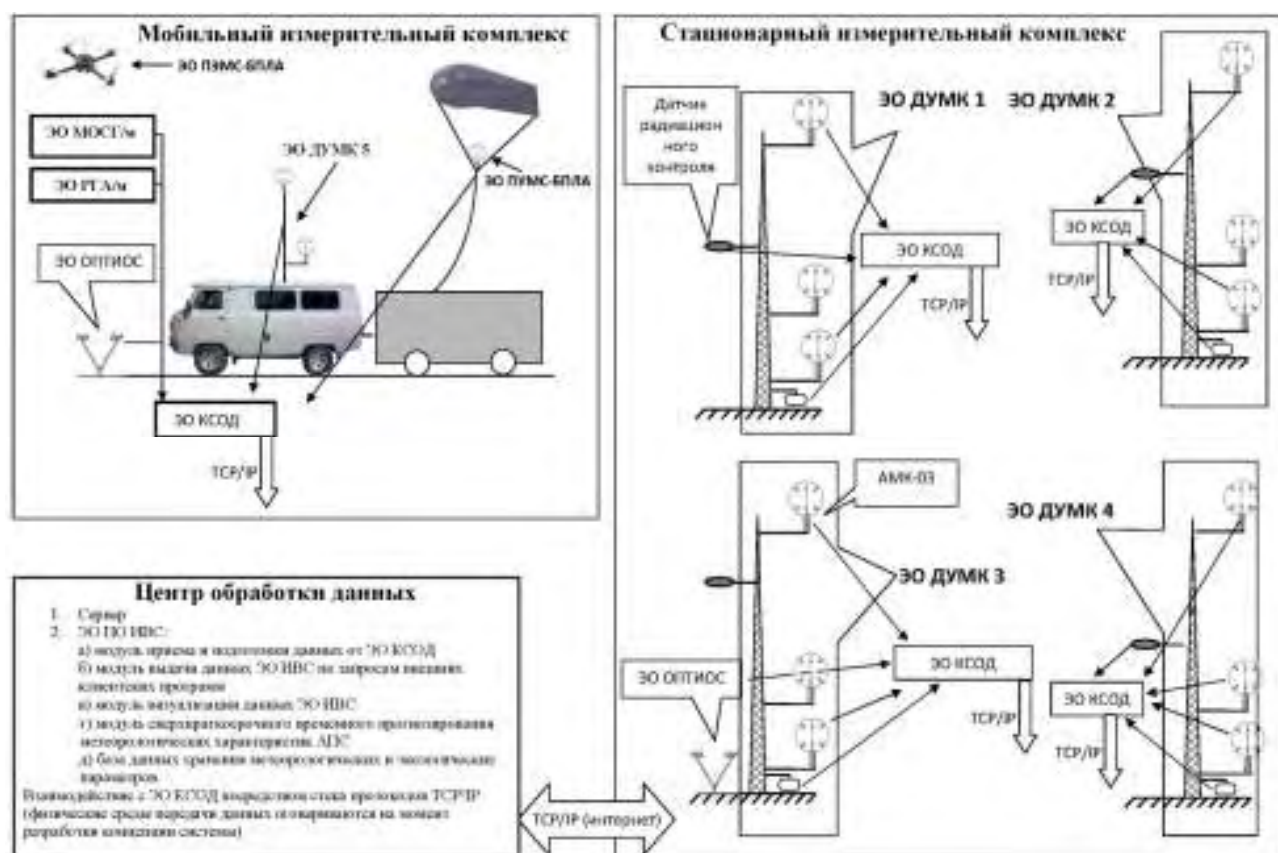


Рисунок 5.16 - Структурная схема ЭО ИВС

В состав СТИК входят следующие измерительные приборы, комплексы и вспомогательное оборудование:

- три пространственно-разнесенных УАМС АМК-03/3у с модулем контроля атмосферного электричества и датчиком уровня радиационного фона, осуществляющие измерения мгновенных и средних значений метеовеличин на

трех высотных уровнях, а также контроль напряженности электрического поля и уровня γ -фона в атмосфере;

- одна УАМС АМК-03/3У(О) с датчиком уровня радиационного фона, осуществляющая измерение мгновенных и средних значений метеовеличин на трех высотных уровнях, определение микроструктурных и интегральных характеристик атмосферных осадков и контроль уровня γ -фона в атмосфере;

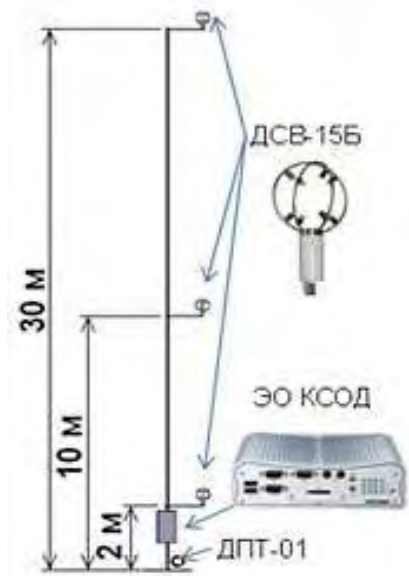
- четыре (по числу измерительных постов СТИК) контроллера сбора и обработки данных (КСОД), осуществляющих прием, первичную обработку и передачу данных с измерительных блоков СТИК (см. п 5.3.1.3);

- четыре (по числу измерительных постов СТИК) метеомачты МАРС-3-15 (высота 30 метров) для установки измерительных блоков УАМС АМК-03/3у и АМК-03/3у(О);

- четыре (по числу измерительных постов СТИК) термостатированных бокса для установки КСОД.



а



б



в

Рисунок 5.17 - Состав одного из постов СТИК: а –метеомачта МАРС-3-15; б – схема размещения метеодатчиков; в – ОПТИОС

В состав МИК (рис. 5.18) входят следующие измерительные комплексы, приборы и вспомогательное оборудование:

- бортовой автоматический метеокomплекс АМК-03Б осуществляющий измерение мгновенных и средних значений метеовеличин на высоте шесть метров на произвольно выбранной площадке;
- переносной автоматизированный метеокomплекс «ЭКСМЕТЕО», осуществляющий измерение мгновенных и средних значений метеовеличин на высоте четыре метра на произвольно выбранной площадке;



- оптический измеритель осадков ОПТИОС, осуществляющий определение микроструктурных и интегральных характеристик атмосферных осадков на произвольно выбранной площадке;
- модуль контроля атмосферного электричества, осуществляющий контроль напряженности электрического поля в атмосфере
- датчик уровня радиационного фона, осуществляющий контроль уровня γ -фона в атмосфере;
- портативная ультразвуковая метеостанция ПУМС-БПЛА, устанавливаемая на беспилотном летательном аппарате, для обеспечения метода контактного определения вертикальных профилей метеорологических и турбулентных характеристик АПС;
- портативная электронная метеостанция ПЭМС-БПЛА, устанавливаемая на беспилотном летательном аппарате для обеспечения метода контактного определения вертикальных профилей метеорологических характеристик АПС;
- мобильный многокомпонентный газоанализатор СКР/м, осуществляющий измерения концентраций в воздухе приземного АПС следующих газов: оксида углерода, диоксида углерода, оксида азота, диоксида азота, метана, метанола, диоксида серы, аммиака, формальдегида, бензола, толуола;
- мобильный ртутный газоанализатор РГА/м, осуществляющий измерения концентраций в воздухе приземного АПС измерения концентрации в воздухе приземного АПС паров ртути;
- КСОД, осуществляющих прием, первичную обработку и передачу данных с измерительных комплексов МИК;
- транспортер для установки и транспортировки мобильных измерительных комплексов, входящих в состав МИК ИВС;
- БПЛА геликоптерного типа для подъема на заданную высоту ПЭМС-БПЛА;
- БПЛА на основе малогабаритного привязного аэростата для подъема на заданную высоту ПУМС-БПЛА ПЭМС-БПЛА;
- система электропитания для измерительных комплексов и дополнительного оборудования МИК;

- газонаполнительная система для обеспечения полетов БПЛА (привязного аэростата).

Все полученные данные от СТИК и МИК поступают в ЦОД ИВС, который осуществляет накопление и обработку данных и их визуализацию. Для этого в состав ЦОД ИВС входит сервер для накопления и обработки данных и программное обеспечение ИВС в составе:

- модуль приема и подготовки метеоданных от ЭО КСОД;
- модуль выдачи данных ЭО ИВС по запросам внешних клиентских программ;
- модуль визуализации данных ЭО ИВС;
- модуль базы данных измеренных метеорологических и экологических параметров АПС.

В такой концепции построения системы ЭО ИВС мобильный комплекс МИК может функционировать как в составе системы, так и в качестве отдельного автономного мобильного аналитического комплекса.

5.3.1.2 Для получения, усвоения и предварительной обработки данных от составных частей ЭО ИВС (УАМС АМК-03/3у, УАМС АМК-03/3у(О), ОПТИОС, ПЭМС-БПЛА, ПУМС-БПЛА, СКР/м, РГА/м, датчика γ -фона) в состав ЭО ИВС входит контроллер сбора и обработки данных КСОД. В его функции входят также определение типа стратификации и высотных профилей метеорологических и турбулентных характеристик АПС, определение вертикальных градиентов высотных профилей метеорологических характеристик АПС, подготовка и передача обработанных данных в ЦОД ИВС.

КСОД сконструирован на основе промышленного встраиваемого компьютера NEXCOM NISE-2200 на базе процессора Intel Atom D2550 (рис. 5.19). Компьютер дополнен модулем передачи GPRS и модулем спутниковой навигации GPS.



Рисунок 5.19 - Промышленный компьютер NEXCOM NISE-2200: *а* – вид спереди; *б* – вид сзади

Характеристики компьютера NEXCOM NISE-2200:

- процессор IntelAtomD2550 с тактовой частотой 1,86 ГГц;
- размер оперативной памяти 4 ГБ;
- размер постоянной памяти 128 ГБ;
- порты ввода вывода: 2xEthernet до 1 Гбит, модуль GPS/GPRS, 2xRS-232, 4xRS-232/485, 6xUSB 2.

Условия эксплуатации NEXCOM NISE-2200:

- а) электропитание от источника постоянного тока 9 ... 36 В;
- б) температура окружающей среды от –20 до +65 °С.

КСОД устанавливается непосредственно на метеорологической мачте в специально разработанном термобоксе (рис. 5.20), который обеспечивает вандалозащищенность и работоспособность КСОД до температуры минус 40 °С. Все датчики УАМС АМК-03/3у соединяются с КСОД посредством специально разработанной коллекторной колодки КЛК-04. Осадкомер ОПТИОС подсоединяется посредством порта USB.

Для передачи данных в ЦОД используется сеть Ethernet или GPRS-радиоканал.

КСОД может работать под операционными системами Windows версии не ниже XP и операционными системами Linux. Краткое описание программного обеспечения КСОД приведено в п. 5.3.2.

*а**б*

Рисунок 5.20 - КСОД в составе поста СТИК системы ЭО ИВС:

а – термобокс на мачте МАРС-3-15; *б* – открытый термобокс с установленными в нем КСОД (вверху справа) и вторичным источником питания.

Центр обработки данных ЦОД ИВС выполняет следующие функции:

- а) прием от КСОД, входящих в состав постов СТИК, и КСОД МИК результатов метеорологических и экологических измерений, выполняемых составными частями ЭО ИВС;
- б) сохранение этих результатов в базе данных измеренных метеорологических и экологических параметров АПС;
- в) выдачу сохраняемых данных по запросам внешних клиентских программ;
- г) осуществление по запросам пользователей визуализации на мониторе данных, хранящихся в базе данных, в графическом и табличном виде;
- д) осуществление сверхкраткосрочного прогнозирования основных метеорологических величин на 4 часа вперед на основе данных, полученных при приземных измерениях метеорологических характеристик АПС.

В качестве сервера в ЦОД ИВС используется сервер HP ProLiant DL585 G7 на базе процессоров Opteron 6386SE:

- 1) количество процессоров 4;
- 2) количество вычислительных ядер 64;

- 3) оперативная память 128 ГБ;
- 4) дисковое пространство 4 ТБ.

На сервере размещается программное обеспечение компонентов (модулей) ПО ИВС и база данных (результаты измерений параметров АПС). Краткое описание программного обеспечения ЦОД ИВС приведено ниже.

С данными, поступающими в режиме реального времени с запущенной в опытную эксплуатацию первой очереди ЭО ИВС, можно ознакомиться по ссылке <http://mon.imces.ru/>.

5.3.2 Программное обеспечение системы ЭО ИВС

5.3.2.1 Программное обеспечение системы ЭО ИВС является многоуровневым продуктом, обеспечивающим функционирование ЭО ИВС в автоматическом (автоматизированном) режиме [244].

Первый (нижний) уровень ПО ЭО ИВС представляет собой автономные компьютерные программы «МЕТЕО 3.0», «АМК-СОФТ-4», «RCScore» «OPTIOScore» и др., обеспечивающие работу отдельных автоматических измерительных приборов и комплексов, входящих в ЭО ИВС (УАМС АМК-03/3у, УАМС АМК-03/3у(О), ОПТИОС, АМК-3Б, «ЭКСМЕТЕО», ПУМС, ПЭМС, РГА/м, СКР/м). Подробное описание этих программ приведено в соответствующих параграфах настоящей работы, описывающих эти приборы и комплексы.

Второй уровень ПО ЭО ИВС – ПО КСОД – функционирует в КСОД на основе операционной системы Windows 7, взаимодействует по определенным протоколам обмена с автономными компьютерными программами составных частей ИВС и с ПО ЦОД, обеспечивает сбор измерительных данных от составных частей ИВС, их предварительную обработку, вычисление метеорологических и турбулентных параметров и их корреляционных моментов, определение типа стратификации в АПС, восстановление вертикальные профилей температуры и скорости ветра и выполняет передачу данных в ЦОД ИВС.

Третий (верхний уровень) ПО ЭО ИВС функционирует на сервере ЦОД ИВС и взаимодействует с ПО КСОД и компьютерами пользователей системы.

5.3.2.2 ПО КСОД имеет блочное строение и состоит из следующих программных модулей (рис. 5.21) [244]:

- 1) ПО «Менеджер сбора данных»,
- 2) ПО «KSOD Database Agent»,
- 3) ПО «KSOD GPS Agent».

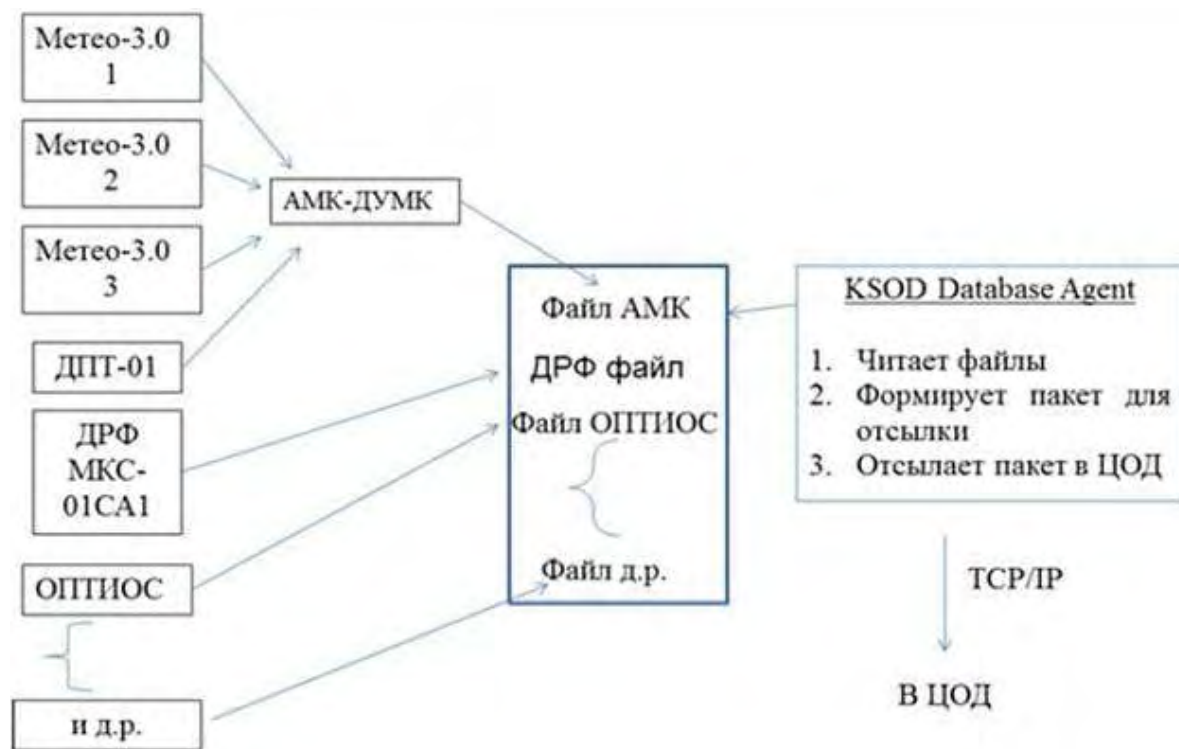


Рисунок 5.21 - Схема взаимодействия ПО в ЭО КСОД

Модуль «Менеджер сбора данных» собирает файлы данных, которые формируются составными частями ЭО ИВС: ЭО ДУМК, ЭО ОПТИОС, ЭО ПУМС-БПЛА, ЭО ПЭМС-БПЛА, ЭО РГА/м, СКР/м, датчик радиационного фона и др. (предусмотрена возможность расширения списка контактов). Скриншот соответствующего окна программы показан на рис. 5.22. В данном модуле осуществляется, также предварительная обработка данных, вычисление метеопараметров и их корреляционных моментов, определение типа стратификации в АПС, восстановление вертикальных профилей температуры и скорости ветра.

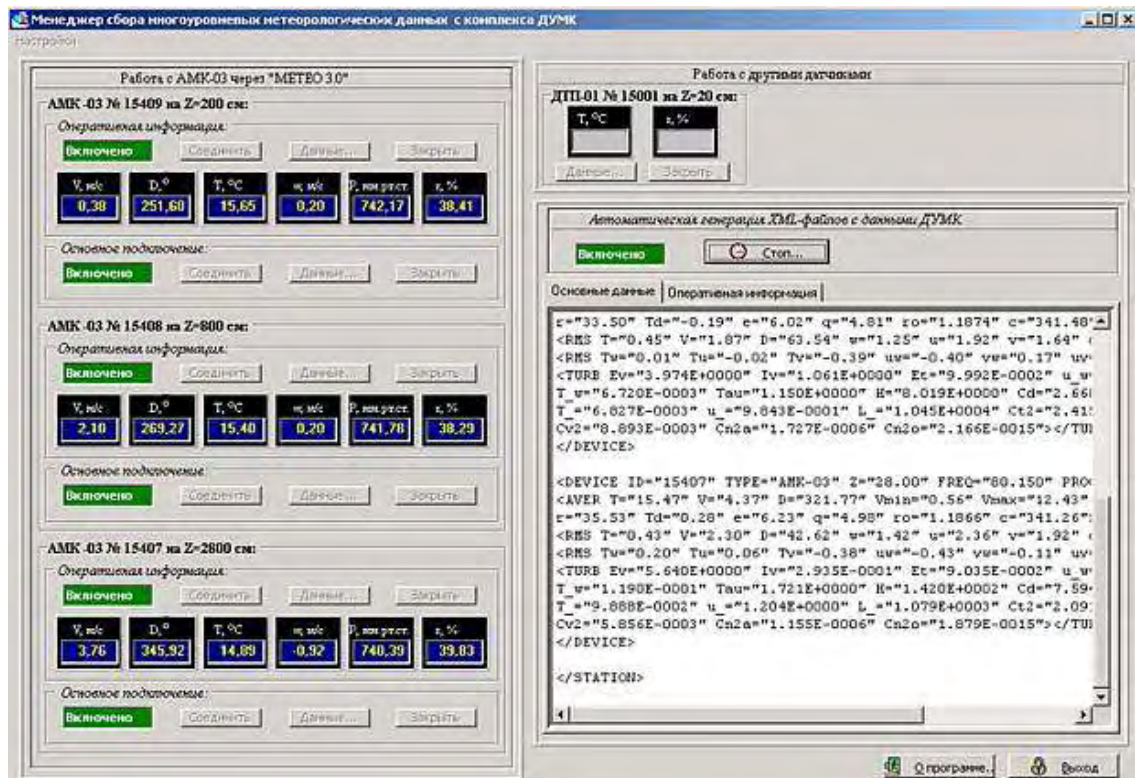


Рисунок 5.22 - Скриншот программы «Менеджер сбора данных» с поста СТИК

Модуль «KSOD Database Agent» обрабатывает данные с учетом требований к формату данных, формирует и отправляет запросы на запись обработанных данных в базу данных ЦОД ИВС, контролирует корректность и полноту передачи данных от измерительных комплексов ИВС к ЦОД ИВС.

Программное обеспечение КСОД, работающего в составе МИК, имеет дополнительный модуль «KSOD GPS Agent», который решает функциональные задачи, связанные с ориентацией МИК на местности:

- а) обнаруживает и инициализирует GPS датчик, установленный на оборудовании КСОД в МИК;
- б) обнаруживает и опрашивает выходной канал датчика (NMEA COM порт), дожидаясь получения устойчивых текущих координат;
- в) формирует и сохраняет файл с координатами для дальнейшей обработки и отправки в ЦОД ИВС программой "KSOD Database Agent".

Обмен информацией между измерительными комплексами системы (уровнем 1) и КСОД (уровнем 2) осуществляется согласно протоколам обмена компьютерных программ составных частей ЭО ИВС.

5.3.2.3 ПО ЦОД ИВС (третий уровень ПО ЭО ИВС) так же имеет блочное строение и состоит из следующих программных модулей [244]:

- 1) модуль приема и подготовки данных (МППД) от КСОД;
- 2) модуль выдачи данных (МВД) ЭО ИВС по запросам внешних клиентских программ;
- 3) модуль визуализации данных (МВИЗД) ЭО ИВС;
- 4) модуль сверхкраткосрочного временного прогнозирования (МСКВП) метеорологических характеристик АПС на основе данных приземных наблюдений;
- 5) база данных (БД) измеренных метеорологических и экологических параметров АПС.

МППД получает данные от КСОД в формате CSV через протокол HTTP и обеспечивает их сохранение в собственной оперативной базе данных. МППД функционирует внутри приложения HTTP сервера Nginx, способного работать под управлением операционных систем семейства UNIX. На рис. 5.23 приведена схема взаимодействия компонентов модуля приема и подготовки данных от КСОД.

Прием данных происходит согласно протоколу HTTP 1.1 с последующей передачей данных через библиотеку libpq в СУБД PostgreSQL. Взаимодействие модуля с СУБД осуществляется специальным семейством SQL запросов типа COPY. Преобразование универсального указателя ресурса (URL) в SQL запрос осуществляется средствами HTTP сервера Nginx, исходя из информации, заданной в конфигурационном файле сервера.

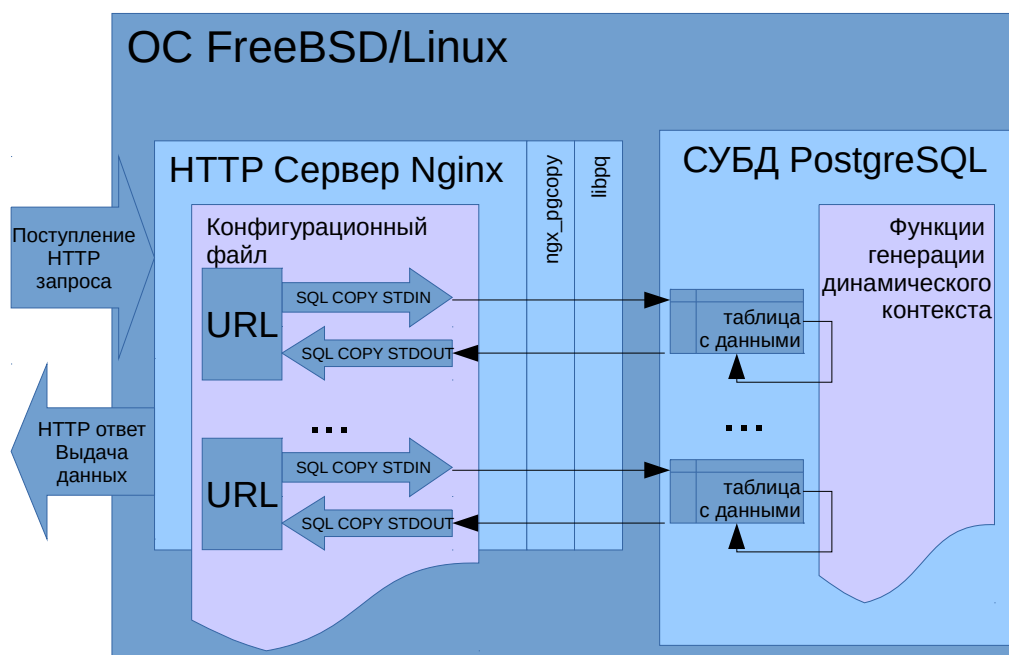


Рисунок 5.23 - Схема функционирования МППД

Защита от несанкционированного доступа и модификации данных на сервере реализована при помощи проброса идентификационных сведений из заголовков HTTP в формате basic authentication в поток установки подключения к СУБД PostgreSQL по логину и паролю. Прием и выдача информации производится по HTTP запросу в виде документов формата csv (значения разделены запятыми). Прямые ограничения на объемы информации не установлены и могут быть вызваны только косвенными архитектурными пределами используемых компонентов.

Модуль выдачи данных ЭО ИВС (МВД) выдает данные по запросам внешних клиентских программ в формате CSV по протоколу HTTP. Программа МВД аналогична модулю МППД. Отличие заключается в конфигурации, с указанием иного SQL запроса, работающего на выгрузку данных. Для передачи данных используется стек протоколов TCP/IP.

Модуль визуализации данных (МВИЗД) обеспечивает вывод информации в графическом и табличном виде. Выполняется внутри браузера, обращающегося к серверу. МВИЗД может выполняться на любой операционной системе при условии запуска браузера поддерживающего следующие технологии:

- оформление – языки разметки html, css;
- динамические элементы –скриптовый язык JavaScript;
- графики –комплекс технологий SVG.

МВИЗД позволяет выполнять следующие функциональные задачи:

- 1) Просмотр списка станций мониторинга по координатам.
- 2) Просмотр списка измерителей на станциях.
- 3) Просмотр результатов измерения измерителя в табличном виде.
- 4) Просмотр результатов измерения измерителя в виде графиков.
- 5) Изменение состава групп станции.

Файловый состав модуля включает следующие компоненты.

- файл «index.html» (основной файл);
- файл «lightChart.js» (библиотека построения визуализации и загрузки);
- файл «smain.css» (стили отображения внутренних элементов интерфейса).

5.3.2.4 Модуль сверхкраткосрочного временного прогнозирования метеорологических характеристик АПС (МСКВП) осуществляет сверхкраткосрочное временное прогнозирование метеорологических характеристик АПС на срок до 4-х часов вперед на основе данных приземных измерений метеопараметров, выполняемых постами СТИК ЭО ИВС. Алгоритм обработки данных основан на использовании Калмановской фильтрации результатов измерений, выполняемых АМК-03/3у (см. п. 5.1).

МСКВП также обеспечивает экспорт данных в МППД для последующей их визуализации МВИЗД.

Программный модуль «ТР-АМК» позволяет выполнять следующие функциональные задачи:

- загрузки из базы данных ЦОД ИИС или из файлов данных программы «МЕТЕО 3.0», применяемой для обработки первичных измерений метеостанции АМК-03, временного ряда измеренных значений выбранного метеорологического параметра (температуры, скорости и направления ветра, давления или температуры точки росы) за предложенный временной период;

- выполнять по загруженным данным на основе калмановской фильтрации свехкраткосрочный временной прогноз дальнейшей эволюции значения выбранного метеорологического параметра на последующий период времени (до 4-х часов вперед);
- формировать и сохранять файлы с колонками прогнозируемых значений выбранного метеорологического параметра, которые затем могут использоваться модулем визуализации ПО ЦОД ИИС (или аналогичными стандартными программами) для построения временных графиков результатов свехкраткосрочного прогнозирования.

База хранения данных (модуль БД) обеспечивает сохранение результатов измерений, получаемых от составных частей ЭО ИВС. Для управления данными используется СУБД PostgreSQL со стандартными настройками. Для автоматических операции внутри СУБД реализованы процедуры на триггерах–механизмах, инициирующихся по определенным событиям (по времени, по процессам чтения или записи данных).

Логическая структура базы данных ЭО ИВС включает в себя два логических блока: основной связывающий блок (с префиксом ids) и блоки однотипных измерителей.

Основной связывающий блок служит для соотнесения измеряемых параметров группе, по которой в дальнейшем будет производиться выборка данных. Блоки однотипных измерителей служат для реализации загрузки данных от разных типов измерителей. Необходимость разделения продиктована особенностями обработки высокоскоростных запросов категории SQL COPY.

5.4 Выводы по главе 5

5.4.1 Основные выводы из результатов работ, описание которых приведено в главе 5:

1) На основе разработанных измерительных приборов и комплексов АМК-03, «ЭКСМЕТЕО» и АМК-03Б создан и введен в долговременную эксплуатацию

прототип автоматизированной измерительно-вычислительной системы (ИМС-МЕТЕО-3) для исследований в режиме реального времени поведения метеорологических и турбулентных параметров АПС.

2) С использованием созданного прототипа ИМС-МЕТЕО-3 выполнены экспериментальные исследования корреляционных свойств приземных метеорологических величин, характерных для орографических условий конкретной местности в различных погодных условиях. На основе полученных данных разработана концепция оптимальной измерительной сети метеорологического мониторинга мезомасштабной территории.

3) На основе разработанных измерительных приборов и комплексов – АМК-03/3у, АМК-03/3у(О), «ЭКСМЕТЕО», АМК-03Б, ОПТИОС, ПУМС-БПЛА, ПЭМС-БПЛА, РГА/м, СКР/м, с учетом результатов исследований, полученных при эксплуатации ИВС-МЕТЕО-3, создана и размещена на мезомасштабной территории автоматизированная измерительно-вычислительная система ЭО ИВС, позволяющая осуществлять в режиме реального времени мониторинг экологических, метеорологических и турбулентных параметров АПС.

4) На основе созданной ЭО ИВС в натурных условиях проведены экспериментальные исследования алгоритмов статистической пространственно-временной экстраполяции (интерполяции) метеорологических характеристик и апробация новых методов контроля параметров АПС:

- методов восстановления пространственных полей значений метеорологических величин,
- методов сверхкраткосрочного прогнозирования эволюции метеорологической ситуации,
- методов определения типов и параметров стратификации приземного слоя атмосферы
- методов восстановления высотных профилей метеорологических величин в приземном слое атмосферы.

5.4.2 Представленные в главе 5 результаты работ приведены в 26 авторских публикациях [42, 80, 221–224, 231–233, 235–244, 250–256], в реестре РФ программ для ЭВМ зарегистрирована 1 компьютерная программа [234].

Результаты работ по созданию прототипа измерительно-вычислительной системы и проведению на ее базе цикла синхронных измерений метеорологических характеристик атмосферы вошли в перечень основных научных достижений РАН в 2010 году.

На основании полученных результатов сформулировано шестое защищаемое положение (см. Введение. Защищаемые положения).

Заключение

1. На основе метода акустической термоанемометрии с использованием новых технических решений разработана линейка модификаций стационарных, переносных и бортовых отечественных ультразвуковых АМС типа АМК-03 гражданского (АМК-03, АМК-03/3у, АМК-03П, ЭКСМЕТЕО, АМК-03Б) и военного (1Б65Б, АМК-Б, БМК-01) назначений. УАМС обеспечивают измерение мгновенных значений основных метеорологических величин – 3D-вектора скорости ветра (в диапазоне от 0 до 50 м/с) и температуры воздуха (в диапазоне от минус 70 до плюс 55 °С) с постоянной времени до 1.25×10^{-2} с, а также атмосферного давления и влажности воздуха.

2. Созданные УАМС представляют собой программно-аппаратные комплексы и способны в режиме реального времени, без участия оператора, в условиях арктического, умеренно-холодного и тропического климата осуществлять метеорологический мониторинг приземного слоя атмосферы, а также решать специальные задачи метеорологического обеспечения военных действий. Базовые модификации УАМС внесены в Государственный реестр средств измерения РФ гражданского и военного назначения, метеокомплексы 1Б65, 1Б65Б и АМК-Б приняты на снабжение ВС РФ. Разработаны и введены технические условия, в соответствии с которыми организовано промышленное производство УАМС.

Разработанные УАМС используются в силовых структурах, на специальных государственных объектах и в научных учреждениях страны (МО РФ, МВД РФ, МЧС РФ, космодромы «Восточный» и «Байконур», Российская академия наук и др.), а также за рубежом (Северо-западный институт ядерных исследований (NINT) (Китайская народная республика), ЗАО «Завод им. Кирова» (республика Казахстан) и др.)

3. Разработаны новые автоматизированные технические средства диагностики УАМС, позволяющие проводить поверку и калибровку 3D-УТА в

полевых условиях. Автоматизированная система диагностики АСКФ внедрена в состав бортового метеокомплекса военного назначения 1Б65Б.

4. На основе теневого метода с использованием новых технических решений разработаны двухканальная (ОДИО) и одноканальная (ОПТИОС) модификации оптических осадкомеров, которые обеспечивают измерение интегральных (сумма и интенсивность осадков с чувствительностью до 2×10^{-4} мм) и структурных (размеры частиц и скорость падения частиц) характеристик атмосферных осадков (дождя, снега и града). Разработана и экспериментально апробирована методика калибровки осадкомеров, опытный образец ОПТИОС подготовлен к сертификации в Росстандарте.

5. На основе использования созданных портативных АМС (электронных и ультразвуковых) и БПЛА (дронов и привязных аэростатов) разработаны новые технологии и реализующие их устройства для дистанционных контактных и бесконтактных измерений вертикальных профилей метеорологических и турбулентных характеристик АПС (до высоты 2 км с пространственным разрешением до 10 м).

6. На основе использования эффекта дистанционного оптического пробоя атмосферного воздуха, возникающего при распространении мощного лазерного излучения, разработаны новые способы и реализующее их устройство (спектрохимический лидар) для дистанционного бесконтактного определения химического состава атмосферных поллютантов и метеорологических характеристик АПС. Лидар использовался при полигонных испытаниях силовых лазерных установок специального назначения.

7. На основе метода ультразвуковой термометрии разработан и экспериментально апробирован новый способ и реализующее его устройство для детектирования излучения инфракрасного и терагерцового диапазонов, обоснована возможность применения такого фотоприемника в оптических газоанализаторах. Экспериментально определенная чувствительность измерения энергии CO_2 -лазера составляет $7 \cdot 10^{-3}$ Дж.

8. На основе метода дифференциального поглощения в УФ диапазоне с использованием новых технических решений разработаны газоанализаторы ДОГ-1М и ДОГ-4 для измерения концентрации окиси азота NO и двуокиси серы SO₂ в дымовых выбросах ТЭС. Газоанализаторы ДОГ-1М внедрены в системах АСУ ТП тепловых электростанций АО «Тюменьэнерго».

9. На основе метода СКР с использованием новых технических решений создан экспериментальный образец газоанализатора для контроля состава многокомпонентных молекулярных газовых смесей на уровне ПДК – СКР/м. Одна из модификаций СКР-газоанализатора рекомендована ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» к использованию для анализа компонентного состава природного газа, продуктов его технологической переработки и газовых смесей аналогичного состава.

10. На основе поперечного эффекта Зеемана созданы экспериментальные образцы анализатора концентрации паров ртути в атмосферном воздухе на уровне 30 нг/м³ (0,1 ПДК): ДОГ-05 (в качестве источника излучения использована ртутная капиллярная изотопная лампа) и РГА/м (в качестве источника излучения – ртутная капиллярная лампа с естественным изотопным составом).

11. Разработана и введена в опытную эксплуатацию автоматизированная измерительно-вычислительная система ЭО ИВС, позволяющая осуществлять в режиме реального времени мониторинг экологических, метеорологических и турбулентных параметров АПС, а также выполнять экспериментальные исследования и натурную апробацию новых методов контроля характеристик атмосферы.

12. Разработанные измерительные приборы и комплексы, составившие инструментальную основу ЭО ИВС (АМК-03, АМК-03/3у(О), «ЭКСМЕТЕО», АМК-03Б, ОПТИОС, ПУМС-БПЛА, ПЭМС-БПЛА, РГА/м, СКР/м), обладают более высокими техническими и эксплуатационными характеристиками по сравнению с большинством зарубежных аналогов и могут заместить их в различных отраслях хозяйства и оборонного комплекса страны.

Список сокращений и условных обозначений

АИИС - автоматизированные информационно-измерительные системы
АПС – атмосферный пограничный слой
БД – база данных
БПЛА – беспилотный летательный аппарат
ГИС – гео-информационная система
ДААС - дифференциальная абсорбционная атомная спектроскопия
ИВС – измерительно-вычислительная система
ИК – инфракрасный
КСОД – контроллер сбора и обработки данных
МВД – модуль выдачи данных
МВИЗД – модуль визуализации и защиты данных
МИК – мобильный измерительный комплекс
МППД – модуль приема и подготовки данных
МСКВП – модуль сверхкраткосрочного временного прогнозирования метеорологических характеристик АПС
ОКР – опытно-конструкторская работа
ПО – программное обеспечение
ПС – приземный слой
ПУМС – портативная ультразвуковая метеостанция
ПЭМС – портативная электронная метеостанция
(ПЭВМ) ЭВМ – (персональная) электронно-вычислительная машина
РАН – Российская академия наук
СО РАН – Сибирское отделение Российской академии наук
СКР – спонтанное комбинационное рассеяние
СТИК – стационарный измерительный комплекс
УАМС – ультразвуковая автоматическая метеорологическая станция
УТА – ультразвуковой термоанемометр
УФ – ультрафиолетовый

ФЦП – федеральная целевая программа

ЦОД – центр обработки данных

ЭАП – электро-акустический преобразователь

ЭММ – экологический и метеорологический мониторинг

3D-УТА – ультразвуковой термоанемометр с функцией измерения
трехмерного вектора скорости ветра

Список литературы

1. О проведении в Российской Федерации Года экологии [Электронный ресурс] : указ Президента Рос. Федерации №7 от 5 янв. 2016 г. : (ред. от 3 сент. 2016 г.) // КонсультантПлюс – надежная правовая поддержка : официальный сайт компании. – Электрон. дан. – М., 2016. – URL: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc;base=EXP;n=666371#0> (дата обращения: 01.08.2016).
2. Прогноз научно-технологического развития Российской Федерации на период до 2030 года [Электронный ресурс] от 3 янв. 2014 г. № ДМ-П8-5 // КонсультантПлюс – надежная правовая поддержка : официальный сайт компании. – Электрон. дан. – М., 2014. – URL: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=LAW&n=157978&rnd=228224.2937512341#0> (дата обращения: 01.08.2016).
3. Пат. 147970 Российская Федерация, МПК G01W/02. Конструкция несущей арматуры электроакустических преобразователей ультразвукового 3D-анемометра / В. А. Корольков, А. Е. Тельминов ; заявитель и патентообладатель Сибаналитприбор. – № 2014133224/28 ; заявл. 12.08.2014 ; опубл. 20.11.2014, Бюл. № 32.
4. Пат. 2319987 Российская Федерация, МПК G01W/02. Ультразвуковой термоанемометр с устройством автоматического восстановления точностных характеристик измерений / А. А. Азбукин, А. Я. Богусевич, В. С. Ильичевский, В. А. Корольков, В. Д. Шелевой ; заявитель и патентообладатель Ин-т мониторинга климатических и экологических систем ; Сибаналитприбор. – № 2006119583/28 ; заявл. 05.06.2006 ; опубл. 20.03.2008, Бюл. № 8.
5. Пат. 2568993 Российская Федерация, МПК G01W 1/18. Способ поверки ультразвуковых анемометров и портативные устройства для его осуществления / В. А. Корольков, А. Е. Тельминов, В. А. Чурсин ; заявитель и патентообладатель Ин-т мониторинга климатических и экологических систем. – № 2014134598/28 ; заявл. 22.08.2014 ; опубл. 20.11.2015, Бюл. № 32.

6. Пат. 2575181 Российская Федерация, МПК G01W 1/14. Оптический способ измерения атмосферных осадков / А. А. Азбукин, В. В. Кальчихин, А. А. Кобзев, В. А. Корольков ; заявитель и патентообладатель Ин-т мониторинга климатических и экологических систем ; Сибаналитприбор. – № 2014129127/28 ; заявл. 15.07.2014 ; опубл. 20.02.2016, Бюл. № 5.

7. Пат. 119898 Российская Федерация, МПК G01W 1/14. Оптико-электронный двухканальный измеритель осадков / А. А. Азбукин, В. В. Кальчихин, А. А. Кобзев, В. А. Корольков ; заявитель и патентообладатель Ин-т мониторинга климатических и экологических систем ; Сибаналитприбор. – № 2012100082/28 ; заявл. 10.01.2012 ; опубл. 27.08.2012, Бюл. № 24.

8. А. с. 960549 СССР. Устройство для дистанционного спектрохимического анализа / В. А. Корольков, В. П. Перовский, Н. П. Солдаткин. – № 3218222/18-25 ; заявл. 15.12.80 ; опубл. 23.09.82, Бюл. № 35.

9. А. с. 980518 СССР. Способ зондирования плазмы по спектрам коллективного рассеивания / Ю. Д. Копытин, В. А. Корольков. – №3270993; заявл. 10.04.81; (без публикации).

10. А. с. 1294095 СССР. Способ определения параметров при лазерной диагностике плазмы / В. А. Корольков, Н. П. Солдаткин. – №3715112; заявл. 23.03.84; (без публикации).

11. А. с. 1285893 СССР. Устройство для диагностики плазмы по рассеянному лазерному излучению / В. А. Корольков. – №3837008; заявл. 30.12.84 (без публикации).

12. А. с. 1382122 СССР. Устройство для регистрации спектра рассеянного плазмой зондирующего излучения при лазерной диагностике плазмы / В. А. Корольков. - №4030811; заявл. 13.12.85; (без публикации).

13. А. с. 1507031 СССР. Устройство для диагностики плазмы по рассеянному лазерному излучению / В. А. Корольков. – №4331980; заявл. 25.11.87; (без публикации).

14. А. с. 1596905 СССР. Спектрохимический лидар / С. Д. Бураков, В. А. Корольков. – № 4656887; заявл. 28.02.89; (без публикации).

15. А. с. 1593397 СССР. Дифференциальный лазерный газоанализатор / А. А. Абрамовский, С. Д. Бураков, В. В. Зуев, В. А. Корольков, Н. П. Солдаткин. – №4469224; заявл. 26.07.88; (без публикации).

16. А. с. 1429706 СССР. Устройство для дистанционного спектрохимического анализа / С. Д. Бураков, В. А. Корольков. – №4128492; 16.06.86; (без публикации).

17. А. с. 1427978 СССР. Устройство для измерения порога оптического пробоя / С. Д. Бураков, В. А. Корольков. – №4175101; заявл. 2.12.86; (без публикации).

18. А. с. 1434950 СССР. Устройство для спектрохимического анализа аэрозолей / Ю. Д. Копытин, В. А. Корольков, Ю. Г. Рубежный (без публикации). – №4198115; заявл. 23.02.87.

19. Пат. 2469361 Российская Федерация, МПК G01W 1/04. Способ дистанционного измерения скорости ветра / В. А. Корольков ; заявитель и патентообладатель Ин-т мониторинга климатических и экологических систем. – № 2011128469/28 ; заявл. 08.07.2011 ; опубл. 10.12.2012, Бюл. № 34.

20. Пат. 2251096 Российская Федерация, МПК G01N 21/47. Устройство для измерения порога оптического пробоя / В. А. Корольков ; заявитель и патентообладатель Ин-т мониторинга климатических и экологических систем. – № 2003128363/28 ; заявл. 19.09.2003 ; опубл. 27.04.2005, Бюл. № 12.

21. Пат. 2208224 Российская Федерация, МПК G01J 5/58. Способ измерения энергии оптического и СВЧ-излучения / В. А. Корольков ; заявитель и патентообладатель Ин-т мониторинга климатических и экологических систем ; Сибаналитприбор. – № 2001106932/28 ; заявл. 14.03.2001 ; опубл. 10.07.2003, Бюл. № 19.

22. Пат. 2207546. Российская Федерация, МПК G01N 21/61. Фототермоакустический газоанализатор / А. А. Азбукин, М. А. Булдаков, В. В. Бурков, В. В. Занин, В. А. Корольков, И. И. Матросов ; заявитель и патентообладатель Ин-т мониторинга климатических и экологических систем. – № 2001120473/28 ; заявл. 23.07.2001 ; опубл. 27.06.2003, Бюл. № 18.

23. Пат. 2460990 Российская Федерация, МПК G01N 21/03. Регистрирующая кювета для фототермоакустического газоанализатора / В. А. Корольков, Д. В. Петров ; заявитель и патентообладатель Ин-т мониторинга климатических и экологических систем. – № 2011113619/28 ; заявл. 07.04.2001 ; опубл. 10.09.2012, Бюл. № 25.

24. Пат. 126136 Российская Федерация, МПК G01N 21/00. Анализатор состава природного газа / М. А. Булдаков, В. А. Корольков, И. И. Матросов, Д. В. Петров ; заявитель и патентообладатель Ин-т мониторинга климатических и экологических систем ; Академприбор. – № 2012146674/28 ; заявл. 01.11.2012 ; опубл. 20.03.2013, Бюл. № 8.

25. Пат. 2244291 Российская Федерация, МПК G01N 21/61. Двухкомпонентный оптический газоанализатор / А. А. Азбукин, М. А. Булдаков, В. В. Бурков, В. В. Занин, В. А. Корольков, И. И. Матросов ; заявитель и патентообладатель Ин-т мониторинга климатических и экологических систем ; Сибаналитприбор. – № 2002133432/28 ; заявл. 10.12.2002 ; опубл. 10.01.2005, Бюл. № 1.

26. Пат. 2469281 Российская Федерация, МПК G01N 21/65 G01J 3/44. Многопроходная оптическая система возбуждения спектров КР / М. А. Булдаков, В. А. Корольков, И. И. Матросов, Д. В. Петров ; заявитель и патентообладатель Ин-т мониторинга климатических и экологических систем. – № 2011126860/28 ; заявл. 29.06.2001 ; опубл. 10.12.20012, Бюл. № 34.

27. Пат. 2474796 Российская Федерация, МПК G01J 3/44. Эффективная оптическая система сбора рассеянного излучения для раман-спектрометра / М. А. Булдаков, В. А. Корольков, И. И. Матросов, Д. В. Петров ; заявитель и патентообладатель Ин-т мониторинга климатических и экологических систем. – № 2011134129/28 ; заявл. 12.08.2011 ; опубл. 10.02.2013, Бюл. № 4.

28. Свидетельство № 19169 Российская Федерация. Двухкомпонентный оптический газоанализатор : свидетельство на полезную модель / А. А. Азбукин, М. А. Булдаков, Б. В. Королев, В. А. Корольков, И. И. Матросов ; заявитель Ин-т

мониторинга климатических и экологических систем ; зарегистрировано в Госреестре полезных моделей Рос. Федерации. 2001.

29. Федеральная целевая программа «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» [Электронный ресурс] от 2 мая 2013 г. № 736-р // КонсультантПлюс – надежная правовая поддержка : официальный сайт компании. – Электрон. дан. – М., 2013. – URL: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc;base=LAW;n=146286#0> (дата обращения: 01.08.2016).

30. Разработка измерительно-вычислительной системы для реализации технологии мезомасштабного мониторинга и прогнозирования атмосферного пограничного слоя : отчет о НИР (промежуточ. Этап.1) / Ин-т мониторинга климатических и экологических систем СО РАН ; руководитель: А. А. Тихомиров, исполнители: Корольков В.А., Тельминов А.Е. и др. – Томск, 2015. – 266 с.

31. Институт радарной метеорологии. ИРАМ [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – Воейково, 2003-2016. – URL: <http://www.iram.ru> (дата обращения: 01.08.2016).

32. Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений [Электронный ресурс] / РОССТАНДАРТ. – Электрон. дан. – [Б. м., б. г.]. – URL: <http://www.fundmetrology.ru> (дата обращения: 01.08.2016).

33. Персин, С. М. Современные тенденции развития аэродромных метеорологических информационно-измерительных систем [Электронный ресурс] // Pandia. – Электрон. дан. – [Б. м.], 2009-2016. – URL: <http://www.pandia.ru/text/77/192/21599.php> (дата обращения: 01.08.2016).

34. Vaisala AviMet® Automated Weather Observing System [Electronic resource] // Vaisala. – Electronic data. – [S. l.], 2016. – URL: <http://www.vaisala.com/en/products/aviationweathersystems/Pages/icaoawos.aspx> (access date: 01.08.2016).

35. Институт геофизического приборостроения [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – СПб., 2016. – URL: <http://www.igptech.ru> (дата обращения: 01.08.2016).
36. ООО «ЛОМО МЕТЕО» [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – СПб., 2016. – URL: <http://www.lomo-meteo.ru> (дата обращения: 01.08.2016).
37. Уникальный научно-технический объект НИУ Росгидромета - Высотная метеорологическая мачта ИЭМ НПО «Тайфун» [Электронный ресурс] // Научно-производственное объединение «Тайфун» / Ин-т экспериментальной метеорологии. – Электрон. дан. – Обнинск, 2016. – URL: <http://typhoon-tower.obninsk.org/ru/index.html> (дата обращения: 01.08.2016).
38. ГПБУ «Мосэкомониторинг» [Электронный ресурс] / Правительство Москвы, Департамент природопользования и охраны окружающей среды. – Электрон. дан. – М., 2001. – URL: <http://www.mosecom.ru> (дата обращения 04.09.2016 г.).
39. ОПТЭК [Электронный ресурс] : приборы для научных исследований. – Электрон. дан. – СПб., 2016. – URL: <http://www.optec.ru> (дата обращения: 01.08.2016).
40. НПО «Импульс» [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – СПб., 2016. – URL: <http://www.npo-impuls.ru> (дата обращения: 01.08.2016).
41. Союзатомприбор [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – М., 2009-2012. – URL: <http://www.sapmonitoring.ru> (дата обращения: 01.08.2016).
42. Корольков, В. А. Информационно-вычислительная система для непрерывного эколого-метеорологического мониторинга атмосферного пограничного слоя / А. Я. Богусевич, В. А., Корольков, А. Е. Тельминов, А. А. Тихомиров // Методические аспекты развития метеорологии специального назначения, экологии и систем аэрокосмического мониторинга : сб. науч. ст. по материалам III Всерос. науч.-практ. конф. ВУНЦ ВВС "ВВА". – Воронеж, 2016. – С. 136-140.

43. Афиногенов, Л. П. Аппаратура для исследований приземного слоя атмосферы / Л. П. Афиногенов, С. И. Грушин, Е. И. Романов. – Л. : Гидрометеиздат, 1977. – 320 с.
44. Schotland, R. M. The measurement of wind velocity by sonic means // *Journal of Meteorol.* – 1955. – Vol. 12. – P. 386-390.
45. Тихомиров А. А. Ультразвуковые анемометры и термометры для измерения пульсаций скорости и температуры воздушных потоков : обзор // *Оптика атмосферы и океана.* – 2010. – Т. 23, № 7. – С. 585-600.
46. Корольков, В. А. Новая технология получения качественной метеоинформации / А. А. Азбукин, В. В. Бурков, М. В. Кабанов, В. А. Корольков, И. И. Матросов, Н. П. Солдаткин // *Качество во имя лучшей жизни : тез. докл. II обл. науч.-практ. конф.* – Томск, 1997. – С. 18.
47. Толмачева, Н. И. Методы и средства гидрометеорологических измерений (для метеорологов) : учеб. пособие / Н. И. Толмачева ; Перм. ун-т. – Пермь, 2011. – 223 с.
48. Фрайден, Дж. Современные датчики : справочник / Дж. Фрайден. – М. : Техносфера, 2005. – 592 с.
49. Вычужанин, В. Измерение влажности воздуха датчиками Honeywell // *Современная электроника.* – 2008. – № 5. – С. 8-10.
50. Humiditi sensor HIH-4206-A/C [Electronic resource] // Honeywell. – Electronic data. – Minneapolis, 2007. – URL: http://sensing.honeywell.com/index.php?ci_id=51480 (access date: 01.08.2016).
51. Vaisala BAROCAP Sensor for measuring pressure [Electronic resource] : technology description // Vaisala. – Electronic data. – [S. l.], 2012. – URL: <http://www.vaisala.fi/Vaisala%20Documents/Technology%20Descriptions/CEN-TIA-BAROCAP-Technology-description-B210845EN-B.pdf> (access date: 01.08.2016).
52. Цифровой барометр PTB-210 [Электронный ресурс] // Vaisala. – Электрон. дан. – [Б. м.], 2013. – URL: <http://www.vaisala.com/Vaisala%20Documents/Brochures%20and%20Datasheets/PTB-210-Datasheet-B210942RU-B-LoRes.pdf> (дата обращения: 01.08.2016).

53. Резонатор кварцевый манометрический абсолютного давления РКМА-Р [Электронный ресурс] // Специальное конструкторское техническое бюро электроники приборостроения и автоматизации. – Электрон. дан. – Углич, 1997-2016. – URL: <http://sktbelpa.ru/ru/products/press/57-rkma-p.html> (дата обращения: 01.08.2016).

54. Integrated Silicon Pressure Sensor On-Chip Signal Conditioned, Temperature Compensated, and Calibrated. MPXV4115V Series Integrated pressure sensor [Electronic resource] : technical data // NXP. – Electronic data. – Eindhoven, 2012. – URL: http://cache.freescale.com/files/sensors/doc/data_sheet/MPXV4115V.pdf (access date: 01.08.2016).

55. Rain Gauges Casella cell [Electronic resource] : datasheet // Casella. – Electronic data. – [S. l., s. a]. – URL: <http://www.casellameasurement.com/downloads/datasheets/Recreational%20Rain%20Gauges.pdf> (access date: 01.08.2016).

56. Precipitation Meter [Electronic resource] : operating instructions 16.77 // Eijkelkamp. – Electronic data. – Giesbeek, [2016]. – URL: <http://www.eijkelkamp.com/files/media/Gebruiksaanwijzingen/EN/m4-1677eraingauge.pdf> (access date: 01.08.2016).

57. Kurtyka, J. C. Precipitation Measurement Study / J. C. Kurtyka. – Urbana, 1953. – 177 p.

58. Российский гидрометеорологический энциклопедический словарь / под. ред. А. И. Бедрицкого. – СПб. : Летний сад, 2009. – Т. 1 : А-И. – 336 с.

59. Литвинов, И. В. Осадки в атмосфере и на поверхности земли / И. В. Литвинов. – Л. : Гидрометеиздат, 1980. – 208 с.

60. RG13/RG13H rain & precipitation sensors [Electronic resource] // Vaisala. – Electronic data. – [S. l.], 2012. – URL: <https://www.vaisala.com/en/products/rainandprecipitationsensors/Pages/RG13RG13H.aspx> (access date: 01.08.2016).

61. Automatic Rain Gauges Casella cell [Electronic resource] // Casella. – Electronic data. – [S. l., s. a]. – URL:

https://www.casellameasurement.com/downloads/datasheets/ds10_Tipping_Bucket.pdf
(access date: 01.08.2016).

62. Корольков, В. А. Оптические измерители осадков / В. В. Кальчихин, А. А. Кобзев, В. А. Корольков А. А. Тихомиров // IX Сибирское совещание по климато-экологическому мониторингу : материалы рос. конф., Томск, 2011. – С. 305-307.

63. Современный осадкомер: Практическая реализация и перспективы развития / А. А. Азбукин, В. В. Кальчихин, А. А. Кобзев [и др.] // Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии : тр. Всерос. науч. конф. с междунар. участием. – Барнаул, 2012. – Т. 3. – С. 3-7.

64. Литвинов, И. В. Структура атмосферных осадков / И. В. Литвинов. – Л. : Гидрометеиздат, 1974. – 153 с.

65. Дмитренко, В. П. Экологический мониторинг техносферы : учеб. пособие / В. П. Дмитриенко, Е. В. Сотникова, А. В. Черняев. – СПб. : Лань, 2012. – 368 с.

66. Кочнев, И. В. Основные физические принципы современных газоаналитических приборов экологической группы. Их развитие и перспективы / И. В. Кочнев, Э. Я. Алкснис // Проблемы приборного обеспечения природоохранной деятельности в энергетике : материалы семинара. – Екатеринбург, 1995. – С. 13-17.

67. Павленко, В. А. Газоанализаторы / В. А. Павленко. – М. ; Л. : Машиностроение, 1965. – 296 с.

68. Булдаков, М. А. Современное состояние и тенденции развития газоаналитического приборостроения для контроля промышленных выбросов в атмосферу / М. А. Булдаков, И. И. Матросов, А. А. Тихомиров // Оптика атмосферы и океана. – 2009. – Т. 22, № 1. – С. 52-57.

69. Зайдель, А. Н. Техника и практика спектроскопии / А. Н. Зайдель, Г. В. Островская, Ю. И. Островский. – М. : Наука, 1972. – 376 с.

70. Лебедева, В. В. Техника оптической спектроскопии / В. В. Лебедева. – М. : Изд-во МГУ, 1986. – 352 с.

71. Немец, В. М. Спектральный анализ неорганических газов / В. М. Немец, А. А. Петров, А. А. Соловьев. – Л. : Химия, 1988. – 240 с.
72. Оптические газоанализаторы серии «ДОГ» / А. А. Азбукин, М. А. Булдаков, Б. В. Королев [и др.] // Оптика атмосферы и океана. – 2002. – Т. 15, № 1. – С. 87-90.
73. Ferraro, J. R. Introductory Raman spectroscopy /J. R. Ferraro, Kazuo Nakamoto, C.W. Brown. – San Diego : Academic Press, 2003. – 434 p.
74. Корольков, В. А. Газоанализатор на основе спонтанного комбинационного рассеяния света: возможности и перспективы / М. А. Булдаков, В. А. Корольков, И. И. Матросов, Д. В. Петров, А. А. Тихомиров // Датчики и системы. – 2012. – № 4. – С. 10-13.
75. Красненко, Н. П. Акустическое зондирование атмосферы / Н. П. Красненко. – Новосибирск : Наука, 1986. – 164 с.
76. Зуев, В. Е. Лазер-метеоролог / В. Е. Зуев. – Л. : Гидрометеиздат, 1974. – 179 с.
77. Межерис, Р. Лазерное дистанционное зондирование / Р. Межерис. – М. : Мир, 1987. – 550 с.
78. Shelden D. Elliot, J. Tethered aerological balloon system / Jr. Shelden D. Elliot, M. McKay, R. B. Mee // Technical progress report. – 1965. – № 398. – P. 37.
79. New-particle formation events in a continental boundary layer: first results from the SATURN experiment / F. Stratmann, H. Siebert, G. Spindler [et. al.] // Atmos. Chem. Phys. – 2003. – Vol. 3. – P. 1445-1459.
80. Корольков, В. А. Измерительные комплексы для определения вертикальных профилей метеорологических величин в атмосферном пограничном слое. / А. Я. Богусевич, С. А. Кураков, В. А. Корольков, А. Е. Тельминов, А. А. Тихомиров // Системы гидрометеорологического, экологического и специального мониторинга: методологические аспекты повышения качества функционирования. Академические Жуковские чтения : сб. науч. ст. по материалам III Всерос. научн.-практ. конф., 25-27 нояб. 2015 г. – Воронеж, 2016. – С. 17-21.

81. Schotland, R. M. The measurement of wind velocity by sonic means // *Journal of Meteorol.* – 1955. – Vol. 12. – P. 386-390.
82. Блохинцев, Д. И. Акустика неоднородной движущейся среды / Д. И. Блохинцев. – М. : Наука, 1981. – 206 с.
83. Barret, W. Preliminary report on temperature measurement by sonic means / W. Barret, E. Suomi // *Journal of Meteorol.* – 1949. – Vol. 6, №4. – P. 273-276.
84. Бызова, Н. Л. Турбулентность в пограничном слое атмосферы / Н. Л. Бызова, В. Н. Иванов, Е. К. Гаргер. – Л. : Гидрометеоиздат, 1989. – 263 с.
85. Татарский, В. И. Распространение волн в турбулентной атмосфере / В. И. Татарский. – М. : Наука, 1967. – 548 с.
86. Обухов, А. М. Турбулентность и динамика атмосферы / А. М. Обухов. – Л. : Гидрометеоиздат, 1988. – 413 с.
87. Зуев, В. Е. Современные проблемы атмосферной оптики / В. Е. Зуев, А. А. Землянов, Ю. Д. Копытин. – Л. : Гидрометеоиздат, 1989. – Т. 5 : Оптика турбулентной атмосферы. – 285 с.
88. Богушевич, А. Я. Ультразвуковые методы оценивания метеорологических и турбулентных параметров атмосферы // *Оптика атмосферы и океана.* – 1999. – Т. 12, № 2. – С. 170-175.
89. Региональный мониторинг атмосферы : кол. монография / под общ. ред. М. В. Кабанова. – Томск : Спектр, 1997. – Ч. 2 : Новые приборы и методики измерений. – 295 с.
90. Корольков, В. А. Акустический термоанемометр ТАУ / А. А. Азбукин, В. В. Бурков, В. В. Занин, В. А. Корольков, Н. П. Солдаткин // *Современное состояние проблемы навигации и океанографии : тез. докл. III Рос. науч.-техн. конф.* – СПб., 1998. – С. 32-33.
91. Корольков, В. А. Ультразвуковой термоанемометр ТАУ-01 / А. А. Азбукин, В. В. Береснев, В. А. Капранов, В. А. Корольков // *Контроль и реабилитация окружающей среды : тез. докл. Междунар. симпозиума.* – Томск, 1998. – С. 42-43.

92. Ультразвуковые преобразователи для неразрушающего контроля / под ред. И. Н. Ермолова. – М. : Машиностроение, 1986. – 209 с.
93. Марьин, Н. С. Пьезопреобразователи из композиционных материалов для ультразвуковых расходомеров / Н. С. Марьин, Л. П. Журавлев // Приборы и системы управления. – 1995. – № 4. – С. 16-19.
94. Богомольный, В. М. Анализ потерь, температурного поведения и выбор оптимальной частоты возбуждения пьезоэлектрических преобразователей // Дефектоскопия. – 1987. – № 4. – С. 29-31.
95. Корольков, В. А. О конструировании преобразователей, работающих на малоимпедансную нагрузку / Б. И. Капранов, В. А. Корольков, М. М. Коротков, В. А. Шаверин // Контроль и реабилитации окружающей среды : тез. докл. Междунар. симпозиума. – Томск, 1998. – С. 63-64.
96. А. с. 1590962 СССР. Материал для демпфера ультразвукового преобразователя / М. Б. Бурд, В. В. Сажин. – Бюл. № 33.
97. А. с. 1619165 СССР. Материал для демпфера ультразвукового преобразователя / В. В. Лобанов, И. С. Байдин. – № 4669327/28 ; заявл. 16.01.89 ; опубл. 07.01.91, Бюл. № 1.
98. А. с. 1280535 СССР. Материал для демпфера ультразвукового преобразователя / В. Г. Шевалдыкин, Н. Н. Яковлев. – № 3971376/25-28 ; заявл. 02.08.85 ; опубл. 30.12.86, Бюл. № 48.
99. Корольков, В. А. Автоматизированный комплекс нового поколения / А. А. Азбукин, В. В. Бурков, В. В. Занин, М. В. Кабанов, Б. И. Капранов, В. А. Корольков, Н. П. Солдаткин // Проблемы методологии, автоматизированного сбора и обработки метеоинформации и новые направления в развитии гидрометеорологического приборостроения : тр. науч.-практ. конф. «Новые направления гидрометеорологического приборостроения». – Ташкент, 1999. – С. 11.
100. Корольков, В. А. Результаты разработки нового поколения приборов для эколого-метеорологического мониторинга / А. А. Азбукин, А. Б. Антипов, В. В. Бурков, И. И. Ипполитов, М. В. Кабанов, В. А. Корольков, Н. П. Солдаткин, А.

А. Тихомиров // Интеллектуальные автоматизированные системы в управлении : материалы науч.-практ. конф. – Новосибирск, 1997. – С. 14-25.

101. Свидетельство № 2010614244 Российская Федерация. Программа АМК-СОФТ-4 : свидетельство об офиц. регистрации программы для ЭВМ / А. А. Азбукин, В. В. Кальчихин, А. А. Кобзев, В. А. Корольков, О. Г. Пономарев ; заявитель и правообладатель Ин-т мониторинга климатических и экологических систем. – №2010611591; заявл. 29.03.2010; зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 30.06.2010.

102. Свидетельство № 2002612038 Российская Федерация. Программа Ультразвуковая метеостанция, версия 3.0 («МЕТЕО 3.0») : свидетельство об офиц. регистрации программы для ЭВМ / А. Я. Богушевич ; заявитель и правообладатель Ин-т мониторинга климатических и экологических систем ; зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 03.12.2002.

103. Корольков, В. А. Автоматизированный ультразвуковой метеорологический комплекс АМК-03 / А. А. Азбукин, А. Я. Богушевич, В. С. Ильичевский, В. А. Корольков, А. А. Тихомиров, В. Д. Шелевой // Метеорология и гидрология. – 2006. – № 11. – С. 89-97.

104. Knollenberg, R. G. The Optical Array: An Alternative to Scattering or Extinction for Airborne Particle Size Determination // Journal of Appl. Meteorol. – 1970. – Vol. 9. – P. 86-103.

105. Корольков, В. А. Лазерный дисдрометр / В. В. Кальчихин, А. А. Кобзев, В. А. Корольков, А. А. Тихомиров // Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии и геоэкологии – 2011 : тр. XIX Междунар. конф. – Новороссийск, 2011. – С. 17-18.

106. Корольков, В. А. К выбору размера измерительной площадки двухканального оптического осадкомера / В. В. Кальчихин, А. А. Кобзев, В. А. Корольков, А. А. Тихомиров // Оптика атмосферы и океана. – 2013. – Т. 26, № 2. – С. 155-159.

107. Loffler-Mang, M. An Optical Disdrometer for Measuring Size and Velocity of Hydrometeors / M. Loffler-Mang, J. Joss // *Journal of Atmos. Oceanic Technol.* – 2000. – Vol. 17. – P. 130-139.

108. Корольков, В. А. Перспективы применения лазерного дисдметра для изучения характеристик града / В. В. Кальчихин, А. А. Кобзев, В. А. Корольков, А. А. Тихомиров // Труды XXIII Международной конференции, 7-11 сент. 2015 г. / под ред. В. Е. Привалова. – Новороссийск, 2015. – С. 142-143.

109. Gunn, R. The terminal velocity of fall for water droplets in stagnant air / R. Gunn, G.D. Kinzer // *Journal of Meteorol.* – 1949. – Vol. 6, № 2. – P. 243-248.

110. Женева, Р. Град / Р. Жене. – Л. : Гидрометеиздат, 1966. – 106 с.

111. Матвеев, Л. Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы / Л. Т. Матвеев. – Изд. 2-е перераб. и доп. – Л. : Гидрометеиздат, 1984. – 752 с.

112. Корольков, В. А. Новый оптико-электронный измеритель осадков / В. В. Кальчихин, А. А. Кобзев, В. А. Корольков, А. А. Тихомиров // IX Сибирское совещание по климатологическому мониторингу : материалы Рос. конф., г. Томск, 3-6 окт. 2011 г. – Томск, 2011. – С. 307-309.

113. Корольков, В. А. Определение микроструктурных характеристик жидких атмосферных осадков с помощью оптического осадкомера / В. В. Кальчихин, А. А. Кобзев, В. А. Корольков, А. А. Тихомиров // *Оптика атмосферы и океана.* – 2015. – Т. 28, № 7. – С. 669-672.

114. Корольков, В. А. Оптико-электронный блок измерения параметров осадков / А. А. Азбукин, В. В. Кальчихин, А. А. Кобзев, В. А. Корольков, А. А. Тихомиров // *Приборы и техника эксперимента.* – 2013. – № 4. – С. 140-141.

115. Корольков, В. А. Обзор технических решений для построения датчика технических осадков / В. В. Кальчихин, А. А. Кобзев, В. А. Корольков, А. А. Тихомиров // 11 Сибирское совещание по климатологическому мониторингу : материалы докл. / под ред. М. В. Кабанова. – Томск, 2015. – С. 194-195.

116. Свидетельство № 2013614576 Российская Федерация. Программа первичной обработки сигналов для блока измерений оптико-электронного осадкомера : свидетельство об офиц. регистрации программы для ЭВМ / А. А.

Азбукин, В. В. Кальчихин, А. А. Кобзев, В. А. Корольков ; заявитель и правообладатель Ин-т мониторинга климатических и экологических систем ; №2013612239; заявл. 21.03.2013; зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 16.05.2013.

117. Свидетельство № 2015662919 Российская Федерация. Программа для ЭВМ «OPTIOScore» : свидетельство об офиц. регистрации программы для ЭВМ / А. А. Азбукин, В. В. Кальчихин, А. А. Кобзев, В. А. Корольков ; заявитель и правообладатель Ин-т мониторинга климатических и экологических систем ; №2015619986; заявл. 21.10.2015; зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 07.12.2015.

118. Корольков, В. А. Оптико-электронный измеритель осадков : экспериментальный образец / А. А. Азбукин, В. В. Кальчихин, А. А. Кобзев, В. А. Корольков, А. А. Тихомиров // Контроль окружающей среды и климата КОСК-2012 : материалы VIII Всерос. симпозиума (с привлечением иностр. ученых), Томск, 1-3 окт. 2012 г. – Томск, 2012. – С. 50-51.

119. Корольков, В. А. Автоматизированный оптико-электронный измеритель жидких и твердых осадков / А. А. Азбукин, А. А. Кобзев, В. А. Корольков, А. А. Тихомиров // Десятое Сибирское совещание по климатозэкологическому мониторингу : тезисы рос. конф. – Томск, 2013. – С. 4-5.

120. Корольков, В. А. Повышение точности измерения размеров дождевых капель и количества осадков лазерным дисдрометром / В. В. Кальчихин, А. А. Кобзев, В. А. Корольков, А. А. Тихомиров // Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии, геоэкологии и на транспорте – 2014 : тр. XXII Междунар. конф., 8-12 сент. 2014 г. / под ред. В. Е. Привалова. – Новороссийск, 2014. – С. 10.

121. Korolkov, V. A. Specifics of the hail parameter measurements using the optical precipitation gauge / V. V. Kalchikhin, A. A. Kobzev, V. A. Korolkov, A. A. Tikhomirov // SPIE Proceedings. – 2015. – Vol. 9680.

122. Корольков, В. А. Измерение количества, интенсивности и размеров дождевых капель оптическим осадкомером / А. А. Азбукин, В. В. Кальчихин, А.

А. Кобзев, В. А. Корольков, А. А. Тихомиров // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы : тез. докл. XIX Междунар. симпозиума. – Томск, 2013. – С. 70.

123. Определение калибровочных характеристик оптико-электронного измерителя атмосферных осадков / А. А. Азбукин, В. В. Кальчихин, А. А. Кобзев, А. А. Тихомиров // Оптика атмосферы и океана. – 2014. – Т. 27, № 5. – С. 449-455.

124. Korolkov, V. A. Calibration and preliminary tests of the optoelectronic dual channel precipitation gauge / A. A. Azbukin, V. V. Kalchikhin, A. A. Kobzev, V. A. Korolkov, A. A. Tikhomirov // SPIE Proceedings. – 2014. – Vol. 9292.

125. Свидетельство № 2013660835 Российская Федерация. Программа для ЭВМ «RCScore» : свидетельство об офиц. регистрации программы для ЭВМ / А. А. Азбукин, В. В. Кальчихин, А. А. Кобзев, В. А. Корольков ; заявитель и правообладатель Ин-т мониторинга климатических и экологических систем ; №2013617501, заявл. 19.08.2013; зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 20.11.2013.

126. Корольков, В. А. Лазерный дисдрометр. Лабораторные испытания / В. В. Кальчихин, А. А. Кобзев, В. А. Корольков, А. А. Тихомиров // Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии и геоэкологии : тр. 20-й Междунар. науч. конф., п. Абрау-Дюрсо, 11-15 сент. 2012 г. – Новороссийск, 2012. – С. 17-18.

127. Корольков, В. А. Результаты натурных испытаний оптического осадкомера / А. А. Кобзев, В. А. Корольков, А. А. Тихомиров // Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии и геоэкологии : тр. междунар. конф. – Новороссийск, 2013. – С. 18-19.

128. Всемирная метеорологическая организация : руководство по метеорологическим приборам и методам наблюдений. – Женева : ВМО, 2008. – Вып. № 8. – 788 с.

129. Моргунов, В. К. Основы метеорологии, климатологии. Метеорологические приборы и методы наблюдений / В. К. Моргунов. – Ростов н/Д. : Феникс ; Новосибирск : Сиб. соглашение, 2005. – 336 с.

130. Корольков, В. А. Измерение характеристик снеговых осадков с помощью оптического осадкомера / В. В. Кальчихин, А. А. Кобзев, В. А. Корольков, А. А. Тихомиров // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы : тез. докл. XXII Междунар. симпозиума. – Томск, 2016. – С. 94-97.

131. Корольков, В. А. Автоматизированный метеокомплекс АМК-01 / А. А. Азбукин, А. Я. Богушевич, В. В. Бурков, В. А. Корольков, Н. П. Солдаткин // Современное состояние, проблемы навигации и океанографии («НО-2001») : тез. докл. IV Рос. науч.-техн. конф. – СПб., 2001. – Т. 2. – С. 308-311.

132. Корольков, В. А. Метеорологический комплекс АМК-02 / А. А. Азбукин, В. В. Бурков, А. Я. Богушевич, В. С. Ильичевский, М. В. Кабанов, В. А. Корольков, Н. П. Солдаткин // 6 Международная конференция по судостроению, судоходству, оборудованию морских платформ и обеспечивающих их работу плавсредств, морская техника для освоения океана и шельфа : тез. докл. – СПб., 2001. – С. 87-89.

133. Корольков, В. А. Ультразвуковой комплекс АМК-03 для измерения метеорологических и турбулентных характеристик атмосферы / А. А. Азбукин, А. Я. Богушевич, В. С. Ильичевский, В. А. Корольков, А. А. Тихомиров, В. Д. Шелевой // Приборы и техника эксперимента. – 2006. – № 4. – С. 162-163.

134. Корольков, В. А. Приборы нового поколения для решения экоаналитических задач / А. А. Азбукин, М. А. Булдаков, В. В. Бурков, М. В. Кабанов, В. А. Корольков, Н. П. Солдаткин // 6 Международная конференция по судостроению, судоходству, оборудованию морских платформ и обеспечивающих их работу плавсредств, морская техника для освоения океана и шельфа : тез. докл. – СПб., 2001. – С. 251-252.

135. Корольков, В. А. Многоуровневые ультразвуковые комплексы для мониторинга метеорологических и турбулентных параметров в приземной атмосфере / А. Я. Богушевич, В. А. Корольков, А. Е. Тельминов, А. А. Тихомиров // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы : тез. докл. XXII Междунар. симпозиума. – Томск, 2016. – С. 134-137.

136. Корольков, В. А. Автоматические метеостанции АМК-03 и их модификации / А. А. Азбукин, А. Я. Богусевич, А. А. Кобзев, В. А. Корольков, А. А. Тихомиров, В. Д. Шелевой // Датчики и системы. – 2012. – № 3. – С. 47-52.

137. Корольков, В. А. Автоматический судовой метеокomплекс / А. А. Азбукин, В. В. Бурков, В. А. Корольков, Н. П. Солдаткин // Астронавигация-2000 : материалы науч. шк. – СПб., 2000. – С. 79-83.

138. Корольков, В. А. Экспедиционный метеорологический комплекс «ЭКСМЕТЕО-01» / А. А. Азбукин, А. Я. Богусевич, В. А. Корольков, А. А. Тихомиров, В. Д. Шелевой // Приборы и техника эксперимента. – 2008. – № 3. – С. 181-182.

139. Корольков, В. А. Бортовой вариант метеорологической станции АМК-03Б / А. А. Азбукин, А. Я. Богусевич, В. А. Корольков, А. Г. Мезенцев, А. А. Тихомиров, В. Д. Шелевой // Контроль и реабилитация окружающей среды : материалы 6 Междунар. симпозиума, 3-5 июля 2008 г. – Томск, 2008. – С. 96-97.

140. Korolkov, V. A. Meteorological complexes АМК-01 и ВМК-01 / А. А. Azbukin, A. Ya. Boguchevith, V. V. Burkov, V. V. Zanin, V. A. Korolkov, V. S. Ilchevskii // Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics : VIII Joint international Symp. – Irkutsk, 2001. – P. 157.

141. Корольков, В. А. Бортовой метеорологический комплекс на базе многоцелевых гусеничных и колесных машин / А. А. Азбукин, А. Я. Богусевич, В. А. Корольков, А. А. Тихомиров, В. Д. Шелевой // Вестн. акад. военных наук. – 2008. – № 3. – С. 144-148.

142. Корольков, В. А. Экспериментальное исследование метрологических характеристик ультразвукового анемометра в аэродинамической трубе / А. А. Азбукин, А. Я. Богусевич, В. В. Бурков, В. С. Ильичевский, В. А. Корольков // 4-е Сибирского совещания по климатоэкологическому мониторингу : тез. док. – Томск, 2001. – С. 83-84.

143. Korolkov, V. A. Experimental research of the metrological characteristics of a ultrasonic anemometer in a wind tunnel / А. А. Azbukin, A. Ya. Boguchevith, V.

V. Burkov, V. A. Korolkov, V. S. Ilichevskii // *Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics : VIII Joint international Symp.* – Irkutsk, 2001. – P. 158.

144. Корольков, В. А. Метрологическое обеспечение ультразвуковых термоанемометров для измерения пульсационных характеристик метеорологических величин / В. А. Корольков, А. Е. Тельминов, А. А. Тихомиров // *Оптика атмосферы и океана.* – 2015. – Т. 28, № 10. – С. 921-928.

145. International standard: ISO 16622:2002. Meteorology – Sonic anemometers/thermometers – Acceptance test methods for means wind measurements [Electronic resource] // ISO : online browsing platform (OBP). – Electronic data. – [S. l.], 2002. – URL: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:29291:en> (access date: 01.08.2016).

146. Portable wind sensor verifier [Electronic resource] // Climatronics Corporation. – Electronic data. – N. Y., 2005. – URL: http://www.climatronics.com/pdf_pn/Calibration_Test_Fixtures/102645.pdf (access date: 01.08.2016).

147. Атмосфера : справочник. – Л. : Гидрометеиздат, 1991. – 510 с.

148. Матвеев, Л. Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы / Л. Т. Матвеев. – Л. : Гидрометеиздат, 1976. – 639 с.

149. Афиногенов, Л. П. Аппаратура для исследований приземного слоя атмосферы / Л. П. Афиногенов, С. И. Грушин, Е. И. Романов. – Л. : Гидрометеиздат, 1977. – 320 с.

150. Всемирная метеорологическая организация : руководство по метеорологическим приборам и методам наблюдений. – Женева : ВМО, 2008. – Вып. № 8. – 788 с.

151. Фридзон, М. Б. Оценка погрешностей измерений температуры и влажности при радиозондировании на аэрологической сети СССР // *Метеорология и гидрология.* – 1989. – № 5. – С. 114-118.

152. Иванов, В. Э. Радиозондирование атмосферы. Технические и метрологические аспекты разработки и применения радиозондовых

измерительных средств / В. Э. Иванов, М. Б. Фридзон, С. П. Ессяк. – Екатеринбург : УРО РАН, 2004. – 596 с.

153. Справочник по гидрометеорологическим приборам и установкам / А. Б. Рейфер, М. И. Алексеенко, П. Н. Бурцев [и др.] – Л. : Гидрометеиздат, 1977. – 372 с.

154. Заявка 2016112082/28 Российская Федерация. Способ и устройство для измерения скорости ветра и температуры воздуха в атмосферном пограничном слое / Корольков В.А. (РФ), заявитель Институт мониторинга климатических и экологических систем / СО РАН; пат. поверенный А. С. Григорьева – приоритет 30.03.2016.

155. Корольков, В. А. Измерительные комплексы для определения вертикальных профилей метеорологических величин в атмосферном пограничном слое / А. Я. Богусевич, В. А. Корольков, С. А. Кураков, А. Е. Тельминов, А. А. Тихомиров // Системы гидрометеорологического, экологического и специального мониторинга: методологические аспекты повышения качества функционирования. Академические Жуковские чтения : сб. науч. ст. по материалам III Всерос. науч.-практ. конф., 25-26 нояб. 2015 г. – Воронеж, 2016. – С. 17-21.

156. Кураков, С. А. Новые датчики и технические решения в атмосферно-почвенном измерительном комплексе (АПИК) // Одиннадцатое сибирское совещание по климато-экологическому мониторингу : материалы докл. / под. ред. М. В. Кабанова. – Томск, 2015. – С. 207-208.

157. Корольков, В. А. АМС на БПЛА для измерения вертикальных профилей метеорологических и турбулентных характеристик атмосферы / В. А. Корольков, А. А. Тихомиров, А. Е. Тельминов // Методические аспекты развития метеорологии специального назначения, экологии и систем аэрокосмического мониторинга : сб. науч. ст. по материалам III Всерос. науч.-практ. конф., 24-25 мая 2016 г. – Воронеж, 2016. – С. 74-78.

158. Райзер, Ю. П. Лазерная искра и распространение разрядов / Ю. П. Райзер. – М. : Наука, 1974. – 307 с.

159. Зуев, В. Е. Современные проблемы атмосферной оптики / В. Е. Зуев, А. А. Землянов, Ю. Д. Копытин. – Л. : Гидрометеиздат, 1989. – Т. 6 : Нелинейная оптика атмосферы. – 256 с.

160. Дистанционный лазерный спектроскопический анализ аэрозолей / Е. Б. Беляев, А. П. Годлевский, В. Е. Зуев, Ю. Д. Копытин // Зондирование физико-химических параметров атмосферы с использованием мощных лазеров : сб. науч. ст. / под ред. В. Е. Зуева. – Томск, 1979. – С. 3-56.

161. Корольков, В. А. Экспериментальный комплекс аппаратуры для диагностики нелинейных оптических эффектов в атмосфере / В. Г. Агеев, Е. В. Беляев, Ю. Д. Копытин, В. А. Корольков, М. Е. Левицкий, В. А. Погодаев, Ю. Н. Пономарев, Д. П. Чапаров // VII Всесоюзный симпозиум по лазерному и акустическому зондированию атмосферы : тез. докл. – Томск, 1982. – Ч. 2. – С. 14-17.

162. Корольков, В. А. Спектроскопический лидар для анализа газовых и аэрозольных загрязнений атмосферы / Ю. Д. Копытин, В. А. Корольков // Применение лазеров в технологии и системах передачи и обработки информации : тез. докл. III Всесоюз. конф. – Таллин, 1987. – Ч. 4. – С. 10-12.

163. Корольков, В. А. Оптико-электронные приборы и системы для исследования характеристик оптического пробоя и измерения метеорологических параметров в приземном слое атмосферы : дис. ... канд. техн. наук : 05.11.07 / В. А. Корольков. – Томск, 2007. – 124 с.

164. Пятницкий Л. Н. Лазерная диагностика плазмы / Л. Н. Пятницкий. – М. : Атомиздат, 1976. – 424 с.

165. Зайдель, А. Н. Лазерные методы исследования плазмы / А. Н. Зайдель, Г. В. Островская. – Л. : Наука, 1977. – 221 с.

166. Бычков, Ю. И. Особенности работы электроионизационного CO₂-лазера в диапазоне давлений 1-10 атм / Ю. И. Бычков, В. М. Орловский, В. М. Осипов // Квантовая электроника. – 1977. – Т. 4, № 11. – С. 1390-2441.

167. Корольков, В. А. Оптико-акустический локатор / А. П. Годлевский, Ю. В. Иванов, Ю. Д. Копытин, В. А. Корольков, Н. П. Красненко, В. П.

Муравский, Л. Г. Шаманаева // VII Всесоюзный симпозиум по лазерному и акустическому зондированию атмосферы : тез. докл. – Томск, 1982. – Ч. 2. – С. 18-21.

168. Корольков, В. А. Широкополосный фотоприемник на основе фотоэлектронного умножителя / В. Н. Климов, В. А. Корольков // Приборы и техника эксперимента. – 1988. – № 2. – С. 202-203.

169. Корольков, В. А. Спектрохимический лидар для анализа элементного состава атмосферного аэрозоля / А. П. Годлевский, Ю. Д. Копытин, В. А. Корольков, Ю. В. Иванов // Журн. прикл. спектроскопии. – 1983. – Т. 39. – С. 734-740.

170. Корольков, В. А. Спектрохимический лидар на неодимовом лазере / В. В. Занин, В. Н. Климов, Ю. Д. Копытин, В. А. Корольков, В. В. Панкратов // Аппаратура дистанционного зондирования параметров атмосферы : сб. ст. – Томск, 1987. – С. 11-17.

171. Корольков, В. А. Мобильный СХЛ-лидар для экспресс-диагностики соединений бериллия на территории промобъектов / В. Б. Беляев, П. В. Горячев, А. П. Годлевский, В. А. Корольков, Ю. Д. Копытин, С. Т. Пенин, Ю. Г. Рубежный // Труды 10-го Всесоюзного симпозиума по лазерному и акустическому зондированию атмосферы. – Томск, 1989. – С. 302-310.

172. Басиев, Т. Т. Применение пассивных затворов на кристаллах большой апертуры для генерации субмикросекундных моноимпульсов в лазерах на неодимовом стекле с крупногабаритными активными элементами / Т. Т. Басиев, А. М. Прохоров // Краткие сообщения по физике. – 1984. – № 2. – С. 36-39.

173. Корольков, В. А. Исследования выходных параметров неодимового лазера с ПЛЗ на центрах окраски / А. Б. Абрамов, С. Д. Бураков, Н. А. Иванов, В. А. Корольков, Н. П. Солдаткин, В. М. Хулугуров // Материалы VIII Всесоюзного симпозиума по распространению лазерного излучения в атмосфере. – Томск, 1986. – Ч. 3. – С. 246.

174. Зайдель, А. Н. Техника и практика спектроскопии / А. Н. Зайдель, Г. В. Островская, Ю. И. Островский. – М. : Наука, 1972. – 376 с.

175. Немец, В. М. Спектральный анализ неорганических газов / В. М. Немец, А. А. Петров, А. А. Соловьев. – Л. : Химия, 1988. – 240 с.

176. Корольков, В. А. Оптические газоанализаторы серии "ДОГ" / А. А. Азбукин, М. А. Булдаков, Б. В. Королев, В. А. Корольков, И. И. Матросов // Оптика атмосферы и океана. – 2002. – Т. 15, № 1. – С. 87-90.

177. Оптические газоанализаторы УФ-диапазона для технологических газов / М. А. Булдаков, В. М. Вовк, И. И. Ипполитов, Б. В. Королев, В. Е. Лобецкий, И. И. Матросов // Оптика атмосферы и океана. – 1994. – Т. 7, № 10. – С. 41-48.

178. Газоанализатор для измерения оксида азота в дымовых газах / И. И. Ипполитов, М. А. Булдаков, В. Ф. Жилицкий, Б. В. Королев, В. В. Крайнов, В. Е. Лобецкий, С. А. Лобода, И. И. Матросов, С. В. Тигеев // Теплоэнергетика. – 1994. – № 10. – С. 63-65.

179. Корольков, В. А. Оптический анализатор для контроля качества отходящих газов ТЭЦ / А. А. Азбукин, М. В. Кабанов, В. А. Корольков, И. И. Матросов, Н. П. Солдаткин // Качество во имя лучшей жизни : тез. докл. II обл. науч.- практ. конф. – Томск, 1997. – С. 28-29.

180. Корольков, В. А. Оптический газоанализатор «Оксид-1М» / А. А. Азбукин, В. А. Береснев, М. А. Булдаков, Б. В. Королев, В. А. Корольков, И. И. Матросов, В. Ф. Жилицкий, В. В. Крайнов, С. В. Тигеев // Контроль и реабилитация окружающей среды : тез. докл. 1-го Междунар. симпозиума. – Томск, 1998. – С. 43-45.

181. Корольков, В. А. Контроль выбросов оксидов азота на теплоэлектростанциях с помощью газоанализаторов ДОГ-1 / А. А. Азбукин, М. А. Булдаков, Б. В. Королев, В. А. Корольков, И. И. Матросов, Н. П. Солдаткин // Фундаментальные проблемы охраны окружающей среды и экологии природно-территориальных комплексов Западной Сибири : материалы конф. – Горно-Алтайск, 2000. – С. 64-65.

182. Корольков, В. А. Газоанализаторы окислов азота и серы в дымовых газах тепло-электростанций / А. А. Азбукин, М. А. Булдаков, В. А. Корольков, И.

И. Матросов // Контроль и реабилитация окружающей среды : тез. докл. Междунар. симпозиума. – Томск, 1998. – С. 57-58.

183. Корольков, В. А. Газоанализаторы окислов азота и серы в дымовых газах тепло-электростанций. печатн / А. А. Азбукин, М. А. Булдаков, Б. В. Королев, В. А. Корольков // Оптика атмосферы и океана : тез. докл. 6- го Междунар. симпозиума. – Томск, 1999. – С. 121.

184. Korolkov, V. A. Gas analyzers to detect nitrogen and sulfur oxides in the gas effluents from heat and electric power plants / A. A. Azbukin, M. A. Buldakov, B. V. Korolev, V. A. Korolkov, I. I. Matrosov // Atmospheric Optics and Ocean Optics : Proceedings of 6 Symposium. 1999. – Vol. 3983. – P. 530-533.

185. Корольков, В. А. Контроль выбросов оксидов азота на теплоэлектростанциях с помощью газоанализаторов ДОГ-1 / А. А. Азбукин, М. А. Булдаков, Б. В. Королев, В. А. Корольков, И. И. Матросов, Н. П. Солдаткин // Фундаментальные проблемы охраны окружающей среды и экологии природно-территориальных комплексов Западной Сибири : материалы конф. – Горно-Алтайск, 2000. – С. 64-65.

186. Корольков, В. А. Опыт эксплуатации газоанализаторов ДОГ-1 на теплоэнергетических станциях тюменского региона / А. А. Азбукин, М. А. Булдаков, Б. В. Королев, В. А. Корольков, И. И. Матросов, Н. П. Солдаткин // Контроль и реабилитация окружающей среды : материалы 2-го Междунар. симпозиума. – Томск, 2000. – С. 108-109.

187. Корольков, В. А. Газоанализатор окислов азота и серы в дымовых газах тепло-электростанций / А. А. Азбукин, М. А. Булдаков, В. А. Корольков, И. И. Матросов // Теплофизика и аэромеханика. – 2000. – Т. 7, № 4. – С. 613-616.

188. Корольков, В. А. Газоанализаторы NO и SO₂ в дымовых газах тепловых электростанции / А. А. Азбукин, М. А. Булдаков, Б. В. Королев, В. А. Корольков, И. И. Матросов, Н. П. Солдаткин // 4-е Сибирское совещание по климатозэкологическому мониторингу : тез. докл. – Томск, 2001. – С. 84-85.

189. Корольков, В. А. Контроль и минимизация газовых выбросов в теплоэнергетике / А. А. Азбукин, М. А. Булдаков, М. В. Кабанов, Б. В. Королев,

В. А. Корольков, И. И. Матросов, Н. П. Солдаткин // Контроль и реабилитации окружающей среды : материалы 3-го Междунар. симпозиума. – Томск, 2002. – С. 57.

190. Корольков, В. А. Дисперсионный двухкомпонентный газоанализатор «ДОГ-4» / А. А. Азбукин, М. А. Булдаков, В. А. Корольков, И. И. Матросов // 5-е Сибирское совещание по климато-экологическому мониторингу : материалы совещания. – Томск, 2003. – С. 159-162.

191. Корольков, В. А. Двухкомпонентный газоанализатор «ДОГ-4» / А. А. Азбукин, М. А. Булдаков, Б. В. Королев, В. А. Корольков, В. С. Купреков, И. И. Матросов // Контроль и реабилитация окружающей среды : материалы 4-го Междунар. симпозиума. – Томск, 2004. – С. 29-30.

192. Фриш, С. Э. Оптические спектры атомов / С. Э. Фриш. – М. : ГИФМЛ, 1963. – 640 с.

193. Ельяшевич, М. А. Атомная и молекулярная спектроскопия / М. А. Ельяшевич. – Изд. 2-е. – М. : Эдиториал УРСС, 2001. – 896 с.

194. Пупышев, А. А. Атомно-абсорбционный спектральный анализ / А. А. Пупышев. – М. : Техносфера, 2009. – 784 с.

195. Зеемановская атомно-абсорбционная спектроскопия : (обзор) / Э. Л. Альтман, Г. Б. Свешников, Ю. И. Туркин, С. Е. Шолупов // Журн. прикл. спектроскопии. – 1982. – Т. 37, вып. 5. – С. 709-722.

196. Антипов, А. Б. Газоанализатор РГА и его применение для ртутного мониторинга окружающей среды / А. Б. Антипов, Е. Ю. Генина, Ю. А. Головацкий // Оптика атмосферы и океана. – 2002. – Т. 15, № 1. – С. 81-86.

197. Анализатор ртути РА-915М [Электронный ресурс] // Люмэкс. – Электрон. дан. – СПб., 2001-2016. – URL: <http://www.lumex.ru/catalog/ra-915-m.php> (дата обращения: 25.08.2016).

198. Корольков, В. А. Портативный оптический анализатор концентрации паров ртути ДОГ-05 / А. А. Азбукин, М. А. Булдаков, Б. В. Королев, В. А. Корольков, И. И. Матросов, А. А. Тихомиров // Приборы и техника эксперимента. – 2006. – № 6. – С. 142-143.

199. Корольков, В. А. Портативный оптический анализатор паров ртути в атмосферном воздухе / А. А. Азбукин, М. А. Булдаков, Б. В. Королев, В. А. Корольков, И. И. Матросов, В. В. Татур, А. А. Тихомиров // Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии и геоэкологии – 2010 : тр. XVIII Междунар. конф., 7-11 сент. 2010 г. – Новороссийск, 2010. – С. 98-99.

200. Корольков, В. А. Переносной газоанализатор паров ртути в воздухе / А. А. Азбукин, М. А. Булдаков, В. В. Занин, Б. В. Королев, В. А. Корольков, И. И. Матросов, В. В. Татур, А. А. Тихомиров // Ртуть в биосфере: эколого-геохимические аспекты : материалы Междунар. симпозиума, г. Москва, 7-9 сент. 2010 г. – М., 2010. – С. 341-345.

201. Корольков, В. А. Портативный оптический анализатор паров ртути в атмосферном воздухе / А. А. Азбукин, М. А. Булдаков, В. В. Занин, Б. В. Королев, В. А. Корольков, И. И. Матросов, В. В. Татур, А. А. Тихомиров // Лазеры. Измерения. Информация : 20 Междунар. конф. – СПб., 2010. – Т. 3. – С. 108-117.

202. Корольков, В. А. Новая модификация переносного анализатора паров ртути / А. И. Абрамочкин, В. А. Корольков, В. В. Татур, А. А. Тихомиров // Труды XXIII Международной конференции, 7-11 сент. 2015 г. / под ред. В. Е. Привалова. – Новороссийск, 2015. – С. 141-142.

203. Корольков, В. А. Новая модификация мобильного анализатора концентрации паров ртути в атмосферном воздухе / А. И. Абрамочкин, В. А. Корольков, Н. Г. Мутинцкий, В. В. Татур, А. А. Тихомиров // Ртуть в биосфере: эколого-геохимические аспекты : сб. тр. Второго Междунар. симпозиума, 21-25 сент. 2015 г. – Новосибирск, 2015. – С. 11-15

204. Korolkov, V. A. Portable mercury gas analyzer with a lamp filled with natural mercury isotope mixture / A. I. Abramochkin, V. A. Korolkov, N. G. Mutnitsky, V. V. Tatur, A. A. Tikhomirov // SPIE Proceedings. – 2015. – Vol. 9680.

205. Кошкин, Н. И. Справочник по элементарной физике / Н. И. Кошкин, М. Г. Ширкевич. – М. : Наука, 1988. – 254 с.

206. Фомин, В. В. Молекулярное поглощение в инфракрасных окнах прозрачности / В. В. Фомин. – Новосибирск : Наука, 1986. – 231 с.

207. Оптико-акустический метод в лазерной спектроскопии атмосферных газов / А. Б. Антипов, В. А. Капитанов, Ю. П. Пономарев, В. А. Сапожникова. – Новосибирск : Наука, 1984. – 127 с.

208. Корольков, В. А. Термоакустический фотоприемник для дальнего ИК-диапазона / В. А. Корольков, Д. В. Петров // Изв. вузов. Физика. – 2010. – № 9/3. – С. 153-154.

209. Сущинский, М. М. Спектры комбинационного рассеяния молекул и кристаллов / М. М. Сущинский. – М. : Наука, 1969. – 576 с.

210. Шрёттер, Х. Сечения комбинационного рассеяния в газах и жидкостях / Х. Шрёттер, Х. Клёкнер // Спектроскопия комбинационного рассеяния света в газах и жидкостях / ред. А. Вебер. – М., 1982. – С. 154-202.

211. Корольков, В. А. Некоторые аспекты повышения чувствительности СКР-газоанализатора / А. А. Азбукин, М. А. Булдаков, Б. В. Королев, В. А. Корольков, И. И. Матросов, Д. В. Петров, А. А. Тихомиров // Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии и геоэкологии – 2011 : тр. XIX Междунар. конф. – Новороссийск, 2011. – С. 97-98.

212. Корольков, В. А. Некоторые возможности повышения чувствительности СКР-газоанализатора / А. А. Азбукин, М. А. Булдаков, Б. В. Королев, В. А. Корольков, И. И. Матросов, Д. В. Петров, А. А. Тихомиров // IX Сибирское совещание по климатологическому мониторингу : материалы рос. конф., г. Томск, 3-6 окт. 2011 г. – Томск, 2011. – С. 324-326.

213. Пат. 2492434 Российская Федерация, МПК G01J 3/18. Многоканальный высокоэффективный КР-спектрометр / М. А. Булдаков, И. И. Матросов, Д. В. Петров ; заявитель и патентообладатель Ин-т мониторинга климатических и экологических систем. – № 2012102441/28 ; заявл. 24.01.2012 ; опубл. 10.09.2013, Бюл. № 25.

214. Корольков, В. А. Анализ природного газа методом спектроскопии спонтанного комбинационного рассеяния света / М. А. Булдаков, Б. В. Королев, В. А. Корольков, И. И. Матросов, Д. В. Петров, А. А. Тихомиров //

Фундаментальные проблемы оптики – 2012 : тр. междунар. конф., С.-Петербург, 15-19 окт. 2012 г. – СПб., 2012. – С. 159-161.

215. Корольков, В. А. Анализ природного газа методом спектроскопии спонтанного комбинационного рассеяния света / М. А. Булдаков, Б. В. Королев, В. А. Корольков, И. И. Матросов, Д. В. Петров, А. А. Тихомиров // Оптический журнал. – 2013. – № 7. – С. 27-32.

216. Корольков, В. А. Газоанализатор на основе спонтанного комбинационного рассеяния света: возможности и перспективы / М. А. Булдаков, В. А. Корольков, И. И. Матросов, Д. В. Петров, А. А. Тихомиров // Датчики и системы. – 2012. – № 4. – С. 10-13.

217. Korolkov, V. A. Analyzing natural gas by spontaneous Raman scattering spectroscopy / M. A. Buldakov, I. I. Matrosov, B. V. Korolev, V. A. Korolkov, D. V. Petrov, A. A. Tikhomirov // Journal of optical technology. – 2013. – Vol. 80, № 7. – P. 426-430

218. Корольков, В. А. Рамановский газоанализатор для оперативного измерения концентрации компонентов молекулярных газовых смесей. Системы гидрометеорологического, экологического и специального мониторинга: методологические аспекты повышения качества функционирования / В. А. Корольков, И. И. Матросов, Д. В. Петров, А. А. Тихомиров // Академические Жуковские чтения : сб. науч. ст. по материалам III Всерос. науч.-практ. конф., 25-27 нояб. 2015 г. – Воронеж, 2016. – С. 128-132.

219. Динамико-стохастические методы и их применение в прикладной метеорологии / В. С. Комаров, Ю. Б. Попов, С. С. Суворов, В. А. Кураков. – Томск : Изд-во ИОА СО РАН, 2004. – 236 с.

220. Богушевич, А. Я. Краткосрочный прогноз временной эволюции метеорологических параметров в атмосфере из данных измерений ультразвуковой метеостанции // Материалы 6-го Сибирского совещания по климато-экологическому мониторингу. – Томск, 2005. – С. 83-88.

221. Корольков, В. А. Региональная информационно-измерительная система для непрерывного мониторинга атмосферного приземного слоя и

прогноза опасных метеорологических явлений / А. Я. Богушевич, А. А. Кобзев, В. А. Корольков, А. А. Тихомиров // Геология. Инженерная гидрогеология. Геокриология. – 2012. – № 5. – С. 412-419.

222. Корольков, В. А. Информационно-измерительная система для регионального мониторинга и прогноза опасных метеорологических явлений / В. Ю. Богомолов, А. Я. Богушевич, Е. П. Гордов, В. А. Корольков, В. Н. Крупчатников, А. А. Тихомиров // Оптика атмосферы и океана. – 2011. – Т. 24, № 1. – С. 52-59.

223. Корольков, В. А. Территориально распределенная информационно-измерительная система для исследования полей метеорологических величин / А. Я. Богушевич, А. А. Кобзев, В. А. Корольков // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы : сб. докл. XIX Междунар. симпозиума. – Томск, 2013. – С. 174-177.

224. Корольков, В. А. Некоторые результаты работы территориально-распределенной измерительной метеорологической системы на основе сети постов ультразвуковых АМС / А. Я. Богушевич, В. А. Корольков, А. А. Тихомиров // Метеорология и гидрология. – 2015. – № 10. – С. 85-95.

225. Монин, А. С. Статистическая гидромеханика / А. С. Монин, А. М. Яглом. – М. : Наука, 1965. – Ч. 1-2. – 1967 с.

226. Бызова, Н. Л. Турбулентность в пограничном слое атмосферы / Н. Л. Бызова, В. Н. Иванов, Е. К. Гаргер. – Л. : Гидрометеиздат, 1989. – 264 с.

227. Татарский, В. И. Распространение волн в турбулентной атмосфере / В. И. Татарский. – М. : Наука, 1967. – 548 с.

228. Атмосфера : справочник / Ю. С. Седунов, С. И. Авдюшин, Е. П. Борисенков [и др.] – Л. : Гидрометеиздат, 1991. – 509 с.

229. Браун, Р. А. Аналитические методы моделирования планетарного пограничного слоя : пер. с англ. / Р. А. Браун. – Л. : Гидрометеиздат, 1978. – 144 с.

230. Богушевич, А. Я. Краткосрочный прогноз временной эволюции метеорологических параметров в атмосфере из данных измерений ультразвуковой

метеостанции // Материалы 6-го Сибирского совещания по климатологическому мониторингу. – Томск, 2005. – С. 83-88.

231. Разработка измерительно-вычислительной системы для реализации технологии мезомасштабного мониторинга и прогнозирования атмосферного пограничного слоя : отчет о НИР (промежуточ. Этап 2) / Ин-т мониторинга климатических и экологических систем СО РАН ; рук. А. А. Тихомиров. – Томск, 2015. – 266 с. – № ГР 114102740054. – Инв. № 1-2015.

232. Корольков, В. А. Коммутационный контроллер передачи метеорологических данных / А. А. Азбукин, В. В. Кальчихин, А. А. Кобзев, В. А. Корольков, А. А. Тихомиров // Приборы и техника эксперимента. – 2010. – № 4. – С. 166.

233. Корольков, В. А. Реализация передачи измерительной информации в сети постов автоматизированных метеостанций / А. А. Азбукин, В. В. Кальчихин, А. А. Кобзев, В. А. Корольков, А. А. Тихомиров // Контроль окружающей среды и климата : тр. 7-го Всерос. симпозиума г. Томск, 5-7 июля 2010 г. – Томск, 2010. – С. 23-24.

234. Свидетельство № 2010617521 Российская федерация. Программа для коммутационного контроллера передачи метеоданных : свидетельство об офиц. регистрации программы для ЭВМ / А. А. Азбукин, В. В. Кальчихин, А. А. Кобзев, В. А. Корольков ; заявитель и правообладатель Ин-т мониторинга климатических и экологических систем ; №2010616160; заявл. 13.09.2010; зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 13.11.2010. 2010.

235. Корольков, В. А. Реализация территориально-распределенной информацион-но-измерительной системы на основе автоматических метеостанций АМК-03 для мониторинга и прогнозирования опасных метеорологическх явлений / А. Я. Богусевич, В. В. Кальчихин, А. А. Кобзев, В. А. Корольков, А. А. Тихомиров // Проблемы мониторинга окружающей среды : сб. тр. XI Всерос. конференции с участием иностранных ученых (ЕМ-2011). – Кемерово, 2011. – С. 377-381.

236. Korolkov, V. A. Correlation features for rows averaged values of meteorological parameters obtained from measurements in regional network of the automated ultrasonic weather stations / A. Ya. Bogushevich, A. A. Tikhomirov, V. A. Korolkov // SPIE Proceedings. – 2014. – Vol. 9292.

237. Korolkov, V. A. Pilot project of measuring and computing system for mesoscale monitoring of atmospheric boundary layer / A. A. Tikhomirov, A. E. Telminov, A. I. Komarov, A. A. Kobzev, V. A. Korolkov // SPIE Proceedings. – 2015. – Vol. 9680.

238. Корольков, В. А. Измерительно-вычислительная система для мезомасштабного мониторинга атмосферного пограничного слоя / В. А. Корольков, А. Е. Тельминов, А. А. Тихомиров // Одиннадцатое сибирское совещание по климато-экологическому мониторингу : материалы совещания / под ред. М. В. Кабанова. – Томск, 2015. – С. 202-204.

239. Корольков, В. А. Разработка измерительно-вычислительной системы для мезомасштабного мониторинга атмосферного пограничного слоя / В. А. Корольков, А. А. Тихомиров, А. Е. Тельминов // Труды XXIII Международной конференции, 7-11 сент. 2015 г. / под ред. В. Е. Привалова. – Новороссийск, 2015. – С. 144-145.

240. Корольков, В. А. Комплексный мониторинг атмосферы, гидросферы и литосферы на территории заповедника «Хакасский» / В. Ф. Гордеев, В. А. Корольков, С. Ю. Малышков, В. И. Поливач, С. Г. Шталин, К. Н. Пустовалов // Международная конференция по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды ENVIROMIS-2016, г. Томск, 11-16 июля 2016 г. – Томск, 2016. – С. 313-316.

241. Корольков, В. А. Региональная пространственная сеть ультразвуковых метеостанций и корреляционные свойства данных ее измерений / А. Я. Богусhevich, А. А. Кобзев, В. А. Корольков, А. А. Тихомиров // Турбулентность, динамика атмосферы и климата : Междунар. конф. памяти академика А. М. Обухова : сб. докл. – М., 2013. – С. 175-178.

242. Корольков, В. А. Динамика метеорологических и атмосферно-электрических параметров приземной атмосферы при прохождении мощной конвективной облачности летом в Северной Хакасии / В. А. Корольков, С. А. Кураков, К. Н. Пустовалов, П. М. Нагорский // Международная конференция по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды ENVIROMIS-2016, г. Томск, 11-16 июля 2016 г. – Томск, 2016. – С. 321-324.

243. Корольков, В. А. Корреляционные свойства метеорологических полей в приземной атмосфере по данным пространственной сети ультразвуковых метеостанций / А. Я. Богушевич, А. А. Кобзев, В. А. Корольков, А. А. Тихомиров // Контроль окружающей среды и климата «КОСК-2012» : тр. 8-го Всерос. симпозиума. – Томск, 2012. – С. 174-175.

244. Разработка измерительно-вычислительной системы для реализации технологии мезомасштабного мониторинга и прогнозирования атмосферного пограничного слоя : отчет о НИР (промежуточ. Этап 4) / Ин-т мониторинга климатических и экологических систем СО РАН ; рук. А. А. Тихомиров – Томск, 2015. – 266 с. – № ГР 114102740054. – Инв. № 1-2016.

245. Корольков, В. А. Переносной высокочувствительный газоанализатор ртути / А. А. Азбукин, В. А. Береснев, М. А. Булдаков, В. В. Занин, Б. В. Королев, В. А. Корольков, И. И. Матросов, А. А. Тихомиров // Материалы 6-го Сибирского совещания по климатозэкологическому мониторингу. – Томск, 2005. – С. 467-471.

246. Корольков, В. А. Портативный газоанализатор ртути / А. А. Азбукин, М. А. Булдаков, Б. В. Королев, В. А. Корольков, И. И. Матросов, А. А. Тихомиров // Управление отходами – основа восстановления экологического равновесия в Кузбассе : сб. докл. Первой междунар. науч.-практ. конф. – Новокузнецк, 2005. – С. 129-134.

247. Корольков, В. А. Стационарные газоанализаторы оксидов азота и серы / А. А. Азбукин, М. А. Булдаков, В. В. Занин, Б. В. Королев, В. А. Корольков, А. А. Тихомиров // Управление отходами – основа восстановления

экологического равновесия в Кузбассе : сб. докл. Первой междунар. науч.-практ. конф. – Новокузнецк, 2005. – С. 135-141.

248. Корольков, В. А. Стационарный газоанализатор оксидов азота и серы / А. А. Азбукин, М. А. Булдаков, Б. В. Королев, В. А. Корольков, И. И. Матросов, А. А. Тихомиров // Приборы и техника эксперимента. – 2006. – № 6. – С. 105-109.

249. Корольков, В. А. Фототермоакустический газоанализатор / В. А. Корольков, Д. В. Петров // Контроль окружающей среды и климата «КОСК-2010» : 7-й Всерос. симпозиум, г. Томск, 5-7 июля 2010 г. – Томск, 2010. – С. 84-85.

250. Корольков, В. А. Инструментальная часть информационно-измерительной системы для обнаружения опасных метеорологических явлений / А. А. Азбукин, А. Я. Богусевич, В. А. Корольков, А. А. Тихомиров, В. Д. Шелевой // 8-е сибирское совещание по климато-экологическому мониторингу : материалы рос. конф., г. Томск, 8-10 окт. 2009 г. – Томск, 2009. – С. 328-330.

251. Корольков, В. А. Информационно-измерительная система для обнаружения опасных метеорологических явлений / А. А. Азбукин, В. Ю. Богомолов, А. Я. Богусевич, Е. П. Гордов, В. А. Корольков, В. Н. Крупчатников, А. А. Тихомиров // Проблемы мониторинга окружающей среды (ЕМ-2009) : материалы 10-й Всерос. конф., Кемерово, 27-30 окт. 2009 г. – Кемерово, 2009. – С. 5-6.

252. Корольков, В. А. Информационно-измерительная система для обнаружения опасных метеорологических явлений Кузбасс-3 / А. А. Азбукин, В. Ю. Богомолов, А. Я. Богусевич, Е. П. Гордов, В. А. Корольков, В. Н. Крупчатников, А. А. Тихомиров // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – № 9 (отдельный вып.): Строительная геотехнология – С. 124-130.

253. Корольков, В. А. Комплексная система для сбора и обработки данных метеорологических измерений «СИМПА» / А. А. Азбукин, А. Я. Богусевич, В. А. Корольков, А. А. Тихомиров, В. Д. Шелевой // Контроль окружающей среды и климата «КОСК-2010» : 7-й Всерос. симпозиум, г. Томск, 5-7 июля 2010 г. – Томск, 2010. – С. 24-26.

254. Korolkov, V. A. Regional information-measurement system for continuous monitoring of atmospheric ground layer and forecasting of dangerous weather phenomena / A. Ya. Bogushevich, A. A. Kobzev, V. A. Korolkov, A. A. Tikhomirov // Environmental Geosciences and Engineering Survey for Territory Protection and Population Safety (EngeoPro-2011) : Intern. Conf. – M., 2011 – P. 138-139.

255. Разработка научных основ технологии и создание измерительно-вычислительной системы для регионального прогноза опасных метеорологических явлений : отчет о НИР (итоговый) / Ин-т мониторинга климатических и экологических систем СО РАН ; рук. А. А. Тихомиров; исполн.: А. А. Азбукин, В. Ю. Богомолов, А. Я. Богушевич, Е. П. Гордов, В. Н. Крупчатников, В. А. Корольков, А. Г. Титов, А. А. Тихомиров, В. Д. Шелевой, Т. М. Шульгина – Томск, 2011. – 33 с.

256. Корольков, В. А. Прототип пространственно-распределенной информационно-измерительной системы для обнаружения опасных метеорологических явлений / А. Я. Богушевич, А. А. Кобзев, В. А. Корольков, А. А. Тихомиров // Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии и геоэкологии : тр. 20-й Междунар. конф., п. Абрау-Дюрсо, 11-15 сент. 2012 г. – Новороссийск, 2012. – С. 69-70.

257. Корольков, В.А. Регистрация излучения СО₂-лазера методом акустической термометрии / Д.В. Петров, Д.Е. Генин, А.Р. Зарипов, А.Е. Тельминов, В.А. Корольков, А.А. Тихомиров // Труды XXIV Международной конференции, 12-17 сент. 2016 г. / под ред. проф. В.Е. Привалова. – Новороссийск, 2016.- С. 129-130.

258. В.А. Корольков, В.А. Определение вида атмосферных осадков по результатам оптических измерений их микроструктурных характеристик / В.В. Кальчихин, А.А. Кобзев, В.А. Корольков, А.А. Тихомиров // Оптика атмосферы и океана.— 2016.— Т. 29, № 8.—С. 654-657.

Приложение А1



ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО
ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

СВИДЕТЕЛЬСТВО
об утверждении типа средств измерений

RU.C.28.007.A № 29530

Срок действия до 15 мая 2018 г.

НАИМЕНОВАНИЕ ТИПА СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ
Комплексы автоматизированные измерительные "Автономная
метеорологическая станция АМК-03"

ИЗГОТОВИТЕЛЬ
Общество с ограниченной ответственностью "Сибирский аналитический
прибор" (ООО "Сибаналитприбор"), г. Томск

РЕГИСТРАЦИОННЫЙ № 36115-07

ДОКУМЕНТ НА ПОВЕРКУ
АМЯ 2.702.089 Д1

ИНТЕРВАЛ МЕЖДУ ПОВЕРКАМИ 1 год

Тип средств измерений утвержден приказом Федерального агентства по
техническому регулированию и метрологии от 15 мая 2013 г. № 485

Описание типа средств измерений является обязательным приложением
к настоящему свидетельству.

Заместитель Руководителя
Федерального агентства



Ф.В.Булыгин
"....." 2013 г.

Серия СИ

№ 009691

ОПИСАНИЕ ТИПА СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

Комплексы автоматизированные измерительные «Автономная метеорологическая станция АМК-03»

Назначение средства измерений

Комплексы автоматизированные измерительные «автономная метеорологическая станция АМК-03» (далее комплексы) предназначены для измерения метеорологических параметров воздушной среды: температуры, скорости и направления ветра, относительной влажности, атмосферного давления.

Описание средства измерений

Принцип действия комплексов при измерении параметров воздушных потоков и температуры воздуха основан на измерении временных интервалов прохождения ультразвуковых сигналов между четырьмя парами пьезоэлектрических преобразователей ультразвуковых сигналов и вычислении по полученным значениям модуля и направления вектора групповой скорости воздушного потока, протекающего между преобразователями ультразвуковых сигналов, а также температуры воздуха.

Дополнительно в качестве первичного преобразователя температуры используется термопреобразователь сопротивления.

В качестве первичного преобразователя относительной влажности используется емкостной преобразователь относительной влажности в аналоговый электрический сигнал.

В качестве первичного преобразователя атмосферного давления используется пьезорезистивный преобразователь атмосферного давления в аналоговый электрический сигнал.

Комплексы поставляются в четырех модификациях: АМК-03, АМК-03П, АМК-03/1, АМК-03 П/1. Каждая модификация характеризуется определенным составом и набором конструктивных и функциональных возможностей.

Сбор данных для вычисления параметров воздушных потоков в зависимости от исполнения осуществляется датчиком метеопараметров ДСВ-15 (для исполнения АМК-03П и АМК-03П/1) или термоанемометром ДСВ-16 (для исполнения АМК-03 и АМК-03/1).

Первичные преобразователи относительной влажности и атмосферного давления размещены, в зависимости от исполнения, внутри корпуса датчика метеопараметров ДСВ-15 (для исполнения АМК-03П и АМК-03П/1) или внутри корпуса датчика давления и влажности ДДВ-12 (для исполнения АМК-03 и АМК-03/1). Кроме того, внутри корпуса ДДВ-12 размещен дополнительный первичный преобразователь температуры (термопреобразователь сопротивления). Исполнения АМК-03П и АМК-03П/1 дополнительного термопреобразователя не имеют.

Термоанемометр ДСВ-16 состоит из корпуса и ультразвуковой системы. Ультразвуковая система выполнена в виде пары трубчатых колец из нержавеющей стали, ориентированных вертикально и ортогонально друг к другу. Кольца жестко прикреплены к верхней части корпуса электронного модуля. На самих кольцах закреплены восемь преобразователей ультразвуковых сигналов. Корпус выполнен в виде полого цилиндра, в котором расположен двухкоординатный акселерометр и электронные схемы преобразования сигналов.

Датчик метеопараметров ДСВ-15 выполнен аналогично термоанемометру ДСВ-16. Кроме того, в корпусе этого датчика расположены первичные преобразователи влажности воздуха и атмосферного давления.

Датчики ДСВ-15 и ДСВ-16 передают результаты измерений в формате RS-485 в пульт управления ПГТУ-25 или в блок питания БПН-52.

Датчик давления и влажности ДДВ-12 выполнен в виде прямоугольного корпуса, снабженного солнцезащитными колпачками, с расположенными в нем первичными преобразователями влажности воздуха, атмосферного давления и температуры, а также электронными схемами преобразования сигналов. Датчик ДДВ-12 подключается к разъему, расположенному на термоанемометре ДСВ-16.

В состав комплексов исполнения АМК-ОЗП, АМК-ОЗП/1 и АМК-ОЗ/1 входит пульт управления ППУ-25, преобразующий сигналы интерфейса RS-485 в сигналы интерфейса RS-232 и обрабатывающий результаты измерений, поступающие от датчиков без применения персональной ЭВМ.

Питание комплексов в зависимости от исполнения осуществляется от блока питания БПН-52, подключаемого к сети переменного тока напряжением 220 В, и (или) от источника постоянного тока напряжением от 10 до 30 В (таблица 1). Блок питания БПН-52 конструктивно выполнен в виде корпуса, в котором расположена схема формирования напряжения питания датчиков и схема преобразования сигналов интерфейса RS-485 в сигналы интерфейса RS-232.

Таблица 1 – Питание комплексов в зависимости от исполнения

Способ питания	АМК-ОЗ	АМК-ОЗП	АМК-ОЗ/1	АМК-ОЗ П/1
От блока питания БПН-52, подключаемого к сети переменного тока напряжением 220 В	+	-	+	+
От источника постоянного тока напряжением от 10 до 30 В	-	+	+	+
«-» - питание не осуществляется; «+» - питание осуществляется.				

Персональная ЭВМ со специальным программным обеспечением (ПО), входящим в комплект поставки, может быть подключена к разъему «RS - 232», расположенному на пульте управления ППУ-25 или на блоке питания БПН-52.

Совместно с поставляемым ПО комплексы обеспечивают выполнение следующих функций:

- считывание в компьютер первичных данных измерений, выдаваемых комплексом в виде цифрового кода в стандарте RS-232, через последовательный порт COM (физический или виртуальный на USB-входе);
- автоматическое и непрерывное тестирование и диагностика технического состояния комплекса и канала связи с ней с выдачей соответствующей информации оператору;
- автоматическое и непрерывное вычисление значений метеорологических параметров (упругости (давления) водяного пара, дефицита влажности, температур точки росы) с задаваемым временем усреднения из принимаемого от метеостанции цифрового кода;
- автоматическое сохранение (в задаваемые оператором сроки метеорологических наблюдений) результатов измерений на жесткий диск компьютера в виде файлов разных типов и форматов, а также в базу данных (при необходимости);
- автоматизация градуировки ультразвукового термоанемометра; вычисление значений градуировочных параметров, их запись в память пульта ППУ-25 (применяют для автономных вычислений и индикации метеорологических величин) и их контрольное считывание.

Для работы ПО необходимо, чтобы персональный компьютер (не входит в комплект поставки) удовлетворял следующим минимальным требованиям:

- процессор Intel Pentium 600 МГц (или аналог);
- наличие порта COM (или драйвера для создания его виртуального аналога для порта USB);
- оперативная память 512 Мб;
- наличие свободного места на жестком диске объемом 50 Мб;
- разрешение экрана 1024 x 768.

Программное обеспечение работает в следующих операционных системах: Windows'98, Windows'2000, Windows XP или другая более поздняя версия Windows.



- 1 - датчик метеорологических параметров ДСВ-15,
- 2 - акустический термоанемометр ДСВ-16,
- 3 - датчик давления, температуры и влажности ДДВ-12;
- 4 - блок питания БПН-52,
- 5 пульт управления ПТУ-25.

Рисунок 1 – Внешний вид составных частей автономных метеорологических станций АМК-03



а) корпус акустического термоанемометра ДСВ-16
(датчика метеорологических параметров ДСВ-15)



б) задняя панель пульта управления
ПТУ-25

Рисунок 2 – Места для пломбирования (отмечено красным)

Программное обеспечение

Программное обеспечение комплексов представлено интегрированным ПО микропроцессорного модуля пульта управления ППУ-25 и автономным ПО, применяемым при работе комплексов с использованием персональной ЭВМ

Автономное ПО включает следующие компоненты:

- программа «Ультразвуковая метеостанция, версия 3.0 («METEO 3.0»)» (основное ПО);
- программа «Ультразвуковая метеостанция. База данных («METEO DB»)» (дополнительное ПО);
- программа «Ультразвуковая метеостанция. Анализ данных («METEO DP»)» (дополнительное ПО);
- шаблон базы данных (дополнительное ПО).

Программное обеспечение, используемое совместно с комплексами при подключении к персональному компьютеру, реализовано с выделением метрологически значимой части.

К метрологически значимой части программного обеспечения относятся следующие компоненты основного ПО:

«AMK_XXXXX.EXE» - основной файл с исполняемым кодом, где «XXXXX» - заводской номер автономной метеорологической станции АМК-03;

«Meteo.DLL» - файл, содержащий программные реализации математических формул, применяемых при вычислениях метеорологических параметров с использованием результатов измерений автономной метеорологической станции АМК-03;

«AMKport.DLL» - файл, содержащий программные реализации интерфейса связи через порты COM;

«AMK_XXXXX.SYS» - файл данных, содержащий градуировочные параметры, индивидуальные для каждой автономной метеорологической станции АМК-03, где «XXXXX» - ее заводской номер.

Идентификационные данные метрологически значимой части автономного программного обеспечения комплексов приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Идентификационные данные метрологически значимой части программного обеспечения

Наименование программного обеспечения	Идентификационное наименование программного обеспечения	Номер версии (идентификационный номер) программного обеспечения	Цифровой идентификатор программного обеспечения (контрольная сумма исполняемого кода)	Алгоритм вычисления идентификатора программного обеспечения
Программа «METEO 3.0»	AMK_XXXXX.EXE	3.0	9cd571460603070c1df3ea9f1e69dfefb	MD5
Библиотечный файл «Meteo.DLL»	meteo.dll	не присвоен	5a57ec506a1a8096fe a48b85a561c6f3	MD5
Библиотечный файл «AMKport.DLL»	amkport.dll	не присвоен	f6e75485d59492c4024022bc372e0ea3	MD5
Файл данных «AMK_XXXXX.SYS»	AMK_XXXXX.SYS	не присвоен	индивидуальный для каждого экземпляра (фиксируется в свидетельстве о поверке)	MD5

Влияние программного обеспечения не приводит к выходу метрологических характеристик за пределы допускаемых значений.

Уровень защиты ПО от непреднамеренных и преднамеренных изменений согласно МИ 3286-2010 – А для интегрированного ПО пульта управления ППУ-25 при работе без внешнего ПО, «С» для автономного ПО, используемого при работе комплексов с применением персональной ЭВМ.

Метрологические и технические характеристики

Диапазон измерения температуры воздуха	от минус 50 до 50 °С.
Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерения температуры:	
– при температуре менее 30 °С	$\pm 0,3$ °С;
– при температуре 30 °С и выше	$\pm 0,5$ °С.
Диапазон измерения скорости горизонтального ветра:	
– для АМК-03П и АМК-03П/1;	от 0,1 до 30 м/с;
– для АМК-03 и АМК-03/1	от 0,1 до 40 м/с.
Предел допускаемой абсолютной погрешности измерения скорости горизонтального ветра:	$\pm (0,1 + 0,02 \cdot V)$ м/с, где V - измеренное значение скорости горизонтального ветра в м/с.
Диапазон измерения скорости вертикального ветра	от минус 15 до 15 м/с.
Предел допускаемой абсолютной погрешности измерения скорости вертикального ветра:	$\pm (0,2 + 0,02 \cdot W)$ м/с, где W - измеренное значение скорости вертикального ветра в м/с.
Диапазон измерения направления горизонтального ветра	от 0 до 360 °.
Предел допускаемой абсолютной погрешности измерений направления горизонтального ветра	± 4 °.
Диапазон измерения относительной влажности воздуха	от 10 до 100 %
Предел допускаемой основной абсолютной погрешности измерения относительной влажности	± 3 %
Предел допускаемой дополнительной абсолютной погрешности измерения относительной влажности воздуха от температуры	± 2 % на 10 °С.
Диапазон измерения атмосферного давления	от 693 до 1067 гПа.
Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерения атмосферного давления	± 1 гПа.
Диапазон задания угла поворота подставки технологической	от 0 до 360 °.
Предел допускаемой абсолютной погрешности задания угла поворота подставки технологической	± 30 °
Диапазон задания угла наклона подставки технологической	от 0 до 45 °.
Предел допускаемой абсолютной погрешности задания угла наклона подставки технологической	± 30 °

Электропитание изделий осуществляется:

– для АМК-03, АМК-03/1 и АМК-03П/1;

от сети переменного тока
напряжением (220 ± 22) В,
частотой (50 ± 1) Гц.

– для АМК-03П и АМК-03/1, АМК-03П/1

от источника постоянного тока
напряжением от 10 В до 30 В.

Потребляемая мощность изделий при питании от сети переменного тока составляет:

– для АМК-03, АМК-03/1, не более

20 ВА;

– для АМК-03 П/1, не более

10 ВА.

Ток, потребляемый при питании от источника постоянного тока, составляет:

– для АМК-03П, АМК-03П/1 (при напряжении питания от 10 до 30 В), не более

0,25 А;

– для АМК-03/1 (при напряжении питания 27 В), не более

0,5 А.

Габаритные размеры составных частей не более:

– ДСВ-15

Ø230×400 мм;

– ДСВ-16

Ø230×520 мм;

– ДДВ-12

150×80×80 мм;

– БПН-52

200×100×80 мм;

– ППУ-25

130×72×30 мм.

Масса составных частей изделия не более:

– ДСВ-15

0,6 кг;

– ДСВ-16

1,1 кг;

– ДДВ-12

0,3 кг;

– БПН-52

1,3 кг;

– ППУ-25

0,3 кг.

Рабочие условия эксплуатации соответствуют группам

Д3 (кроме блока питания БПН-52),
Р2, N2 по ГОСТ Р 52931.

Рабочие условия эксплуатации блока питания БПН-52 в части воздействия температуры окружающей среды и влажности воздуха

группа В2 по ГОСТ Р 52931.

Средний срок службы не менее

6 лет.

Среднее время наработки на отказ не менее

10000 часов.

Знак утверждения типа

Знак утверждения типа наносится типографским способом на титульные листы следующих документов:

«Комплексы автоматизированные измерительные «автономная метеорологическая станция АМК-03». Руководство по эксплуатации». АМЯ2.702.089 РЭ;

«Комплексы автоматизированные измерительные «автономная метеорологическая станция АМК-03». Паспорт». АМЯ2.702.089 ПС.

Комплектность средства измерений

Комплекты поставки комплексов в зависимости от исполнения приведены в таблице 3.

Таблица 3 - Комплект поставки автономных метеорологических станций в зависимости от исполнения.

Наименование и обозначение	АМК-03	АМК-03П	АМК-03/1	АМК-03 П/1
Датчик метеопараметров ДСВ-15, АМЯ3.839.008	-	+	-	+
Акустический термоанемометр ДСВ-16, АМЯ3.839.009	+	-	+	-
Датчик давления и влажности ДДВ-12, АМЯ5.184.018	+	-	+	-
Пульт управления ГПУ-25, АМЯ3.624.070	-	+	+	+
Блок питания БПН-52 АМЯ5.087.122	+	-	+	+
Кабель №1, АМЯ4.853.860	+	+	+	+
Кабель №2, АМЯ4.853.861	-	-	+	+
Кабель №3, АМЯ4.853.862	-	+	+	+
Кабель №4, АМЯ4.853.863	+	-	+	-
Кабель №5, АМЯ4.853.864	+	-	+	+
Кабель №6, АМЯ4.853.865	-	+	+	+
Подставка технологическая, АМЯ4.136.005*	+	+	+	+
Ведомость эксплуатационных документов АМЯ2.702.089 ВЭ	+	+	+	+
Комплект эксплуатационной документации по ведомости эксплуатационных документов, в том числе методика поверки АМЯ2.702.089 Д1	+	+	+	+
Ведомость одиночного комплекта ЗИП АМЯ2.702.089 ЗИ	+	+	+	+
Комплект ЗИП по ведомости ЗИП	+	+	+	+
Программное обеспечение на компакт-диске «METEO 3.0», АМЯ4.079.001	+	+	+	+
Программное обеспечение на компакт-диске «METEO 3.0»; «METEO DB», АМЯ4.079.002	*	*	*	*
Программное обеспечение на компакт-диске «METEO 3.0»; «METEO DB»; «METEO DP», АМЯ4.079.003	*	*	*	*
Тара и упаковка	+	+	+	+
«-» - не входит в комплект поставки; «+» - входит в комплект поставки; «*» - поставляется по требованию потребителя.				

Поверка

осуществляется по документу АМЯ 2.702.089 Д1 «Комплексы автоматизированные измерительные «автономная метеорологическая станция АМК-03. Методика поверки», утвержденному ФГУП «СНИИМ» 25.02.2013 г.

Основные средства поверки:

термометр сопротивления платиновый эталонный, мод. ПТСВ-2;
измерители-регуляторы температуры многоканальные прецизионные МИТ8.10;
микроманометр Н-1000;
термогигрометр ИВА-6Б с датчиком ДВ2ТСМ-2Т-2П-В;
барометр образцовый переносной БОП-1М-1;
угломер типа 2-2 по ГОСТ 5378;
мера концевая 2-150 по ГОСТ 9038;
камера холода и тепла КХТ-0,4-004;
камера тепла и влаги КТК-800;
термобарокамера КХТБ-0,16-003;
аэродинамическая труба типа Т-324;
камера высокого давления КБИ-0,025.

Сведения о методиках (методах) измерений

Методы измерений приведены в документе: «Комплексы автоматизированные измерительные «автономная метеорологическая станция АМК-03. Руководство по эксплуатации», АМЯ2.702.089 РЗ.

Нормативные и технические документы

1 ГОСТ Р 52931-2008. Приборы контроля и регулирования технологических процессов. Общие технические условия.

2 АМЯ2.702.089ТУ. «Комплексы автоматизированные измерительные «автономная метеорологическая станция АМК-03». Технические условия».

Рекомендации по областям применения в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений

Сфера государственного регулирования обеспечения единства измерений распространяется на измерения, которые выполняются при:

- осуществлении деятельности в области охраны окружающей среды;
- осуществлении деятельности по обеспечению безопасности при чрезвычайных ситуациях;
- осуществлении деятельности в области гидрометеорологии.

Изготовитель:

Общество с ограниченной ответственностью «Сибирский аналитический прибор» (ООО «Сибаналитприбор»).

Юридический адрес: 634021, г. Томск, пр. Развития, д. 3

Почтовый адрес: 634021, г. Томск, пр. Академический, 10/3, оф. 312

Телефон (382-2) 49-18-85, 49-09-90, 49-28-24

тел/факс (382-2) 49-19-88, 49-29-67

E-mail – kor@imces.ru, lep@imces.ru

Испытательный центр:

Федеральное государственное унитарное предприятие «Сибирский государственный
ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский институт метрологии»
(ФГУП «СНИИМ»)

630004, г. Новосибирск, пр-т Димитрова, 4;

тел.: (383) 210-08-14;

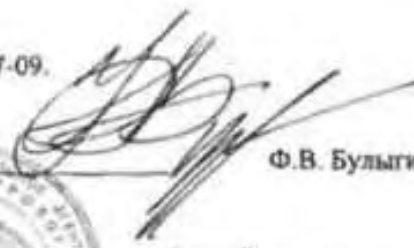
факс: (383) 210-13-60;

сайт: www.sniim.nsk.ru;

номер аттестата аккредитации: 30007-09.

Заместитель
Руководителя Федерального
агентства по техническому
регулированию и метрологии




Ф.В. Булыгин

« » 2013 г.





АКТ

испытаний с целью утверждения типа комплексов автоматизированных измерительных «Автономная метеорологическая станция АМК-03», представленных ООО «Сибаналитприбор»

1 ГЦИ СИ СНИИМ в лице своих представителей с. н. с. СНИИМ Кондакова В.Ю., зам. нач. отдела Копышева А.В., представителя ООО «Сибаналитприбор» Михайлова М.Т. провел испытания с целью утверждения типа комплексов автоматизированных измерительных «Автономная метеорологическая станция АМК-03» (далее комплексы), разработанных ООО «Сибаналитприбор».

Испытания проведены в период с 20 октября 2003 г по 15 июля 2007 г. на основании поручения Госстандарта РФ №410/26-2860 от 30 сентября 2003 г.

Испытания проводились в ГЦИ СИ СНИИМ.

2 ГЦИ СИ были представлены опытные образцы комплексов №27 и №40, изготовленные ООО «Сибаналитприбор» и Институтом мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, предназначенные для измерения метеорологических параметров воздушной среды: температуры, скорости и направления ветра, относительной влажности, атмосферного давления; используемые при проведении гидрометеорологических работ, для автоматизированного контроля параметров воздушной среды в свободной атмосфере, в удаленных или труднодоступных производственных помещениях, в технологических объемах воздуха. Комплексы соответствуют требованиям ГОСТ 12997-84. Область применения комплексов – гидрометеорологические работы.

Краткие технические характеристики комплексов:

Диапазон измерения температуры воздуха от минус 50 °С до плюс 50 °С.

Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерения температуры:

$\pm 0,3$ °С, при $T < 30$ °С;

$\pm 0,5$ °С, при $T \geq 30$ °С.

Диапазон измерения скорости горизонтального ветра:

– комплексов исполнения АМК-03П и АМК-03П/1 от 0,1 до 30 м/с;

– комплексов исполнения АМК-03 и АМК-03/1 от 0,1 до 40 м/с.

Предел допускаемой абсолютной погрешности измерения скорости горизонтального ветра:

$\pm (0,1 + 0,02 V)$ м/с, где V – измеренное значение скорости горизонтального ветра в метрах в секунду.

Диапазон измерения скорости вертикального ветра от минус 15 м/с до 15 м/с.

Предел допускаемой абсолютной погрешности измерения скорости вертикального ветра:

$\pm (0,2 + 0,02 W)$ м/с, где W – измеренное значение скорости вертикального ветра в метрах в секунду

Диапазон измерения направления горизонтального ветра от 0 до 360 °.

Предел допускаемой абсолютной погрешности измерений направления

горизонтального ветра	$\pm 4^\circ$
Диапазон измерения относительной влажности воздуха	от 10 до 100 %
Предел допускаемой основной абсолютной погрешности измерения относительной влажности	$\pm 3\%$
Предел допускаемой дополнительной абсолютной погрешности измерения относительной влажности воздуха от температуры	$\pm 2\%/10^\circ\text{C}$
Диапазон измерения атмосферного давления	от 693 гПа до 1067 гПа
Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерения атмосферного давления	$\pm 1\text{ гПа}$
Диапазон задания угла поворота подставки технологической	от 0 до 360°
Предел допускаемой абсолютной погрешности задания угла поворота подставки технологической	$\pm 30^\circ$
Диапазон задания угла наклона подставки технологической	от 0 до 45°
Предел допускаемой абсолютной погрешности задания угла наклона подставки технологической	$\pm 30^\circ$
Электропитание изделий осуществляется:	
– для исполнения АМК-03, АМК-03/1 и АМК-03П/1 от сети переменного тока напряжением	$(220 \pm 22)\text{ В}$, частотой $(50 \pm 1)\text{ Гц}$
– для исполнения АМК-03П и АМК-03/1, АМК-03П/1 от источника постоянного тока напряжением	от 10 В до 30 В
Потребляемая мощность изделий при питании от сети переменного тока составляет для:	
исполнения АМК-03, АМК-03/1, не более	20 ВА
исполнения АМК-03П/1, не более	10 ВА
Ток, потребляемый изделиями при питании от источника постоянного тока, составляет для:	
– исполнения АМК-03П, АМК-03П/1 (при напряжении питания от 10 до 30 В), не более	0,25 А
– исполнения АМК-03/1 (при напряжении питания 27 В), не более	0,5 А
Габаритные размеры составных частей комплексов, мм, не более:	
– ДСВ-15	$\varnothing 230 \times 400$
– ДСВ-16	$\varnothing 230 \times 520$
– ДДВ-12	$150 \times 80 \times 80$
– БПН-52	$200 \times 100 \times 80$
– ППУ-25	$130 \times 72 \times 30$
Масса составных частей комплексов, кг, не более:	
– ДСВ-15	0,6
– ДСВ-16	1,1
– ДДВ-12	0,3
– БПН-52	1,3
– ППУ-25	0,3
Рабочие условия эксплуатации комплекса соответствуют группам ДЗ (кроме блока питания БПН-52), Р2, N2 по ГОСТ 12997.	
Средний срок службы не менее 6 лет.	
Средняя наработка на отказ не менее 10000 часов.	

3 Ознакомившись с представленным образцом и рассмотрев документацию, ГЦИ СИ признал представленные материалы достаточными для проведения испытаний.

При этом ГЦИ была установлена пригодность образца и документации для проведения испытаний.

4 ГЦИ СИ провел испытания комплексов автоматизированных измерительных «Автономная метеорологическая станция АМК-03» в соответствии с прилагаемой программой испытаний «Автономная метеорологическая станция АМК-03. Программа испытаний», утвержденной руководителем ГЦИ СИ СНИИМ.

5 В результате проведенных испытаний ГЦИ СИ установил, что образцы комплексов соответствуют требованиям ГОСТ 12997-84, а также требованиям, установленным техническими условиями АМЯ 2.702.089 ТУ.

ГЦИ СИ отмечает, что выпуск и эксплуатация комплексов автоматизированных измерительных «Автономная метеорологическая станция АМК-03» обеспечены методами и средствами контроля метрологических характеристик, в том числе средствами, занесенными в Государственный Реестр СИ и выпускаемыми серийно.

Методика поверки комплексов выполнена в виде отдельного документа АМЯ 2.702.089 Д1 и может быть использована для поверки комплексов в метрологических органах.

Межповерочный интервал – 1 год

6 В процессе испытаний отмечены следующие недостатки:

Недостатки, выявленные при испытаниях, устранены в процессе проведения испытаний.

7 На основании результатов проведенных испытаний ГЦИ СИ рекомендует:

утвердить тип комплексов автоматизированных измерительных «Автономная метеорологическая станция АМК-03», внести его в Государственный Реестр СИ и выдать сертификат об утверждении типа по форме приложения Д правил по метрологии ПР 50.2.009.94 ООО «Сибаналитприбор» и Институту мониторинга климатических и экологических систем СО РАН.

Приложения к акту:

1. Утвержденная программа испытаний;
2. Ведомость соответствия испытанных образцов требованиям технических условий.

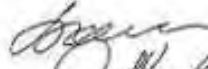
С.н.с. СНИИМ

Зам. нач. отдела СНИИМ

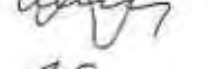
Представитель ООО «Сибаналитприбор»

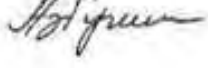
С актом ознакомлен:

Директор ООО «Сибаналитприбор»

 В. Ю. Кондаков

 А. В. Коньшов

 М. Т. Михайлов

 А. А. Азбукин

/Директор

Института мониторинга

климатических и экологических

систем СО РАН

 М. В. Кабанов

Приложение А2



ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО
ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

СВИДЕТЕЛЬСТВО
об утверждении типа средств измерений

RU.C.28.018.B № 42999

Срок действия до 27 июня 2016 г.

НАИМЕНОВАНИЕ ТИПА СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ
Метеокомплекты переносные автоматизированные 1Б65

ИЗГОТОВИТЕЛЬ
ООО "Сибаналитприбор", г.Томск

РЕГИСТРАЦИОННЫЙ № **31023-11**

ДОКУМЕНТ НА ПОВЕРКУ
АМЯ2.702.090 Д5

ИНТЕРВАЛ МЕЖДУ ПОВЕРКАМИ **1 год**

Тип средств измерений утвержден приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от **27 июня 2011 г. № 3061**

Описание типа средств измерений является обязательным приложением к настоящему свидетельству.

Заместитель Руководителя
Федерального агентства


Е.Р. Петросян
"_____" "_____" 2011 г.



Серия СИ

№ 000923

Срок действия до 16 июня 2021 г.

Продлен приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 16 июня 2016 г. № 754

Заместитель Руководителя
Федерального агентства



С.С. Голубев

«24» 2016 г.

УТВЕРЖДАЮ
Начальник ГЦИ СИ «Воентест»
32 ГНИИ МО РФ

В.Н. Храменко
2005 г.

А К Т испытаний для целей утверждения типа метеокомплектов переносных автоматизированных ИБ65, представленных ООО «МНПО-ЗОНД», г. Томск

1 ОСНОВАНИЕ И МЕСТО ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ

1.1 ГЦИ СИ «Воентест» 32 ГНИИ МО РФ в лице начальника отдела Маринко С.В., старшего научного сотрудника Масюты Р.В. и научного сотрудника Фаддеева С.С. провел испытания для целей утверждения типа метеокомплектов переносных автоматизированных ИБ65 (далее по тексту – метеокомплекты), изготавливаемых ООО «Сибаналитприбор», г. Томск и представленных ООО «МНПО-ЗОНД», г. Томск.

1.2 Испытания проведены согласно письму-поручению № 120/26-5138 от 06.10.05 г.

1.3 Испытания проводились в ГЦИ СИ «Воентест», ООО «Сибаналитприбор» и «МНПО-ЗОНД», г. Томск.

2 МАТЕРИАЛЫ И ОБРАЗЦЫ, ПРЕДСТАВЛЕННЫЕ ГЦИ СИ «ВОЕНТЕСТ» 32 ГНИИ МО РФ

2.1 Метеокомплекты (зав. №№ 8, 14) – комплектами эксплуатационной документации.

2.2 Техническая документация в объеме, оговоренном ГОСТ РВ 8.560-95.

2.3 Программа испытаний для целей утверждения типа, утвержденная начальником ГЦИ СИ «Воентест» 32 ГНИИ МО РФ.

2.4 Материалы предварительных испытаний, проведенных ООО «МНПО-ЗОНД».

3 КРАТКАЯ ТЕХНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

3.1 Метеокомплекты переносные автоматизированные ИБ65 (далее – изделия), предназначенные для измерения и обработки наземных метеорологических параметров (температуры воздуха, относительной влажности воздуха, атмосферного давления, скорости и направления ветра) и применяются в сфере обороны и безопасности.

3.2 По условиям эксплуатации метеокомплекты соответствуют группе 1.4, категории А, классу 1, исполнения УХЛ по ГОСТ РВ 21 39.304-98.

Основные технические характеристики.

Диапазон измерений температуры воздуха, °С от минус 50 до 55.
Среднеквадратическое отклонение погрешности измерения температуры
окружающего воздуха, °С, не более 0,37.
Диапазон измерений скорости ветра м/с от 0 до 30.

Среднеквадратическое отклонение по	погрешности измерения скорости	
ветра, м/с, не более		0,37.
Диапазон измерения направления ветра	градус	от 0 до 360.
Среднеквадратическое отклонение по	погрешности измерения направления	
ветра, градус, не более		2,67.
Диапазон измерений относительной в	влажности воздуха у поверхности земли	
на высоте 4 м, %		от 15 до 100.
Среднеквадратическое отклонение ос	новной погрешности измерения относительной	
влажности воздуха при 20 °С, %, не более		5,9.
Среднеквадратическое отклонение до	полнительной погрешности измерения	
относительной влажности воздуха на кажды	е 10 °С от минус 40 до 55 °С, %, не более	2.
Диапазон измерений атмосферного да	вления, гПа	от 867 до 1067.
Среднеквадратическое отклонение по	погрешности измерения атмосферного	
давления, гПа, не более		0,37.
Напряжение питания от внешней сети	постоянного тока, В	12 ^{+2,5} и 27 ⁺³ .
Среднее время наработки на отказ, ч, не менее		1000.
Назначенный ресурс, ч, не менее		10000.
Назначенный срок службы, лет, не м	енее	15.
Масса изделия в контейнере, кг, не б	олее	18.
Высота мачты изделия, м, не менее		4.
Рабочие условия эксплуатации:		
температура окружающего воздуха, °С		от минус 50 до 55;
относительная влажность при тем	пературе окружающего воздуха 25 °С, %	до 98.

4 РАБОТА, ПРОДЕЛАННАЯ ГЦИ СИ «ВОЕНТЕСТ» 32 ГНИИ МО РФ

4.1 ГЦИ СИ «Воентест» 32 ГНИИ МО РФ провел испытания метеоккомплектов в соответствии с утвержденной программой испытаний, провел практическое опробование методики поверки, оценил метрологическую обеспеченность метеоккомплектов при выпуске из производства и в эксплуатации.

4.2 ГЦИ СИ «Воентест» 32 ГНИИ МО РФ рассмотрел: материалы предварительных испытаний; соответствие метеоккомплектов требованиям технической документации; комплектность и качество эксплуатационной документации.

5 ВЫВОДЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИСПЫТАНИЙ И РАССМОТРЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ И ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

5.1 В результате проведенных испытаний ГЦИ СИ «Воентест» 32 ГНИИ МО РФ установил, что метеоккомплекты соответствуют требованиям, установленным в ТУ.

5.2 Обобщенные результаты испытаний, а также выводы о соответствии метеоккомплектов требованиям ТУ приведены в «Ведомости соответствия...».

5.3 ГЦИ СИ «Воентест» 32 ГНИИ МО РФ отмечает, что метеоккомплекты метрологически обеспечены при выпуске из производства и в эксплуатации, нормативный документ на методы и средства поверки разработан.

5.4 По результатам испытаний недопущков не выявлено.

На основании результатов проведенных испытаний ГЦИ СИ «Воентест» 32 ГНИИ МО РФ рекомендует:

- тип метеоккомплектов переносных автоматизированных ИБ65 утвердить и внести его в специальный раздел Государственного реестра средств измерений;
- допустить применение в Российской Федерации метеоккомплектов переносных автоматизированных ИБ65, изготовленных ООО «Сибаналитприбор», г. Томск и представленных ООО «МНПО-ЗОНД», г. Томск;
- выдать ООО «Сибаналитприбор», г. Томск-55 сертификат об утверждении типа по форме ГОСТ РВ 8.560-95 сроком на 5 лет;
- установить межповерочный интервал - 1 год.

Приложения к акту:

1. Программа испытаний для целей утверждения типа.
2. Ведомость соответствия испытанных образцов требованиям ТУ.

Начальник отдела ГЦИ СИ «Воентест»
32 ГНИИ МО РФ

 С.В. Маринко

Старший научный сотрудник ГЦИ СИ «Воентест»
32 ГНИИ МО РФ

 Р.В. Маслота

Научный сотрудник ГЦИ СИ «Воентест»
32 ГНИИ МО РФ

 С.С. Фандеев

С актом ознакомлены:

Директор
ООО «МНПО-ЗОНД»

 В. А. Расколенко

Директор
ООО «Сибаналитприбор»

 А. А. Азбукина

Приложение АЗ

	
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ МИНИСТЕРСТВО ОБОРОНЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ	
СЕРТИФИКАТ ОБ УТВЕРЖДЕНИИ ТИПА СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ	
RU.C.28.018.B	№ 20777
Действителен до 01 июня 2010 г.	
Настоящий сертификат удостоверяет, что на основании положительных результатов испытаний утверждён тип изделия ГО.1.26.02	
ПИЛОНИРОВАНИЕ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ	
ЗАО «Центр СК-Вектор», г. Москва	
изготовитель	
который зарегистрирован в Государственном реестре под № 29303-05 и допущен к применению в Российской Федерации.	
Список типа средств измерений приведено в приложении, являющемся неотъемлемой частью настоящего сертификата.	
НАЧАЛЬНИК МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ СЛУЖБЫ ВООРУЖЕННЫХ СИЛ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ	ЗАМЕСТИТЕЛЬ РУКОВОДИТЕЛЯ ФЕДЕРАЛЬНОГО АГЕНТСТВА ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ
 В.А. Шайко (подпись, фото)	 В.Н. Крутиков (подпись, фото)
20 06 2005 г.	06 2005 г.
Срок действия предельно до г.	
Печать	Печать
Печать	Печать



Изделия ГО.1.26.02	Внесены в Государственный реестр средств измерений Регистрационный № _____ Взамен № _____

Выпускаются в соответствии с техническими условиями ВЕБК.431000.002 ТУ.

Назначение и область применения

Изделия ГО.1.26.02 (далее – изделия) предназначены для измерений параметров атмосферы и почвы:

- скорости и направления вертикального ветра;
- скорости и направления горизонтального ветра;
- температуры воздуха;
- относительной влажности воздуха;
- атмосферного давления;
- температуры почвы;
- степени вертикальной устойчивости воздуха.

Изделия применяются как отдельно носимые комплекты, так и в составе машин радиационной, химической и биологической разведки на объектах сферы обороны и безопасности.

Описание

Конструктивно изделие состоит из: устройства контроля метеопараметров воздушной среды, устройства измерений температуры почвы, пульта управления. В состав носимого комплекта дополнительно входит тренога для стационарной установки и компас.

Устройство контроля метеопараметров воздушной среды представляет собой акустический термоманометр, принцип действия которого основан на регистрации времени прохождения через воздушную среду коротких ультразвуковых импульсов, распространяющихся от акустического излучателя до приемника.

Принцип действия устройства измерений температуры почвы основан на изменении электрического сопротивления чувствительного элемента в зависимости от температуры почвы.

По условиям эксплуатации изделия соответствуют группам 1.4.1, 1.6.5 исполнения УХД по ГОСТ РВ 20.39.304-98 для рабочих температур окружающего воздуха от минус 50 до 50 °С (диапазон рабочих температур для пульта управления от минус 10 до 50 °С) и относительной влажностью воздуха до 98 % при температуре 25 °С.

Основные технические характеристики

- Диапазон измерений температуры воздуха, °С от минус 50 до 50.
- Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений температуры воздуха, °С:
- при измерении температуры от минус 50 до 20 °С ± 3 ;
 - при измерении температуры от 20 до 50 °С $\pm [0,3 + 0,02 \cdot (T - 20)]$, где: T - измеряемая температура воздуха, °С.
- Диапазон измерений скорости горизонтального ветра, м/с от 0,1 до 30.

ного ветра, м/с $\pm (0,2+0,02 \cdot V)$,
 где: V - измеряемая скорость горизонтального ветра, м/с.
 Диапазон измерений направления горизонтального ветра, градус от 0 до 360.
 Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений направления горизонтального ветра, градус ± 4 .
 Диапазон измерений скорости вертикального ветра, м/с от минус 15 до 15.
 Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений скорости вертикального ветра, м/с $\pm (0,2+0,02 \cdot W)$,
 где: W - измеряемая скорость горизонтального ветра, м/с.
 Диапазон измерений относительной влажности воздуха, % от 5 до 100.
 Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений относительной влажности воздуха, % ± 3 .
 Диапазон измерений атмосферного давления, гПа от 693 до 1067.
 Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений атмосферного давления, гПа ± 1 .
 Диапазон измерений температуры почвы, °C от минус 10 до 50.
 Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений температуры почвы, °C $\pm 0,5$.
 Нарботка на отказ, ч, не менее 10000.
 Назначенный ресурс, ч, не менее 20000.
 Назначенный срок службы, лет, не менее 15.
 Габаритные размеры и масса приведены в табл. 1.

Таблица 1.

	Габаритные размеры (длина × ширина × высота), мм, не более	Масса, кг, не более
Устройство контроля метеопараметров воздушной среды	1420 × 180 × 340	40
Устройство контроля метеопараметров почвы	1220 × 120 × 365	42
Пульт управления	220 × 190 × 80	4,5

Рабочие условия эксплуатации:

- температура окружающего воздуха, °C от минус 50 до 50;
- относительная влажность при температуре окружающего воздуха 25 °C, % до 98;
- пониженное атмосферное давление, гПа (мм рт. ст.) 610 (450).

Знак утверждения типа

Знак утверждения типа наносится на маркировочную табличку, установленную на изделии фотохимическим способом и на титульный лист руководства по эксплуатации типографским способом.

Комплектность

В комплект поставки входят: изделие ГО.1.26.02, одиночный комплект ЗИП, комплект эксплуатационной документации.

Поверка

Поверка изделия осуществляется в соответствии с разделом 4 «Методика поверки» руководства по эксплуатации ВЕБК.431000.002 РЭ согласованного начальником ГЦИ СИ «Воситест» 32 ГНИИИ МО РФ и входящим в комплект поставки.

Средства поверки: термометр сопротивления платиновый вибропрочный эталон-

ный ПТСВ-5, термометр ИВА-6Б с датчиком ДВ2ТСМ-3Т-2П-Б, барометр переносимый образцовый БОП-1М.

Межповерочный интервал – 1 год.

Нормативные и технические документы

ГОСТ РВ 20.39.304-98.

ВИБК.431000.002 ТУ. «Изделие ГО.1.26.02. Технические условия».

Заключение

Тип изделия ГО.1.26.02 утвержден с техническими и метрологическими характеристиками, приведенными в настоящем описании типа, метрологически обеспечен при выпуске из производства и в эксплуатации.

Изготовитель.

ЗАО «Центр СК-Вектор»

124498, г. Москва, Зеленоград, МИЭТ, оф. 8319.

Генеральный директор
ЗАО «Центр СК-Вектор»



М.Е. Литвиненко

Приложение А4

	
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ПО СТАНДАРТИЗАЦИИ И МЕТРОЛОГИИ (ГОССТАНДАРТ РОССИИ)	
СЕРТИФИКАТ	
об утверждении типа средств измерений PATTERN APPROVAL CERTIFICATE OF MEASURING INSTRUMENTS	
RU. C. 31. 001. A	№ 7057
Действителен до " 01 " декабря 2004 г.	
Настоящий сертификат удостоверяет, что на основании положительных результатов испытаний утвержден тип Газоанализаторов ДОГ-1	
наименование средства измерений НПК "Электрооптика", г. Томск.	
наименование предприятия-изготовителя	
который зарегистрирован в Государственном реестре средств измерений под № 18915-99 и допущен к применению в Российской Федерации.	
Описание типа средства измерений приведено в приложении к настоящему сертификату.	
Заместитель Председателя Госстандарта России	Н. С. Круглов 29 11 199 г. Продлен до 200 г.
Заместитель Председателя Госстандарта России	 200 г.

ОПИСАНИЕ ТИПА СРБ ЧСГО ПАМЯТИ



Газоанализаторы ДОГ-1

Выпускаются по Техническим условиям АМЯ 2.570.003 ТУ, изготовитель ИОМ СО
РАН совместно с НПК "Электрооптика", г. Томск.

НАЗНАЧЕНИЕ И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ

Стационарные, промышленные газоанализаторы ДОГ-1 предназначены для непрерывного автоматического измерения массовой концентрации оксида азота (NO) в предварительно подготовленной пробе[®] дымовых газов топливосжигающих установок, работающих на природном газе.

ОПИСАНИЕ

Принцип действия газоанализатора - оптический, абсорбционный в ультрафиолетовой области спектра. Сущность абсорбционного метода анализа заключается в зависимости ослабления проходящего кювету с дымовым газом потока оптического излучения в определенном спектральном интервале от концентрации измеряемого газа.

Излучение от источника широкополосного ультрафиолетового излучения направляется в кювету с дымовым газом. Прошедшее через кювету излучение попадает на перестраиваемый светофильтр, настроенный на пропускание участка спектра, где расположена полоса поглощения оксида азота, и затем регистрируется фотоприемником. Этот электрический сигнал фотоприемника I_1 преобразуется в частотный сигнал, который поступает в блок управления. Затем осуществляется программно заданная перестройка светофильтра на пропускание другого участка спектра, где нет поглощения оксида азота, и снова производится измерение сигнала фотоприемника I_2 . По отношению этих двух сигналов I_1/I_2 на основании таблиц калибровочных параметров производится расчет концентрации молекул оксида азота в дымовом газе. Полученный результат выдается на АЦД блока управления и, одновременно, на аналоговый выход 0 - 5 мА.

Измерения I_1 и I_2 и, соответственно, расчет концентрации молекул оксида азота, производится циклически до тех пор, пока на газоанализатор подано питание.

На лицевой панели газоанализатора расположен жидкокристаллический дисплей, на который выводится измерительная информация, а также значения контрольных параметров, периода калибровки, сообщения о неисправностях.

Управление работой газоанализаторов осуществляется с помощью клавиатуры на передней панели прибора. Конструкция газоанализатора обеспечивает компенсацию дрейфа нулевых показаний.

Примечание:*) в качестве пробоотборного устройства может быть использован зонд пробоотборный ИРМБ.306561.002, прошедший испытания в комплексе с газоанализатором «Каскад», изготовленный ЗАО «ОПГЭК», Санкт-Петербург, или иной с аналогичными характеристиками.

Основные метрологические и технические характеристики

1. Метрологические характеристики газоанализаторов ДОГ-1 приведены в таблице 1.

Определяемый компонент	Диапазон измерений мл/м^3	Пределы основной допускаемой погрешности, %	
		Приведенной (Δ_0)	Относительной (Δ_0)
Оксид азота (NO)	0 - 200	± 10	-
	200 - 500	-	± 10

2. Время работы без корректировки показаний - 30 сут.

3. Дополнительные погрешности, вызываемые изменением в пределах рабочих условий температуры окружающей среды, давления окружающей среды и температуры анализируемой газовой смеси на входе газоанализатора составляют менее 0,2 предела основной погрешности.

4. Дополнительные погрешности, вызываемые изменением относительной влажности анализируемого воздуха в пределах от 0 до 80 % объемной доли CO_2 в пределах от 0 до 20% об. CO от 0 до 20% об. не превышают 0,1 предела основной погрешности.

5. Вариация показаний в долях от основной погрешности составляет менее 0,1 % (Δ_0).

6. Предел времени установления выходного сигнала и показаний $T_{0,9}$ не превышает 10 с.

7. Время прогрева газоанализаторов не превышает 30 мин.

8. Газоанализаторы выдерживают перегрузку до 150% от диапазона измерений в течение 10 мин, время восстановления показаний не более 1 мин.

9. Габаритные размеры газоанализаторов не превышают, мм

для блока управления 380 · 280 · 180

для оптической головки 850 · 205 · 185

10. Масса газоанализатора не превышает, кг.

для блока управления 10

для оптической головки 15

11. Электрическое питание газоанализатора осуществляется однофазным током напряжением 220_{-10}^{+15} В и частотой (50 ± 1) Гц.

12. Наибольшая потребляемая мощность газоанализатора не превышает 200 Вт.

13. Показатели надежности газоанализаторов:

а) средняя наработка на отказ не менее 10000 ч;

б) полный средний срок службы газоанализатора не менее 6 лет.

14. Условия эксплуатации газоанализаторов:

-температура окружающей среды - от 5 до 50 °С;

-относительная влажность окружающего воздуха - до 80% при 35 °С и более низких температурах без конденсации влаги;

-атмосферное давление - от 94 до 105 кПа (от 705 до 788 мм рт. ст.);

-содержание в окружающем воздухе агрессивных газов и паров, вызывающих коррозию - в пределах санитарных норм СН-245-71;

-механические вибрации с амплитудой не более 0,1 мм при частоте от 5 до 25 Гц.

15. Параметры анализируемой газовой пробы в точке отбора:

-температура на входе в пробоотборное устройство не более 800 °С;

- давление не более 2сПа;
- относительная влажность до 100 %;
- содержание механических примесей не более 60 г/м³;
- расход пробы через зонд (1,0 ± 0,05) дм³/мин.

Состав анализируемой газовой пробы:

- объемная доля NO до 1000 мкм³;
- объемная доля CO₂ до 20 %;
- объемная доля CO до 20 %;
- объемная доля паров воды до 20 %;
- объемная доля O₂ до 21 %;
- объемная доля N₂ остальное.

* SO₂ - недопустимо

16. Газоанализаторы прошли экспертизу в НИИ Атмосфера и могут быть использованы для измерения концентрации оксида азота в промышленных выбросах. Экспертное заключение № 94.33-09 от 31.03.1999 г.

ЗНАК УТВЕРЖДЕНИЯ ТИПА

Знак утверждения типа наносится на заднюю панель газоанализатора способом шелкографии и на титульный лист Руководства по эксплуатации.

КОМПЛЕКТНОСТЬ

Комплект поставки газоанализатора приведен в таблице 2.

Таблица 2

Обозначение	Наименование	Кол-во	Примечание
	Газоанализатор "ДОЛ-1" в том числе:		
АМЯ 5.184.015	Измерительная головка	1	
АМЯ 5.073.017	Блок управления	1	
АМЯ 4.853.012	Кабель соединительный	1	
АМЯ 4.853.015	Кабель соединительный	1	
АМЯ 4.853.013	Кабель питания	1	
	Комплект запасных частей		
	Шланг соединительный	2	Длина каждой 1,8 м
	Вставка плавкая 2А, 250 В	2	
	Разъем 2РМ 18 КТН71 1В1	1	
	Разъем 2РМ 18 КТН71В1	1	
АМЯ 8.658.034	Тройник	1	
	Побудитель расхода воздуха	1	Поставляется по отдельному договору
	Газоразрядная лампа ЛД2(Д)	1	
	Документация		
АМЯ 2.570.003 РЭ	Руководство по эксплуатации	1	
АМЯ 2.570.003 ПС	Паспорт	1	
АМЯ 2.570.003 МП	Методика поверки	1	

ПОВЕРКА

Поверка газоанализаторов ДОГ-1 проводится в соответствии с методикой поверки АМЯ 2.570.003 МП, являющейся приложением к Руководству по эксплуатации АМЯ 2.570.003 РЭ и утвержденной ГЦИ СИ ГП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева».

Поверка проводится с использованием ГСО-ПГС NO/N₂ в баллонах под давлением по ТУ 6-16-2956-92, поверочного нулевого газа (воздуха) по ТУ 6-21-5-82 с содержанием суммы оксидов азота не более 0,5 мг/м³ и азота особой чистоты в баллоне под давлением, ГОСТ 9392-74.

Периодичность поверки - один раз в год.

НОРМАТИВНЫЕ ДОКУМЕНТЫ

1. Газоанализатор ДОГ-1. Технические условия АМЯ 2.570.003 ТУ.
2. ГОСТ Р 50759-95 «Анализаторы газов для контроля промышленных и транспортных выбросов. Общие технические условия».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Газоанализаторы ДОГ-1, соответствуют требованиям Технических условий АМЯ 2.570.003 ТУ, ГОСТ Р 50759.

Изготовитель: ИПК "Электрооптика". Адрес: 634055, г. Томск, пр. Академический 10/3. тел. (3822) 25-88-85, факс (3822) 25-99-67.

Руководитель сектора отдела испытаний
ГЦИ СИ "ВНИИМ им. Д.И. Менделеева"

 О.В. Тулоровский

Руководитель лаборатории
Государственных эталонов и обмеров
аналитических измерений
ГЦИ СИ ГП "ВНИИМ им. Д.И. Менделеева"

 Б.А. Конавелько

Изучивший сотрудник

В.А. Петров

оформитель

Директор ИПК "Электрооптика"

 А.А. Азбукин

Приложение А5



**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО
ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ**

СЕРТИФИКАТ
об утверждении типа средств измерений
**PATTERN APPROVAL CERTIFICATE
OF MEASURING INSTRUMENTS**

RU.C.31.113.A № 25535

Действителен до
" 01 " ноября 2011 г.

Настоящий сертификат удостоверяет, что на основании положительных результатов испытаний утвержден тип газоанализаторов оптических ДОГ-4

.....
наименование средства измерения

ООО "Сибаналитприбор", г.Томск

.....
полномочное представительство изготовителя

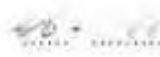
.....
который зарегистрирован в Государственном реестре средств измерений под № 32926-06 и допущен к применению в Российской Федерации.

Описание типа средства измерений приведено в приложении к настоящему сертификату.

Заместитель
Руководителя



В.Н.Крутиков

 200 г.

Заместитель
Руководителя

Продлен до

" " 200 г.



25/5/15

ОПИСАНИЕ ТИПА СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ



СОГЛАСОВАНО

 Руководитель ГЦИ СИ
 ФГУ "Томский ЦСМ" К.Т.Н.

 М.М. Чухланцева
 от 17 в 08.10.2006 г.

Газоанализаторы оптические ДОГ-4	Внесены в Государственный реестр средств измерений Регистрационный № _____ Взамен № _____

Выпускаются по ТУ АМЯ 2.770.010

НАЗНАЧЕНИЕ И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ

Газоанализатор оптический, стационарный промышленный ДОГ-4 (далее – газоанализатор) предназначен для автоматического непрерывного измерения массовой концентрации оксида азота (NO) и диоксида серы (SO_2) в предварительно подготовленной пробе* дымовых газов топливосжигающих установок, работающих на любом топливе.

Область применения – контроль содержания оксида азота и диоксида серы в отходящих газах энергетических установок, работающих на любом топливе.

Газоанализатор может быть применён в составе стационарных автоматических станций контроля промышленных выбросов.

ОПИСАНИЕ

Принцип действия газоанализатора основан на использовании метода дифференциального поглощения в ультрафиолетовой области спектра. Сущность метода дифференциального поглощения заключается в ослаблении проходящего кювету с дымовыми газами потока оптического излучения, в определённых спектральных интервалах, от концентраций измеряемых газов.

Конструктивно газоанализатор оформлен в виде моноблока и включает в себя источник широкополосного ультрафиолетового излучения (газоразрядная дейтериевая лампа), термостатированную кювету с патрубками для ввода и вывода дымового газа, специальный призматический монохроматор с оригинальным устройством сканирования спектра, измеритель интенсивности излучения (фотоэлемент) и модуль управления, представляющий собой микропроцессорную систему. Связь оператора с модулем управления осуществляется с помощью встроенного клавишного пульта и жидкокристаллического алфавитно-цифрового дисплея (АЦД).

Работа газоанализатора полностью определяется управляющей программой.

Примечание:* в качестве пробоотборного устройства используется зонд пробоотборный ИРМБ. 306561.002, прошедший испытания в комплекте с газоанализатором «Каскад».

изготовленный ЗАО «ОПТЭК», г.Санкт-Петербург, или иной с аналогичными характеристиками.

ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

1 Основные метрологические характеристики газоанализатора приведены в таблице 1.

Таблица 1

Наименование показателя	Ед. изм.	Значение
0) Диапазон измерений NO_x , SO_2	мг/м^3	0-500
1) Пределы основной приведенной погрешности измерений массовой концентрации оксидов γ_0 в диапазоне (0-200) мг/м^3	%	± 10
2) Пределы основной относительной погрешности измерений массовой концентрации оксидов δ_0 в диапазоне измерений (200-500) мг/м^3	%	± 10
3) Дополнительная погрешность при отклонении температуры окружающей среды от $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ на каждые 10°C , не более		$0,2 \gamma_0(\delta_0)$
4) Дополнительная погрешность при отклонении влажности воздуха окружающей среды от $(65 \pm 5)\%$ на каждые 10% , не более		$0,2 \gamma_0(\delta_0)$
5) Аналоговый выходной сигнал	мА	0-5, 4-20
6) Предел допускаемого времени установления показаний (выходного сигнала), не более	с	10
8) Предел допускаемого изменения показаний (выходного сигнала) за регламентированный интервал времени (24 ч), не более		$0,2 \gamma_0(\delta_0)$

2) Время прогрева газоанализатора не более 30 мин.

3) Газоанализатор выдерживает перегрузку по концентрации оксидов до 750 мг/м^3 в течение 10 мин, время восстановления показаний не более 1 мин.

4) Масса газоанализатора не более 32 кг.

5) Габаритные размеры газоанализатора, 770х355х320 мм.

6) Электрическое питание газоанализатора осуществляется от сети переменного тока напряжением $220 \text{ В} \pm 10\%$ частотой $(50 \pm 1) \text{ Гц}$.

7) Наибольшая потребляемая мощность газоанализатора не превышает 200 Вт.

8) Среднее время наработки на отказ не менее 10000 часов.

9) Средний срок службы газоанализатора не менее 6 лет.

10) Условия эксплуатации газоанализатора:

- диапазон рабочих температур окружающей среды от 5 до 50°C ;
- относительная влажность окружающего воздуха до 80% ;
- атмосферное давление от 84 до $106,7 \text{ кПа}$ (от 630 до 800 мм.рт.ст.);
- механические вибрации с амплитудой $0,075 \text{ мм}$ при частоте от 5 до 80 Гц .

11) Параметры анализируемой газовой пробы в точке отбора:

- температура на входе в пробоотборное устройство не более 800°C ;
- разрежение не более 2 кПа ;
- относительная влажность до 95% ;
- содержание механических примесей не более 60 г/м^3 ;
- расход пробы через зонд $(1,00 \pm 0,05) \text{ дм}^3 / \text{мин.}$

Состав неизмеряемых компонентов анализируемой газовой пробы:

- объемная доля CO до 20 %;
- объемная доля CO₂ до 20 %;
- объемная доля паров воды до 20 %;
- объемная доля O₂ до 21 %;
- объемная доля N₂ остальное.

ЗНАК УТВЕРЖДЕНИЯ ТИПА

Знак утверждения типа наносится на переднюю панель газоанализатора способом шелкографии и на титульные листы руководства по эксплуатации АМЯ 2.770.010 РЭ и формуляра АМЯ 2.770.010 ПС типографским способом.

КОМПЛЕКТНОСТЬ

Комплект поставки газоанализатора приведен в таблице 2.

Таблица 2

Обозначение	Наименование	Кол.
ТУ АМЯ 2.770.010	Газоанализатор ДОГ-4	1 ¹⁾
	Кабель питания	
	<u>Документация</u>	
АМЯ 2.770.010 РЭ	Руководство по эксплуатации	1
АМЯ 2.770.010 ПС	Паспорт	1
АМЯ 2.770.010 МП	Методика поверки	1
	<u>Комплект запасных частей</u>	
	Шланг соединительный	2 ²⁾
	Вставка плавкая ВП1-1 2А-250В	2
	Побудитель расхода	2 ³⁾
	Разъем DB9-M	3
Примечания-1) стандартный; 2) длина 1,8 м; 3) поставляется по отдельному договору		

ПОВЕРКА

Поверку газоанализатора выполняют в соответствии с документом по поверке «Методика поверки» АМЯ 2.770.010 МП, согласованным ФГУ «Томский ЦСМ».

В перечень основных средств поверки входят:

- государственные стандартные образцы (ГСО) – поверочные газовые смеси (ПГС) по ТУ 6-16-2956-92, номера по Госреестру 4012-87, 4013-87, 4015-87, 7608-99, 7609-99, ЭМ 6601.747,

- поверочный нулевой газ (ПНГ) – воздух по ТУ 6-21-5-82.

Межповерочный интервал – 1 год.

НОРМАТИВНЫЕ ДОКУМЕНТЫ

ГОСТ Р 50759-95 Анализаторы газов для контроля промышленных и транспортных выбросов. Общие технические условия

АМЯ 2.770.010 ТУ «Газоанализатор оптический ДОГ-4». Технические условия.

ГОСТ 8.578-2002 ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений содержания компонентов в газовых средах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Тип «Газоанализаторы оптические ДОГ-4» утвержден с техническими и метрологическими характеристиками, приведенными в настоящем описании типа, метрологически обеспечен при выпуске из производства и в эксплуатации согласно государственной поверочной схеме

Изготовитель

ООО «Сибаналитприбор», 634055,
634055, Томск, пр Академический 10/3
тел.: (3822) 49-18-85, факс: (3822) 49-19-88

Директор ИМКЭС СО РАН
Чл.-корр.



М.В. Кабанов

Директор ООО «Сибаналитприбор»

А.А. Азбукин



Приложение Б1

УТВЕРЖДАЮ:
 Директор ООО «Сибаналитприбор»
А. А. Азбукин
 2007 года
 (подпись)
 (подпись)

АКТ

внедрения автоматических метеорологических комплексов серии АМК-03 и их модификаций

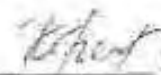
В период с 2005 по 2007 гг. в ООО «Сибаналитприбор» изготавливались разработанные при участии Королькова В.А. автоматические метеорологические комплексы серии АМК-03 и их модификации общим количеством 33 (тридцать три) штуки. Данные метеоконструкции в указанный период поставлены следующим заказчикам:

№ п/п	Наименование изделия (работы)	К-во	Заказчик	№ и дата договора	Примечание
1	Метеоконструкция АМК-03 в составе блока УТИ и блока ВПИ.	4 комплекта	ООО МНПО «ЗОНД»	№ 2-С-2002 от 15.07.2002	Для обеспечения выполнения специальных задач
2	НИОКР по разработке и изготовлению двухуровневой ультразвуковой системы автоматизированных измерений статистических и турбулентных характеристик метеорологических полей в приземном слое атмосферы	1	Фонд содействия развитию МФП в НТС (г.Москва)	Государственный контракт № 1913р/3951 от 25.03.2003	Для обеспечения проведения научных исследований
3	Двухуровневая ультразвуковая система автоматизированных измерений статистических и турбулентных характеристик метеорологических полей в приземном слое атмосферы	1	Институт оптического мониторинга СО РАН (ИОМ СО РАН) (г.Томск)	№ 3-С-2003 от 15.06.2003	Для обеспечения проведения научных исследований
4	ОКР «Разработка и изготовление 2-х опытных образцов изделия ДСВ-17» ОКР «Разработка и	2	ЗАО «Центр СК - Вектор» (г.Москва)	№ 7-2004-САП от 01.06.2004 № 8-2004-	Для обеспечения выполнения специальных задач

	изготовление 2-х опытных образцов пульта ППУ-26»			САП от 01.06.2004	
5	Автономная метеорологическая станция АМК-03/1	1	Муниципальное унитарное предприятие капитального строительства (МУ ПКС) (г.Нижневартовск)	№ 9-2004-САП от 15.12.2004	Для обеспечения учебного процесса
6	Автономная метеорологическая станция АМК-03	1	Институт оптики атмосферы СО РАН (ИОА СО РАН) (г.Томск)	№ 30-2004-САП от 01.06.2004	Для обеспечения проведения научных исследований
7	Бортовой автоматизированный метеорологический комплекс	2	ЗАО «Центр СК - Вектор» (г.Москва)	№ 5-2005-САП от 25.05.2005	Для обеспечения выполнения специальных задач
8	Переносной автоматизированный метеорологический комплект (изделие 1Б65)	4	ФГУП «НИИ «Вектор» (г.Санкт-Петербург)	№ 6-2005-САП/ВК-865 от 01.07.2005	Для обеспечения выполнения специальных задач
9	Автономная метеорологическая станция АМК-03	1	Институт оптики атмосферы СО РАН (ИОА СО РАН) (г.Томск)	№ 9-2005-САП от 01.09.2005	Для обеспечения проведения научных исследований
10	Датчик скорости ветра ДСВ-17 и блока питания БПН-52	1	Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (ИМКЭС СО РАН) (г.Томск)	№ 8-2006-ЛЭП от 15.05.2006	Для обеспечения проведения научных исследований
11	Переносной автоматизированный метеорологический комплект (изделие 1Б65)	4	ФГУП «НИИ «Вектор» (г.Санкт-Петербург)	№ 1-2006-САП от 25.03.2006	Для обеспечения выполнения специальных задач
12	Изделие «Автономный метеокомплекс АМК-03П/1»	1	ФГУП «НИИ прикладной акустики» (г.Дубна)	№ 2-2006-САП от 28.02.2006	Для обеспечения выполнения специальных задач
13	НИОКР «Разработка автономного переносного метеорологического комплекса для	1	Фонд содействия развитию МФП в НТС (г.Москва)	Государственный контракт № 4079р/6363 от 30.03.2006	Для обеспечения проведения научных исследований

	научных исследований в экспедиционных условиях «Эксметео-01»				
14	Автономный переносной метеорологический комплекс для научных исследований в экспедиционных условиях «Эксметео-01»	1	Бурятский научный центр СО РАН (БНЦ СО РАН) (г. Улан-Удэ)	№ 3-2006-САП от 25.03.2006 № 13-2006-САП от 25.03.2006 № 23-2006-САП от 01.09.2006 № 33-2006-САП от 02.10.2006	Для обеспечения проведения научных исследований
15	Переносной автоматизированный метеорологический комплект (изделие 1Б65)	1	ОАО «ШКБА» (г. Тула)	№ 5-САП-2006 от 22.05.2006	Для обеспечения выполнения специальных задач
16	Переносной автоматизированный метеорологический комплект (изделие 1Б65)	1	ОАО «КБ «ЛУЧ» (г. Рыбинск)	№ 6-САП-2006 от 13.04.2006	Для обеспечения выполнения специальных задач
17	Опытный образец бортового метеорологического комплекса БМК-03	2	ЗАО «Томский приборный завод» (г. Томск)	№ 9-2006-САП от 01.08.2006	Для обеспечения выполнения специальных задач
	Опытный образец переносного метеорологического комплекса ПМК-01	2			
18	Метеокомплект переносной автоматизированный 1Б65	1	ООО «Валента» (г. Москва)	Счет-фактура № 9 от 12.09.2006 Тов. накладная № 10 от 12.09.2006	Для обеспечения технологических процессов
19	Ранцевый метеокомплект РМК-01	1	ЗАО «Средства спасения» (г. Москва)	№ 1-2007-САП от 09.01.2007	Для обеспечения технологических процессов

Начальник ПЭО



Королева И.В.

Приложение Б2

УТВЕРЖДАЮ:

Директор ООО «Сибаналитприбор»


 А.А. Азбукин
 «01» 03 2016 года


АКТ

внедрения ультразвуковых автоматических метеорологических станций
АМК-03 и ее модификаций

В период с 01.01.2007 по 01.08.2016 года в ООО «Сибаналитприбор» изготовлены и поставлены заказчикам разработанные при участии Королькова В.А. ультразвуковые автоматические метеорологические станции (УАМС) АМК-03 и ее модификации:

Наименование изделия	Номер и дата договора	Кол-во изделий	Заказчик
Переносной автоматизированный метеорологический комплект (изделие 1Б65)	Договор № 5-САП-2006 от 22.05.2006	1	ОАО ЦКБА, г. Тула
Ранцевый метеокompлект РМК-01 (модель «ЭКСМЕТЕО»)	Договор № 1-2007-САП от 09.01.2007	1	ЗАО "Средства спасения", г. Москва
АМК-03П (модель «ЭКСМЕТЕО»)	Договор № 3-2006-САП от 25.03.2006. Договор № 13-2006-САП от 25.03.2006	1	БНЦ СО РАН, г. Улан-Уде
Переносной автоматизированный метеорологический комплект (изделие 1Б65)	Договор № 5-2007-САП от 04.06.2007	1	ФГУП "ВНИИ "СИГНАЛ" г. Ковров
Переносной автоматизированный метеорологический комплект (изделие 1Б65)	Договор № 5-2007-САП от 04.06.2007	4	ФГУП "ВНИИ "СИГНАЛ" г. Ковров
Переносной автоматизированный метеорологический комплект	Договор № 14-2007-САП от 30.10.2007, дополнительное	1	ЗАО «Воздухоплавательный центр»

комплект (шифр изделия 1Б65)	соглашение № 1 от 31.03.2008		г. Москва
Комплект метеорологический бортовой (изделие 1Б65Б)	Договор № 11-2007-САП от 24.09.2007г.	1	ЗАО "Третий спецмаш" г. Пермь
Комплект метеорологический бортовой (изделие 1Б65Б)	Договор № 11-2007-САП от 24.09.2007г.	2	ЗАО "Третий спецмаш" г. Пермь
Изделие ДСВ-17 (АМК-Б)	Счет №18 от 11.09.2007	2	АО "Центр СК-Вектор" г. Москва
Ультразвуковой датчик метеопараметров ДСВ-15 (АМК-03)	Счет №24 от 16.09.2008 Счет №29 от 08.10.2008	1	ГОУ ВПО "Томский Государственный Университет" г. Томск
Изделие ДСВ-17 в комплекте	Договор № 7-2008-САП от 22.05.2008	4	АО "Центр СК-Вектор" г. Москва
Автономная метеорологическая станция АМК-ОКСИОН (модель «ЭКСМЕТЕО»)	Договор № 11-2008-САП от 01.07.2008	1	ОАО НПЦ "Средства спасения" г. Москва
Переносной автоматизированный метеокомплекс (изделие 1Б65)	Договор № 9-2008-САП от 23.05.2008, дополнительное соглашение № 1 от 13.08.2008	4	АО "НИИ "ВЕКТОР" г. Санкт-Петербург
Переносной автоматизированный метеокомплекс (изделие 1Б65)	Договор № 9-2008-САП от 23.05.2008, дополнительное соглашение № 1 от 13.08.2008	1	АО "НИИ "ВЕКТОР" г. Санкт-Петербург
Переносной автоматизированный метеокомплект для измерения и обработки наземных метеорологических параметров 1Б65	Гос контракт 253/10/2/К/0502-08 от 28.10.2008	2	Министерство обороны РФ
Переносной	Договор № 10-2008-	1	ОАО "КБ "ЛУЧ"

автоматизированный метеокомплекс (изделие 1Б65)	САП от 20.06.2008		г. Рыбинск
Метеорологическая станция АМК-03	Счет № 3 от 19.03.2009г. Счет № 4 от 19.03.2009г. Счет № 5 от 19.03.2009г.	2	ИМКЭС СО РАН г. Томск
Метеорологическая станция АМК-03	Госконтракт № 5-ОК/2009 от 30.04.2009	1	ИМКЭС СО РАН г. Томск
Автономная метеорологическая станция "АМК-ОКСИОН" (Модель «ЭКСМЕТЕО»)	Договор № 9-2009-САП от 01.09.2009	1	ОАО НПЦ "Средства спасения" г. Москва
Переносной автоматизированный метеорологический комплект (изделие 1Б65)	Договор № 2-2009-САП от 05.03.2009	1	ФГУП "ВНИИ "СИГНАЛ" г. Ковров
Изделие ДСВ-17 в комплекте (АМК-03)	Договор № 4-2009-САП от 25.05.2009	4	АО "Центр СК-Вектор" г. Москва
Переносной автоматизированный метеорологический комплект (изделие 1Б65)	Договор № 8-2009-САП от 01.07.2009	4	ОАО "Завод им. В.А. Дегтярева" г. Ковров
Автономная метеорологическая станция "АМК-ОКСИОН" (Модель «ЭКСМЕТЕО»)	Договор № 11-2009-САП от 01.10.2009	1	ОАО НПЦ "Средства спасения" г. Москва
Переносной автоматизированный метеорологический комплект (изделие 1Б65)	Договор № 6-2009-САП от 01.06.2009г.	1	АО "Радиозавод" г. Пенза
Автономная метеорологическая станция АМК-03	Договор № 14-2009-САП от 30.10.2009	1	ЗАО "Средства спасения" г. Москва
Переносной автоматизированный	Договор № 1-2009-САП от 26.01.2009	1	ОАО "КБ "ЛУЧ" г. Рыбинск

метеорологический комплект (изделие 1Б65)			
Переносной автоматизированный метеорологический комплект (изделие 1Б65)	Договор № 7-2009-САП от 16.07.2009	1	ООО "ПромКомплекс" г. Москва
Автономная метеорологическая станция АМК-03 (Модель «ЭКСМЕТЕО»)	Договор № 16-2009 САП от 01.12.2009 Договор № 17-2009 САП от 02.12.2009 Договор № 18-2009 САП от 03.12.2009 Договор № 19-2009 САП от 04.12.2009 Договор № 20-2009 САП от 05.12.2009	1	ФГУП "НИИПА" г. Москва
Переносной метеорологический комплекс АМК-03П "МЕТЕО 3.0"	Договор № 1-2010-САП от 14.01.2010	1	ООО "НПО "Ситэк" г. Томск
Изделие 1Б65Б "Комплект метеорологический бортовой"	Договор № 15-2009-САП от 21.12.2009	4	ОАО "Завод им. В.А. Дегтярева" г. Ковров
Опытно-технологические работы по разработке и изготовлению блоков метеорологических датчиков для опытных образцов измерительной системы СИМПА-2И (АМК-03)	Госконтракт № 4-К/2010 от 19.05.2010	1	ИМКЭС СО РАН г. Томск
Изделие ДСВ-17 в комплекте (АМК-Б)	Договор № 5-2010-САП от 15.02.2010	6	АО "Центр СК-Вектор" г. Москва
Изделие 1Б65Б "Комплект метеорологический бортовой"	Договор № 15-2009-САП от 21.12.2009	3	ОАО "Завод им. В.А. Дегтярева" г. Ковров

Переносной автоматизированный метеокомплект (изделие 1Б65)	Договор № 10-2010-САП/Р-37/10 от 23.06.2010	1	ОАО "НИИССУ" г. Москва
Изделие ДСВ-17 в комплекте	Договор № 5-2010-САП от 15.02.2010	20	АО "Центр СК-Вектор" г. Москва
Ультразвуковой метеорологический комплекс АМК-03	Договор № 7-2010-САП от 02.04.2010	1	ООО "Фирма Гамми" г. Казань
Изделие ДСВ-17 в комплекте (АМК-Б)	Договор № 5-2010-САП от 15.02.2010	4	АО "Центр СК-Вектор" г. Москва
Переносной автоматизированный метеокомплект (изделие 1Б65)	Договор № 10-2010-САП/Р-37/10 от 23.06.2010	4	ОАО "НИИССУ" г. Москва
Комплект узлов и блоков для переносного автоматизированного метеокомплекта (изделия 1Б65)	Договор № 11-2010-САП от 01.06.2010	8	ФГУП "НИИТ" г. Москва
Переносной автоматизированный метеокомплект (изделие 1Б65)	Договор № 10-2010-САП/Р-37/10 от 23.06.2010	11	ОАО "НИИССУ" г. Москва
Комплект ЗИП-Г к изделию 1Б65Б	Договор № 9-2010-САП от 20.05.2010	2	ОАО "ВНИИ СИГНАЛ" г. Ковров
Автономная метеорологическая станция "АМК-03П"	договор № 18-2010-САП от 08.10.2010	1	ОАО НПЦ "Средства спасения" г. Москва
Услуги согласно договору № 23-САП-2010 от 01.11.2010 года по оборудованию двух метеопостов для информационно-измерительной метеосистемы (ИИС) (АМК-03)	Договор № 23-САП-2010 от 01.11.2010	2	ИМКЭС СО РАН г. Томск

Переносной автоматизированный метеокомплект (изделие 1Б65)	Договор № 6-2010-САП от 19.03.2010	1	ОАО "КБ "ЛУЧ" г. Рыбинск
Изделие 1Б65Б "Комплект метеорологический бортовой"	Договор № 15-2009-САП от 21.12.2009	4	ОАО "Завод им. В.А. Дегтярева" г. Ковров
Изделие 1Б65Б "Комплект метеорологический бортовой"	Договор № 9-2010-САП от 20.05.2010	2	ОАО "ВНИИ "СИГНАЛ" г. Ковров
Блок метеорологических датчиков для опытного образца измерительной системы СИМПА-2И (АМК-03)	Договор № 2-2011-САП от 01.02.2011 Договор № 3-2011-САП от 02.02.2011 Договор № 4-2011-САП от 03.02.2011	1	ИМКЭС СО РАН г. Томск
Изделие 1Б65Б "Комплект метеорологический бортовой"	Договор № 17-2010-САП от 01.10.2010г.	1	АО "Радиозавод" г. Пенза
Автономная метеорологическая станция АМК-03 с комплектом программного обеспечения "METEO DB"	Договор № 7-2011-САП от 01.03.2011	4	ООО "Промышленные компоненты" г. Москва
Автоматизированная метеорологическая станция АМК-03	Договор № 6-2011-САП от 21.03.2011	1	ФГУП "ВНИИА" г. Москва
Датчик метеопараметров ДСВ-15 АМЯ3.839.008, в комп Блок питания БПН-52 АМЯ5.087.122 Метеомачта МЧТ-19 АМЯ4.115.020 с чехлом для укладки Контейнер для	Государственный контракт № 6-К/2011 от 05.05.2011	1	ИМКЭС СО РАН г. Томск

укладки и транспортировки элементов(АМК-03, модель «ЭКСМЕТЕО»			
Метеокомплект 1Б65	Договор № 8-2011- САП от 15.03.2011г.	1	АО "Радиозавод" г. Пенза
Изделие ДСВ-17 в комплекте (АМК-Б)	Договор № 20-2010- САП от 18.10.2010	10	АО "Центр СК- Вектор" Г.Москва
Изделие 1Б65Б "Комплект метеорологический бортовой"	Договор № 1-2011- САП от 31.01.2011г.	1	АО "Радиозавод" г. Пенза
Изделие 1Б65Б "Комплект метеорологический бортовой"	Договор № 15-2009- САП от 21.12.2009	2	ОАО "Завод им. В.А. Дегтярева" г. Ковров
Изделие ДСВ-17 в комплекте (АМК-Б)	Договор № 20-2010- САП от 18.10.2010	6	АО "Центр СК- Вектор" г. Москва
АМК-03 (модель «ЭКСМЕТЕО»	Государственный контракт № 12- ОАЭФ/2011 от 22.08.2011	4	ИМКЭС СО РАН г. Томск
Автономная метеорологическая станция "АМК-03"	Договор № 15-2011- САП от 18.07.2011	1	ОАО НПЦ "Средства спасения" г. Москва
Датчик метеорологических параметров ДСВ-15 (АМК-03)	Договор № 17-2011- САП от 15.09.2011 Договор № 18-2011- САП от 15.09.2011 Счет №35 от 21.09.2011 Счет №36 от 21.09.2011 Счет №37 от 21.09.2011	1	ИОА СО РАН г. Томск
Изделие ДСВ-17 в комплекте (АМК-Б)	Договор № 20-2010- САП от 18.10.2010	6	АО "Центр СК- Вектор" г. Москва
Переносной автоматизированный	Договор № 15-2010- САП от 17.09.2010	1	ОАО "Концерн "Созвездие"

метеокомплект (изделие 1Б65)			г. Воронеж
Изделие ДСВ-17 в комплекте (АМК-Б)	Договор № 20-2010- САП от 18.10.2010	3	АО "Центр СК- Вектор" г. Москва
Изделие 1Б65Б "Комплект метеорологический бортовой"	Договор № 15-2009- САП от 21.12.2009	1	ОАО "Завод им. В.А. Дегтярева" г. Ковров
Автономная метеорологическая станция "АМК-03"	Договор № 16-2011- САП от 07.09.2011	1	ОАО НПЦ "Средства спасения" г. Москва
Автономная метеорологическая станция АМК-03	Договор № 20-2011- САП от 20.09.2011	1	ЗАО "Средства спасения" г. Москва
Автономная метеорологическая станция АМК-03	Договор № 21-2011- САП от 23.09.2011	3	ОАО НПЦ "Средства спасения" г. Москва
Информационно- измерительная система "ИВС- Метео-5" на основе автоматизированных ультразвуковых метеорологических станций "АМК-03"	Договор № 07/11-Н от 05.07.2011	5	ООО "Компания "Нова" г. Красноярск
Датчик метеопараметров ДСВ-15 АМЯЗ.839.008 (АМК-03)	Государственный контракт № 46- К/2011 от 22.12.2011	1	ИМКЭС СО РАН г. Томск
Переносной автоматизированный метеокомплект для измерения и обработки наземных метеорологических параметров 1Б65	Договор № 26-2011- САП от 30.11.2011	4	АО "НИИ "ВЕКТОР" г. Санкт-Петербург
Изделие ДСВ-17 в комплекте	Договор № 1-2012- САП от 31.01.2012	10	АО "Центр СК- Вектор" г. Москва
Автономная	Договор № 05/05/12	2	ИОА СО РАН

метеорологическая станция входящая в состав комплекса аппаратуры измерения астроклиматических и метеопараметров (АМК-03, модель «ЭКСМЕТЕО»)	от 24.05.2012		г. Томск
Изделие ДСВ-17 в комплекте (АМК-Б)	Договор № 1-2012-САП от 31.01.2012	11	АО "Центр СК-Вектор" г. Москва
Автономная метеорологическая станция АМК-03	Счет № 9 от 06.06.2012	1	ООО "Фирма ВЕЛЛКОМ" г. Москва
Автономная метеорологическая станция АМК-03	Договор № 7-2012 - САП от 07.06.2012	1	ЗАО "Средства спасения" г. Москва
Автономная метеорологическая станция АМК-03	Договор № 5-2012-САП от 04.06.2012	2	ОАО НПЦ "Средства спасения" г. Москва
Блоки и составные части изделия "Автономная метеорологическая станция АМК-03П" (в комплекте)	Договор № 9-2012-САП от 27.06.2012	5	АО "Завод им. С.М. Кирова" г. Петропавловск (респ. Казахстан)
Блоки и составные части изделия "Автономная метеорологическая станция АМК-03П" (в комплекте)	Договор № 10-2012-САП от 27.06.2012	5	АО "Завод им. С.М. Кирова" г. Петропавловск (респ. Казахстан)
Автономная метеорологическая станция АМК-03	Договор № 12-2012-САП от 17.08.2012	1	ОАО НПЦ "Средства спасения" г. Москва
Автономная метеорологическая станция АМК-03	Счет № 22 от 28.09.2012	2	ОАО НПЦ "Средства спасения" г. Москва
Автономная метеорологическая станция АМК-03	Договор № 16-2012-САП от 23.11.2012	1	ТОИ ДВО РАН г. Владивосток

станция АМК-03			
Автономная метеорологическая станция АМК-03	Счет № 23 от 12.10.2012	1	ОАО НПЦ "Средства спасения" г. Москва
Автономная метеорологическая станция АМК-03	ГПД № 36-ЕП/2012 от 14.12.2012	1	ИМКЭС СО РАН г. Томск
Изделие ДСВ-17 в комплекте (АМК-Б)	Договор № 1-2013-САП от 11.01.2013	6	АО "Центр СК-Вектор" г. Москва
Комплект метеорологический бортовой 1Б65Б	Договор № 17-2012-САП от 12.12.2012	1	ОАО "МАК "Вымпел" г. Москва
Автономная метеорологическая станция АМК-03	Договор № 19-2012-САП от 20.12.2012	1	ФГУП "ВНИИА" г. Москва
Автономная метеорологическая станция АМК-03	Договор № 2-2013-САП от 15.01.2013	3	ОАО НПЦ "Средства спасения" г. Москва
Комплект метеорологический бортовой 1Б65Б	Договор № 11-2012-САП от 03.07.2012	3	ОАО "Завод им. В.А. Дегтярева" г. Ковров
Автономная метеорологическая станция АМК-03	Договор № 8-2013-САП от 11.06.2013	1	ООО "СФУ-Механика роста" г. Москва
Автономная метеорологическая станция АМК-03П	Договор № 6-2013-САП от 05.04.2013	1	ОАО "ФНПЦ "НИИ прикладной химии» г. Москва
Метеокомплект 1Б65	Договор № 5-2013-САП от 25.02.2013г.	3	АО "Радиозавод"
Комплект метеорологический бортовой 1Б65Б	Договор № 11-2012-САП от 03.07.2012	2	ОАО "Завод им. В.А. Дегтярева" г. Ковров
Изделие ДСВ-17 в комплекте (АМК-Б)	Договор № 9-2013-САП от 24.06.2013	4	АО "Центр СК-Вектор" г. Москва
Комплект метеорологический бортовой 1Б65Б	Договор № 11-2012-САП от 03.07.2012	1	ОАО "Завод им. В.А. Дегтярева" г. Ковров
Изделие ДСВ-17 в комплекте (АМК-Б)	Договор № 9-2013-САП от 24.06.2013	16	АО "Центр СК-Вектор"

			г. Москва
Двухуровневый автоматизированный метеокомплекс	Договор № АЭ -196 /12098/13 от 18.11.2013г.	2	ТУСУР г. Томск
Автономная метеорологическая станция АМК-03П	Договор № 11-2013-САП от 14.08.2013	3	ООО "Дипром" г. Москва
Датчик метеорологических параметров ДСВ-15 (АМК-03)	Договор № 19-2013-САП от 11.11.2013	1	ИОА СО РАН г. Томск
Автономная метеорологическая станция АМК-03	Договор № 16-2013-САП от 02.10.2013	2	ОАО НПЦ "Средства спасения" г. Москва
Автономная метеорологическая станция АМК-03	Счет № 5 от 24.01.2014	1	ОАО НПЦ "Средства спасения" г. Москва
Комплект метеорологический бортовой 1Б65Б	Договор № 14-2013-САП от 25.09.2013	1	ОАО "НПО "Орион" г. Москва
Изделие ДСВ-17 в комплекте (АМК-Б)	Договор № 4-2014-САП от 20.02.2014	9	АО "Центр СК-Вектор" г. Москва
Комплект метеорологический бортовой 1Б65Б	Договор № 23-2013-САП от 21.03.2014	1	ОАО ЦКБА г. Тула
Изделие ДСВ-17 в комплекте (АМК-Б)	Договор № 4-2014-САП от 20.02.2014	2	АО "Центр СК-Вектор" г. Москва
Комплект метеорологический бортовой 1Б65Б	Договор № 24-2013-САП от 19.12.2013	4	ОАО "ВНИИ "СИГНАЛ" г. Ковров
Комплект метеорологический бортовой 1Б65Б	договор № 3-2014-САП от 27.01.2014	1	ОАО "ВНИИ "СИГНАЛ" г. Ковров
Комплект ЗИП-Г к комплекту метеорологическому 1Б65Б	договор № 3-2014-САП от 27.01.2014	1	ОАО "ВНИИ "СИГНАЛ" г. Ковров
Изделие ДСВ-17 в комплекте (АМК-Б)	Договор № 5-2014-САП от 20.02.2014	4	АО "Центр СК-Вектор" г. Москва

Изделие ДСВ-17 в комплекте (АМК-Б)	Договор № 4-2014-САП от 20.02.2014	4	АО "Центр СК-Вектор" г. Москва
Метеокомплект 1Б65, АМЯ2.702.090 ТУ	Договор № 566-83/14 от 07.03.2014	8	ОАО "НИИССУ" г. Москва
Комплект метеорологический бортовой 1Б65Б	Договор № 11-2012-САП от 03.07.2012	2	ОАО "Завод им. В.А. Дегтярева" г. Ковров
Изделие ДСВ-17 в комплекте (АМК-Б)	Договор № 4-2014-САП от 20.02.2014	5	АО "Центр СК-Вектор" г. Москва
Метеокомплект 1Б65, АМЯ2.702.090 ТУ	Договор № 566-83/14 от 07.03.2014	9	ОАО "НИИССУ" г. Москва
Автономная метеорологическая станция АМК-03П	Договор № 6-2014-САП от 15.01.2014, Дополнительное соглашение № 1 от 21.08.2014	2	АО "НПО "ЛЭМЗ" г. Москва
Метеокомплект 1Б65, АМЯ2.702.090 ТУ	Договор № 566-83/14 от 07.03.2014	15	ОАО "НИИССУ" г. Москва
Изделие ДСВ-17 в комплекте (АМК-Б)	Договор № 4-2014-САП от 20.02.2014	2	АО "Центр СК-Вектор" г. Москва
Изделие ДСВ-17 в комплекте	Договор № 5-2014-САП от 20.02.2014	2	АО "Центр СК-Вектор" г. Москва
Метеокомплект 1Б65	Договор № 21-2013-САП от 29.11.2013г.	1	АО "Радиозавод" г. Пенза
Автономная метеорологическая станция АМК-03	Счет № 16 от 03.07.2014	2	ОАО НПЦ "Средства спасения" г. Москва
Автономная метеорологическая станция АМК-03П	Договор № 11-2014-САП от 18.07.2014, Дополнительное соглашение № 1	3	ОАО "ФНПЦ "НИИ прикладной химии» г. Москва
Метеосистема ТИК-АМК (АМК-03)	Договор № 21-2014-САП от 11.12.2014	1	ИОА СО РАН г. Томск
Автономная метеорологическая станция АМК-03П	Счет № 31 от 27.11.2014	1	ЗАО "Средства спасения" г. Москва
Автономная метеорологическая станция АМК-03П	Счет № 34 от 03.12.2014	1	ООО "ГлавТрейд" г. Москва

Изделие ДСВ-17 в комплекте (АМК-Б)	Договор № 27-2014-САП от 05.12.2014	21	АО "Центр СК-Вектор" г. Москва
Автономная метеорологическая станция АМК-03	Счет № 2 от 25.02.2015	1	ФГУП "ВНИИА" г. Москва
Изделие ДСВ-17 в комплекте (АМК-Б)	Договор № 27-2014-САП от 05.12.2014	3	АО "Центр СК-Вектор" г. Москва
Комплект метеорологический бортовой 1Б65Б	Договор № 22-2014-САП от 18.11.2014	1	ЗАО "Транзас" г. Москва
Метеокомплект 1Б65	Договор № 1-2015--САП от 27.01.2015	1	ОАО ЦКБА г. Тула
Изделие ДСВ-17 в комплекте (АМК-Б)	Договор № 27-2014-САП от 05.12.2014	13	АО "Центр СК-Вектор" г. Москва
Изделие ДСВ-17 в комплекте (АМК-Б)	Контракт № 1317187320632040117000483/8-2015-САП от 07.05.2015	1	АО "Центр СК-Вектор" г. Москва
Метеокомплект 1Б65	Договор № 2-2015-САП от 28.01.2015г.	3	АО "Радиозавод" г. Пенза
Автономная метеорологическая станция АМК-03П	Договор № 11-2015-САП от 15.06.2015	1	ПАО "Роствертол" г. Москва
Изделие ДСВ-17 в комплекте (АМК-Б)	Контракт № 1317187320632040117000483/8-2015-САП от 07.05.2015	35	АО "Центр СК-Вектор" г. Москва
Автономная метеорологическая станция АМК-03	Договор № 18-2015-САП от 03.09.2015	2	ООО "Компания Хеликон" г. Москва
Автономная метеорологическая станция АМЯ2.702.112	Договор № 22-2015-САП от 17.11.2015	1	ИОА СО РАН г. Томск
Автономная метеорологическая станция АМК-03П	Договор № 19-2015-САП от 07.09.2015	1	ФГУП "ВНИИА" г. Москва
Изделие ДСВ-17 в комплекте (АМК-Б)	Контракт № 1317187320632040117000483/8-2015-САП от 07.05.2015	40	АО "Центр СК-Вектор" г. Москва

Автономная метеостанция АМК-03С	Договор № 1610 от 16.10.2015	1	ФГУП "ВНИИА" г. Москва
Изделие ДСВ-17 в комплекте (АМК-Б)	Контракт № 1317187320632040117000483/6-2016-САП от 25.04.2016	40	АО "Центр СК-Вектор" г. Москва
Комплект метеорологический бортовой 1Б65Б	Контракт № 1517187314541020128002763/1-2016-САП от 26.01.2016	4	АО НПФ "Старт" г. Москва
Комплект метеорологический бортовой 1Б65Б	Контракт № 9-2015-САП от 12.05.2015	20	ОАО "Завод им. В.А. Дегтярева" г. Ковров
Комплект метеорологический бортовой 1Б65Б	Контракт № 1417187320821010106001037/26-2015-САП от 28.12.2015	1	АО НПО «Сплав» г. Тула
Метеокомплект 1Б65	Контракт № 1516187321671040120010833/2-2016-САП/ЕП-2298 от 27.01.2016	6	АО НИИ «Вектор» г. Санкт-Петербург
Изделие 1Б65	Контракт № 1618187315071422245016493/569-530/16 от 21.06.2016	6	ОАО «НИИССУ» г. Москва
Метеокомплект 1Б65	Контракт № 10-2016-САП от 02.06.2016	2	АО «НПК «СПП» г. Москва
Изделие ДСВ-17 в комплекте (АМК-Б)	Договор № 11-2016-САП от 31.05.2016	3	АО "Центр СК-Вектор" г. Москва
Изделие ДСВ-17 в комплекте (АМК-Б)	Договор № 12-2016-САП от 17.08.2016	41	АО "Центр СК-Вектор" г. Москва

Гл. бухгалтер _____ /Королева И.В./

Приложение Б3

УТВЕРЖДАЮ:

Директор ИМКЭС СО РАН

чл.-кор. РАН

М.В. Кабанов

« » 2007 года.



АКТ

внедрения автоматических метеорологических комплексов серии АМК-03 и их модификаций

В период с 2001 по 2007 гг. в ИМКЭС СО РАН изготавливались разработанные при участии **Королькова В.А.** автоматические метеорологические комплексы серии АМК-03 и их модификации общим количеством 9 (девять) штук. Данные метеокomплексы в указанный период поставлены следующим заказчикам:

№ п/п	Наименование изделия	К-во	Заказчик	№ и дата договора	Примечание
1	Автоматический метеокomплекс «АМК-02»	1	ОАО «ЗСМК» (г.Новокузнецк)	№ 1-2001-ЛЭП/1033101 от 11.07.2001	Применяется в качестве технологического устройства обеспечения производственных процессов.
2	НИОКР «Двухуровневый автоматизированный метеорологический комплекс АМК-02У»	1	Бурятский научный центр СО РАН (БНЦ СО РАН) (г.Улан-Удэ)	б/н от 19.09.2001	Применяется для выполнения научных исследований.
3	Автоматизированный метеорологический комплекс АМК-02	1	Компания технологий «Поли» (г.Пекин, КНР)	№2001 DCSX/X47016SC от 21.12.2001	Применяется для выполнения научных исследований
4	ИИР «Исследование вариаций метеопараметров с помощью автоматического метеокomплекса АМК при испытаниях на объекте ГПУ «Мосэкомониторинг»		Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН (ИФА РАН) (г.Москва)	№ 220/1 от 24.12.2001	Применяется для выполнения научных исследований
5	ОКР с последующей поставкой «Метеосистема стационарная двухуровневая расширенным программным	1	ООО «Комет-Альянс» (г. Москва)	№ 406 от 12.05.2003	Применяется в качестве технологического устройства

	обеспечением Метеосистема в мобильном исполнении со стандартным программным обеспечением»	1			
6	НИР «Устройство измерения метеопараметров» (шифр НИР «Рейд- трасса-АМК»)	1	Институт оптики атмосферы СО РАН (ИОА СО РАН) (г.Томск)	№ 20- 2004/ЛЭП от 05.01.2004	Применяется для выполнения научных исследований
7	ОКР «Ультразвуковой метеокомплекс морского исполнения» (шифр «АМК-3/1-М»)	1	Институт оптики атмосферы (ИОА СО РАН) (г.Томск)	№ 30- 2004/ЛЭП от 25.08.2004	Применяется для выполнения научных исследований
8	ДСВ-17 в комплекте с ППУ-26	2	ЗАО «Центр СК - Вектор» (г.Москва)	№ 1-2006- ЛЭП от 01.05.2006	Применяется для выполнения научных исследований

Начальник ПЗО

 Соколова О.А.

Приложение Б4



АКТ
внедрения в эксплуатацию автоматических метеорологических
комплексов серии АМК-03
для использования в составе измерительной аппаратуры транспортных
машин радиохимической и биологической разведки (РХБЗ).

Автоматические метеорологические комплексы АМК-03 (бортовой вариант) в составе датчика метеопараметров ДСВ-17, датчика температуры почвы ДТР-14, блока управления и индикации ППУ-26, блока интерфейса ИНТ-11, разработанные при участии Королькова В.А., используются с 01.05. 2005 года в количестве двух комплектов в ЗАО «ЦЕНТР СПЕЦИАЛЬНОГО КОНСТРУИРОВАНИЯ «ВЕКТОР» (г. Москва) для комплектации измерительной аппаратуры транспортных машин радиохимической и биологической разведки.

Настоящий акт не является основанием для финансовых претензий.

Приложение В1

П Р И К А З

МИНИСТРА ОБОРОНЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

№ 173

3 мая 2007 г.

г. Москва

О принятии на снабжение Вооруженных Сил Российской Федерации переносного автоматизированного метеомолюблета для измерения и обработки наземных метеорологических параметров 1Б65

На основании положительных результатов государственных испытаний П Р И К А З Ы В А Ю:

1. Принять на снабжение Вооруженных Сил Российской Федерации переносной автоматизированный метеомолюблет для измерения и обработки наземных метеорологических параметров 1Б65 (шифр «Борисполь-2») с основными тактико-техническими характеристиками согласно приложению к настоящему приказу.

2. Признать переносному автоматизированному метеомолюблету для измерения и обработки наземных метеорологических параметров 1Б65 (шифр «Борисполь-2»):

действительное полное наименование – «Переносной автоматизированный метеомолюблет для измерения и обработки наземных метеорологических параметров 1Б65»;

сокращенное наименование – «Метеомолюблет 1Б65».

Установить для метеомолюблета 1Б65 код по Классификатору вооружения, военной техники и других материальных средств Министерства обороны Российской Федерации – А2 Б6 1652 6.

По Общероссийскому классификатору продукции для метеомолюблета 1Б65 установить код 43 1118 1001.

3. Предназначить метеомолюблет 1Б65 для оснащения воинских частей Вооруженных Сил Российской Федерации в количестве десяти метеомолюблета ДМК-1. Метеомолюблет 1Б65 подлежит включению в таблицу к штатом указанных воинских частей. Метеомолюблет ДМК-1 по полному его наименованию использовать наряду с метеомолюблетом 1Б65.

4. Метеомолюблет 1Б65, его основные тактико-технические характеристики, конструкторскую документацию, а также действительное полное и сокращенное наименование считать несекретными.

5. Возложить функции планирования, обеспечения, определения потребностей, доводки и осуществления ремонта прототипов, находящихся в ведении Министерства обороны Российской Федерации, заказа работ по техническому и авторскому надзору, сервисному обслуживанию и оказанию технической помощи непосредственно в войсковых условиях, а также осуществления заказов на закупку метеомолюблета 1Б65 на Главном ракетно-артиллерийском управлении Министерства обороны Российской Федерации.

ПЕРВЫЙ ЗАМЕСТИТЕЛЬ МИНИСТРА ОБОРОНЫ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

генерал армии

Ю. Балусевский



Приложение В2



Дата: 2015

Исх. № ГС

 Директору ООО «Сибанализприбор»
 А.А. Азбукину

Ф: (3822)49-19-88

Уважаемый Александр Анатольевич!

В связи с успешным завершением первого пуска с космодрома «Восточный» и в связи с высокой оценкой ФГУП «ЦЭНКИ» нашего вклада в его осуществлении, выражаю Вашему коллективу глубокую благодарность за то, что автоматизированные метеостанции, поставленные на Вами на космодром, успешно прошли испытания и показали стабильную работу при метеорологическом обеспечении пуска РКН «Союз-2.1а».

С уважением,

 Главный конструктор направления  И.С. Выдегжанин



Заместителю директора по научной работе
Королькову В.А.

Автоматический метеокomплекс АМК-01 с ультразвуковым каналом измерения параметров ветра и температуры воздуха эксплуатируется в Спортивной парашютной команде Сил воздушной обороны, а ныне в Центре парашютной подготовки Вооруженных Сил Республики Казахстан с 2005 года и используется для технического обеспечения парашютных прыжков при проведении учебного процесса по подготовке специалистов парашютного профиля, спортсменов-парашютистов, а так же ежегодного обеспечения республиканских и ведомственных соревнований по парашютному спорту.

В течение всего периода работы метеокомплексе показал себя надежным средством измерения, обладающим высокими техническими характеристиками и эксплуатационными показателями. Он помогает руководителю парашютных прыжков и дежурному по площадке приземления оперативно отслеживать метеорологическую обстановку в районе проведения парашютных прыжков с большой точностью. Высокий потенциал данного прибора также с успехом справляется с задачами, которые стоят перед средствами метеорологического обеспечения соревнований, проводимых по линии международной авиационной организации (FAI).

По итогам опытной эксплуатации метеоконплеке АМК-01 (или его современная модификация АМК-03) будет рекомендован для внедрения в учебный процесс подготовки спортсменов-парашютистов гражданских организаций, а так же для снабжения метеорологических подразделений Сил воздушной обороны, Автомобильных войск и войск специального назначения Вооруженных Сил Республики Казахстан.

Начальник центра – главный тренер Центра парашютной подготовки Вооруженных Сил Республики Казахстан

Л.Д. ИВАНОВ

Приложение В3

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель директора

ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева», к.т.н.



Ю.А. Кустиков

2016 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

о возможности использования метода спонтанного комбинационного рассеяния для определения компонентного состава искусственных газовых смесей – имитаторов природного газа.

Работа выполнена в рамках договора на научно-техническую работу №242/1861 от 16.07.2015 г. между ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» и ООО «СКБ НП «Академприбор».

Целью работы являлась оценка возможности использования метода спонтанного комбинационного рассеяния (далее – СКР) для определения компонентного состава искусственных газовых смесей – имитаторов природного газа на примере макета СКР-газоанализатора, разработанного ООО «СКБ НП «Академприбор».

Экспериментальные исследования выполнены сотрудниками ООО «СКБ НП «Академприбор» в соответствии с Программой, разработанной ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева». Исследования проводились с использованием трех стандартных образцов утвержденного типа (ГСО) – имитаторов природного газа и трех ГСО водяных паров в метане, аттестованные значения молярной доли компонентов в которых приведен в таблице 1.

При выборе компонентного состава и диапазона молярной доли компонентов в ГСО для исследований использовались положения ГОСТ 5542—2014, ГОСТ 31371.7—2008 и ГОСТ 31369-2008, регламентирующие требования к качеству природного газа и методикам анализа компонентного состава, а также учитывались особенности практического применения СКР-анализатора (в частности, ограничение по регистрируемым компонентам и ограничение по минимальному давлению подаваемой в анализатор газовой смеси).

Первичная обработка экспериментальных данных осуществлена ООО «СКБ НП «Академприбор». Оценка метрологических характеристик метода выполнена в ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева».

Т а б л и ц а 1 - Компонентный состав ГСО, использованных при проведении исследований

Наименование компонента	Молярная доля компонентов в ГСО, %		
	Смесь №1	Смесь №2	Смесь №3
Метан	99,93542	95,9913	49,0235
Этан	0,00496	0,997	15,1
Пропан	0,00474	0,509	6,05
И-Бутан	0,00497	0,102	0,816
Н-Бутан	0,00493	0,105	0,709
Диоксид углерода	0,0047	1,00	10,1
Азот	0,0054	1,039	15,1
Н-Пентан	0,00503	0,0474	0,205
И-Пентан	0,00522	0,0472	0,19
Кислород	0,0048	0,0198	2,01
Водород	0,00559	0,102	0,5
Н-Гексан	0,00445	0,0236	0,131
Нео-Пентан	0,0048	0,0100	0,0511
Метанол	0,00499	0,0067	0,0144
	Смесь №1	Смесь №2	Смесь №3
Водяные пары	0,00113	0,0055	0,060

При установлении метрологических характеристик СКР-метода были оценены следующие показатели:

- повторяемость результатов измерений молярной доли в условиях сходимости;
- повторяемость результатов измерений молярной доли в условиях воспроизводимости;
- границы рабочего диапазона измерений молярной доли;
- достоверность (правильность) результатов измерений молярной доли.

Показатель повторяемости результатов измерений молярной доли в условиях сходимости оценивался по значению относительного расхождения результатов измерений, зарегистрированных при выполнении одной серии измерений (10 единичных измерений).

Показатель повторяемости результатов измерений молярной доли в условиях воспроизводимости оценивался по значению относительного расхождения результатов измерений, зарегистрированных при выполнении всех серий измерений молярной доли компонента в одной и той же смеси.

Границы рабочего диапазона измерений молярной доли устанавливались с учетом оценки показателей повторяемости и существующих требований к метрологическим характеристикам результатов измерений (расширенная неопределенность не должна превышать (25 - 30) %).

Достоверность (правильность) результатов измерений молярной доли оценивалась по разности между паспортным и измеренным значениями молярной доли компонента в ГСО.

Для каждой из смесей ГСО заказчиком было представлено от 20 до 100 результатов измерений, выполненных сериями по 10 единичных измерений.

В ходе оценки метрологических характеристик СКР-газоанализатора установлено:

1 - при низких значениях молярной доли компонентов (около 0,005 %) наблюдается большой разброс результатов как в рамках одной серии измерений, так и между сериями практически для всех компонентов; оценка относительной прецизионности измерений составляет от 30 до 100%;

2 - при значениях молярной доли компонентов свыше 0,02 – 0,05 %, оценка относительной прецизионности измерений составляет от десятых долей до единиц процента (не более 5 %);

3 - наблюдается прямая зависимость между содержанием компонента и достоверностью результата измерений его молярной доли для всех компонентов кроме пентанов и гексанов, для которых может иметь место смещение из-за некорректности базовых спектров этих компонентов;

4 - нижние границы диапазона измерений молярной доли компонентов могут быть определены в ходе дополнительных исследований с использованием ГСО соответствующих составов.

ВЫВОДЫ

Метод СКР представляет несомненный интерес с точки зрения принципиальной возможности обеспечения одновременного количественного определения практически всех компонентов природного газа кроме гелия.

Метод спонтанного комбинационного рассеяния может быть использован для анализа искусственных газовых смесей – имитаторов природного газа при содержании компонентов не менее 0,02-0,05 % молярной доли.

С точки зрения оценки соответствия СКР метода требованию норматива ГОСТ 31369—2008 на минимально определяемое содержание компонента (0,005 % молярной доли), имеется ограничение возможности применения метода, реализованного в конкретном исследованном макете СКР-анализатора, в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений при обращении природного газа в РФ.

Анализаторы, принцип действия которых основан на методе спонтанного комбинационного рассеяния, могут найти широкое применение для целей определения компонентного состава природного газа, продуктов его технологической переработки, а также газовых смесей аналогичного состава (биогазы, попутные нефтяные газы, газы нефтепереработки и пр.) в областях, не являющихся сферой государственного регулирования обеспечения единства измерений.

Нормативно-технические документы

ГОСТ 5542—2014 Газы горючие природные промышленного и коммунально-бытового назначения. Технические условия

ГОСТ 31371.7—2008 Газ природный. Методика выполнения измерений молярной доли компонентов

ГОСТ 31369—2008 Газ природный. Вычисление теплоты сгорания, плотности, относительной плотности и числа Вобба на основе компонентного состава.

Руководитель

научно-исследовательского отдела
государственных эталонов в области
физико-химических измерений, д.т.н.,
профессор



Л.А. Кононелко

Руководитель сектора, к.х.н.



Т.А. Попова