Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН)

На правах рукописи

КУЗОВНИКОВА ЛЮДМИЛА ВЛАДИМИРОВНА

РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА ДИСТАНЦИОННОГО ОБНАРУЖЕНИЯ И ИДЕНТИФИКАЦИИ СЛЕДОВ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ НА ПОВЕРХНОСТИ ОБЪЕКТОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ИК-ДИАПАЗОНА

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

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель доктор физико-математических наук, профессор Ворожцов Александр Борисович

Бийск – 2018

оглавление

Введение	5
Глава 1. Общая характеристика проблемы и обзор методов ее решения.	11
1.1 Методы дистанционного обнаружения следовых количеств ВВ	11
1.1.1 Спектроскопия комбинационного рассеяния света	15
1.1.2 Спектроскопия когерентного актистоксова комбинационного рассе	яния
света	16
1.1.3 Лазерно-искровая эмиссионная спектроскопия	17
1.1.4 Лазерно-индуцированная флуоресценция продуктов фотофрагмент	ации
BB	19
1.1.5 ИК-спектроскопия продуктов лазерной фотофрагментации ВВ	20
1.1.6 Методы лазерной фототермической спектроскопии	21
1.1.7 Метод активного формирования спектральных изображений	23
1.2 Выбор метода обнаружения ВВ	25
Глава 2. Теоретические основы метода активного формиро	вания
спектральных изображений	26
спектральных изображений 2.1 Выбор рабочей области исследования	26 26
спектральных изображений. 2.1 Выбор рабочей области исследования 2.2 Формирование гиперспектрального куба данных	26 26 29
спектральных изображений. 2.1 Выбор рабочей области исследования 2.2 Формирование гиперспектрального куба данных 2.3 Выбор анализируемых веществ и материалов-подложек	26 26 29 35
 спектральных изображений. 2.1 Выбор рабочей области исследования	26 26 29 35 39
 спектральных изображений. 2.1 Выбор рабочей области исследования	26 26 29 35 39 39
 спектральных изображений. 2.1 Выбор рабочей области исследования	26 29 35 39 39 40
 спектральных изображений. 2.1 Выбор рабочей области исследования	26 26 35 39 39 40 41
 спектральных изображений. 2.1 Выбор рабочей области исследования	26 26 29 35 39 39 40 41 43
 спектральных изображений. 2.1 Выбор рабочей области исследования. 2.2 Формирование гиперспектрального куба данных 2.3 Выбор анализируемых веществ и материалов-подложек. 2.4 Выбор методов создания тестовых образцов следовых количеств ВВ 2.4.1 Перевод отпечатков пальцев. 2.4.2 Взвешивание. 2.4.3 Просеивание 2.4.4 Распыление 2.4.5 Струйная печать 	26 29 35 39 39 40 41 43 46
 спектральных изображений. 2.1 Выбор рабочей области исследования. 2.2 Формирование гиперспектрального куба данных 2.3 Выбор анализируемых веществ и материалов-подложек. 2.4 Выбор методов создания тестовых образцов следовых количеств ВВ 2.4.1 Перевод отпечатков пальцев. 2.4.2 Взвешивание. 2.4.3 Просеивание 2.4.4 Распыление 2.4.5 Струйная печать 2.4.6 Микропипетирование 	26 26 29 35 39 39 40 41 43 43 46 49
 спектральных изображений. 2.1 Выбор рабочей области исследования. 2.2 Формирование гиперспектрального куба данных	26 26 29 35 39 39 40 41 43 46 46 49 50
 спектральных изображений. 2.1 Выбор рабочей области исследования. 2.2 Формирование гиперспектрального куба данных. 2.3 Выбор анализируемых веществ и материалов-подложек. 2.4 Выбор методов создания тестовых образцов следовых количеств ВВ 2.4.1 Перевод отпечатков пальцев. 2.4.2 Взвешивание. 2.4.3 Просеивание 2.4.4 Распыление 2.4.5 Струйная печать 2.4.6 Микропипетирование 2.4.7 Центрифугирование. 2.4.8 Погружение. 	26 26 29 35 39 39 40 41 43 46 49 50 51

2.5.1 Предварительная обработка 53
2.5.2 Статистическая обработка 55
Глава 3. Разработка и создание измерительного комплекса обнаружения
конденсированных следов ВВ65
3.1 Выбор оборудования и создание измерительного комплекса
3.1.1 Выбор источника излучения 65
3.1.2 Выбор ИК-приемника71
3.1.3 Выбор вспомогательного оборудования 73
3.1.4 Выбор материалов и элементов оптической системы 75
3.2 Настройка и автоматизация измерительного комплекса
3.3 Подготовка тестовых образцов
3.4 Методика выполнения исследований92
Глава 4. Экспериментальные исследования и определение характеристик
измерительного комплекса
4.1 Регистрация эталонных спектров ВВ93
4.2 Результаты экспериментального исследования обнаружения и
идентификации ВВ
4.3 Определение характеристик измерительного комплекса и исследование
возможности их улучшения 107
4.3.1 Определение вероятности обнаружения и идентификации ВВ 107
4.3.2 Определение предела обнаружения измерительного комплекса 108
4.3.3 Определение селективности обнаружения и идентификации ВВ 110
4.3.4 Определение дальности и времени обнаружения ВВ 111
4.3.5 Технические характеристики комплекса обнаружения следов ВВ 113
4.3.6 Практические рекомендации по улучшению технических характеристик
комплекса114
Заключение116
Список сокращений и условных обозначений118
Список литературы119

Приложение А (справочное) Свидетельство о госуд	арственной регистрации
программы для ЭВМ № 2015613911 (копия)	
Приложение Б (справочное) Акт использования рез	ультатов работы в БТИ
АлтГТУ	
Приложение В (справочное) Акт использования	результатов работы в
ИПХЭТ СО РАН	

Введение

Актуальность диссертационной работы.

В настоящее время повышенную угрозу для человека представляет распространенность террористических актов с применением ВВ. За последнее десятилетие в мире совершены несколько тысяч террористических актов, в результате которых погибли десятки тысяч человек [1].

Террористы устанавливают взрывные устройства (ВУ) в подвалах, арендуемых помещениях, снимаемых квартирах, припаркованных автомобилях, туннелях, метро, в городском транспорте и т.п., при этом используются как промышленные, так и самодельные ВУ. Опасен не только сам взрыв, но и его последствия, выражающиеся, как правило, в обрушении конструкций и зданий, приводящие к большому количеству жертв и существенному материальному урону [2-4].

В связи с этим оперативное обнаружение и идентификация ВВ и ВУ является актуальной задачей. В России и за рубежом разработан и производится целый ряд средств поиска зарядов ВВ и взрывоопасных предметов, однако до эффективная настоящего времени не создана система дистанционного обнаружения ВВ и устройств, подходящая для массового оснащения мест скопления людей. Общепризнано, что ни один способ обнаружения ВВ в отдельности не может обеспечить стопроцентную гарантию обнаружения и только сочетание нескольких методов контроля позволяет получить гарантию безопасности. Поэтому предотвращения террористических ДЛЯ актов, идентификации лиц изготавливающих ВУ, сканирования багажа на объектах всей транспортной инфраструктуры и в местах большого скопления людей необходима разработка новых и совершенствование существующих методов и средств обнаружения ВВ.

Большинство из существующих на сегодняшний день методов и средств обнаружения ВВ требуют непосредственного контакта с объектом исследования. Однако при выполнении обследования не всегда имеется такая возможность. Одним из существенных признаков, позволяющим обнаружить BB, является наличие следов BB на одежде и коже человека, поверхности ручной клади и багажа, которые сохраняются длительное время даже при незначительном контакте с BB. В связи с этим дистанционному детектированию следов конденсированных BB и паров BB, находящихся в тех или иных количествах вблизи или на поверхности BУ, уделяется повышенное внимание.

Сегодня принципиальной возможностью дистанционных измерений (более 10 м) обладают только оптические (лазерные) методы обнаружения паров и следов конденсированных BB, поэтому именно они в большей степени вызывают исследовательский интерес. Применение средств для обнаружения BB в паровой фазе на базе оптических методов крайне осложнено низким уровнем концентрации паров BB в атмосфере ввиду их низкой летучести. Поэтому наибольший интерес представляют дистанционные методы обнаружения следовых количеств BB на поверхности различных объектов и на теле человека.

Одним из новых, перспективных и менее изученных оптических методов является метод активного формирования спектральных изображений (АФСИ), позволяющий обнаруживать следовые количества веществ. Применение лазера для сканирования поверхности делает возможным проведение анализа дистанционно.

В связи с этим целью диссертационной работы является разработка комплекса и исследование метода дистанционного обнаружения и идентификации следов взрывчатых веществ на поверхности объектов при воздействии лазерного излучения ИК-диапазона.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

 проанализировать существующие методы и технические средства для обнаружения следовых количеств ВВ. Провести анализ применимости метода АФСИ для дистанционного обнаружения следов конденсированных ВВ на поверхности;

– определить необходимые технические характеристики оборудования для создания комплекса;

 автоматизировать работу аппаратуры комплекса дистанционного обнаружения и идентификации следов ВВ;

 – экспериментально оценить эффективность обнаружения следов ВВ в реальных условиях и подтвердить технические характеристики разработанного комплекса;

– разработать практические рекомендации по улучшению характеристик комплекса.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1) Впервые реализован метод АФСИ в измерительном комплексе с использованием перестраиваемого СО₂-лазера и неохлаждаемой микроболометрической камеры, позволяющий дистанционно и скрытно детектировать следы конденсированных ВВ с поверхностной концентрацией: 0,2 мг/см² – для октогена; 0,9 мг/см² – для гексогена; 0,35 мг/см² – для ТНТ и 0,5 мг/см² – для ТЭНа.

2) Впервые выполнена обработка гиперспектральных данных для идентификации ВВ, заключающаяся в использовании метода минимального расстояния и метода спектрального угла.

3) Разработана методика дистанционного обнаружения следов конденсированных ВВ методом АФСИ с учетом типа ВВ и подложки, условий окружающей среды и параметров измерительного комплекса.

Практическая значимость работы:

1) Разработанный измерительный комплекс обеспечивает дистанционное обнаружение и идентификацию ВВ на поверхности тел со следующими характеристиками: вероятность обнаружения ВВ более 89 %, предел обнаружения ВВ менее 0,84 мг/см², время обнаружения не более 6 мин, дистанция обнаружения не менее 0,5 м.

2) Разработано ПО, позволяющее автоматизировать процессы управления характеристиками перестраиваемого CO₂-лазера (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015613911), регистрации и обработки гиперспектрального куба данных, а также идентификации типа ВВ и

вывода полученных результатов о наличии следов ВВ.

3) Создана собственная библиотека ИК-спектров поглощения следовых количеств реальных ВВ (октоген, гексоген, ТНТ, ТЭН) с возможностью ее дополнения.

Достоверность результатов диссертации, полученных работе, В обеспечивается применением современных методов исследования, сертифицированной измерительной аппаратуры, современных программных средств, а также большим объемом полученных экспериментальных данных. Достоверность результатов обнаружения удовлетворительно подтверждается соответствием расчетных и экспериментальных данных.

Положения, выносимые на защиту:

1) Метод АФСИ для дистанционного обнаружения и идентификации следов ВВ, основанный на формировании и анализе набора пространственноспектральных изображений (гиперпектральный куб данных), получаемого в результате регистрации многоэлементным приёмником диффузно рассеянного исследуемой поверхностью излучения при её облучении перестраиваемым источником лазерного излучения с узкой полосой генерации.

2) Оптико-электронный комплекс дистанционного обнаружения следов ВВ, реализованный на основе метода АФСИ с использованием перестраиваемого СО₂-лазера и микроболометрической камеры с многоэлементной матрицей.

3) Автоматизация процессов регистрации и обработки гиперспектрального куба данных, а также идентификация типа ВВ и вывод полученных результатов о наличии следов ВВ.

4) Основные технические характеристики оптико-электронного комплекса по обнаружению следов ВВ.

Публикации.

Основные результаты диссертационной работы изложены в 11 научных трудах, из которых 4 статьи опубликованы в журналах, рекомендуемых ВАК, и одно свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ (№ 2015613911).

Апробация результатов исследований.

Основные положения и научные результаты диссертационной работы докладывались, и получили положительную оценку на XI Всероссийской научнотехнической конференция «Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях ИАМП-2014» (г. Бийск, 2014), V и VII Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых «Перспективы создания и применения конденсированных высокоэнергетических материалов» (г. Бийск, 2014, 2018), 16th и 17th International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electronic Devices «EDM 2015» и «EDM 2016» (Erlagol, Altai, 2015, 2016), XII Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с Международным участием «Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях (ИАМП-2017)» (г. Бийск, 2017), The 6th International Symposium on Energetic Materials and their Applications (ISEM2017) (Tohoku University, Sendai, Miyagi Prefecture, Japan, 2017).

Личный вклад автора заключался в анализе литературных данных, выборе оборудования и создании комплекса, разработке ПО, проведении экспериментов, обработке полученных данных. Диссертант принимал непосредственное участие в подготовке публикаций, научных статей и докладов на конференциях.

Объём и структура диссертации.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Изложена на 133 страницах машинописного текста, включая 4 таблицы и 84 рисунка. Список литературы включает 118 источников.

Краткое содержание диссертации.

Во введении обоснована актуальность работы и описано состояние проблемы на сегодняшний день, сформулирована цель и задачи исследования, основные положения, выносимые на защиту, научная новизна и практическая значимость, кратко представлено содержание по главам.

В первой главе выполнен обзор оптических методов дистанционного

обнаружения следов конденсированных ВВ на поверхности. Рассмотрены созданные средства диагностики ВВ. Сделан выбор перспективного метода обнаружения ВВ.

Во второй главе представлены теоретические исследования основ метода АФСИ с целью создания работоспособного измерительного комплекса. Выбрана рабочая область исследования, перечень обследуемых веществ и подложек. Представлен анализ методов создания тестовых образцов со сверхмалыми концентрациями следовых количеств ВВ для целей их дальнейшего обнаружения и идентификации. Выбраны точные, простые в изготовлении и менее затратные методы. Выбраны методы анализа регистрируемого набора спектральных данных.

В третье главе представлено создание, автоматизация и проверка работоспособности измерительного комплекса. Создана библиотека ИК-спектров поглощения ВВ. Изготовлены тестовые образцы и разработана методика проведения экспериментальных исследований.

В четвёртой главе представлены результаты экспериментальных исследований метода АФСИ и обнаружения следовых количеств различных конденсированных ВВ на поверхности на основе разработанного комплекса. Определены основные характеристики, предъявляемые к измерительному комплексу, и приведены результаты исследования возможности их улучшения.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Глава 1. Общая характеристика проблемы и обзор методов ее решения

Для разработки измерительного комплекса, позволяющего дистанционно, скрытно безопасно для человека проводить обнаружение И следов конденсированных ВВ необходимо рассмотреть известные методы. На основе анализа литературного обзора необходимо выбрать метод, позволяющий удовлетворить данные требования.

1.1 Методы дистанционного обнаружения следовых количеств ВВ

Противодействие угрозам террористических актов с применением ВВ является в настоящее время приоритетной задачей для мирового сообщества. Осуществление этого противодействия невозможно без оснащения силовых структур техническими средствами для эффективного обнаружения ВВ. При этом применение таких средств для обнаружения и идентификации ВВ, не должно требовать специальной подготовки эксплуатирующего персонала, но обязано быть безопасным, быстрым и обеспечивать качественный досмотр. Оно должно своевременно и в малых количествах обнаруживать потенциально взрывоопасные вещества, идентифицировать их химический состав, при этом его стоимость не должна быть слишком высокой [5].

Работы по совершенствованию используемых и поиску новых методов обнаружения ВВ ведутся непрерывно. Об этом свидетельствуют многочисленные публикации, обзоры и данные изобретательской активности в области обнаружения ВВ [6-8].

В настоящее время разработаны и производятся целый ряд средств поиска зарядов ВВ и взрывоопасных предметов как по прямым признакам (наличие ВВ или его отдельных компонентов), так и по косвенным (наличие металлических и пластмассовых деталей, полупроводниковых приборов, взрывателей, проводных линий, антенн, определенная форма корпуса и т.д.) [9].

Методы обнаружения ВВ разделяют на: обнаружение по основной массе (рисунок 1.1), обнаружение по парам и по следам конденсированного ВВ на поверхности (рисунок 1.2).



Рисунок 1.1 – Методы обнаружения основной массы ВВ [10]

Обнаружение основной массы ВВ предполагает нахождение большого количества взрывоопасного материала, обычно на основе очевидных признаков или молекулярных свойств ВВ.

Следы ВВ могут существовать в виде паров, представляющих собой молекулы ВВ в газообразном состоянии, а также микрочастиц, которые могут находиться на различных поверхностях объекта или присутствовать в окружающем воздухе в пылевидной форме.



ГХ – газовая хроматография

Рисунок 1.2 – Методы обнаружения паров и следов ВВ [10]

Методы обнаружения паров позволяют обнаруживать малые количества BB на уровне 10⁻³-10⁻¹³ г/см³ [11]. Однако, при комнатной температуре давление насыщенных паров многих известных BB чрезвычайно мало (рисунок 1.3), а при использовании даже несложных приёмов маскировки BB оно уменьшается еще на несколько порядков.

BB Одновременно С ЭТИМ известно, что большинство хорошо адсорбируются поверхности различных на материалов, поэтому ЛИЦ контактировавших с ВВ можно выявить по следовым количествам оставшимся на этих поверхностях (например, одежда, поверхность ручной клади, крышки, элементы упаковки, руль автомобиля, рукоятки запоров кузова и т.п.) [13].

Методы обнаружения BB делят на локальные (контактные), основанные на непосредственном отборе пробы BB с поверхности и ее переноса к месту проведения исследований, и дистанционные (бесконтактные), когда оператор, осуществляющий досмотр, и необходимое для анализа оборудование остаются на безопасном расстоянии от объекта.



Рисунок 1.3 – Зависимость давление насыщенного пара ряда высокоэффективных ВВ от температуры [12]

Дистанционные методы позволяют обеспечить скрытность процесса досмотра и личную неприкосновенность обследуемого. В основе дистанционных методов обнаружения следов ВВ, характеризующихся быстротой анализа, высокой чувствительность и селективностью, способных обнаруживать и идентифицировать многие известные ВВ, лежат лазерные технологии [14].

Таким образом, возможность обнаружения следовых количеств BB, базирующаяся на дистанционном зондировании поверхности исследуемого

объекта, является вполне реальной. Поэтому ниже представлены оптические (лазерные) методы дистанционного обнаружения следов конденсированных BB на поверхности.

1.1.1 Спектроскопия комбинационного рассеяния света

Спектроскопия комбинационного рассеяния (КР) света, иначе Рамановская спектроскопия (Raman Spectroscopy) является одним из эффективных и хорошо изученных методов в области дистанционного обнаружения следов BB.

Взаимодействие монохроматического излучения лазера с исследуемой поверхностью сопровождается изменением энергии рассеянного излучения в результате неупругого столкновения фотонов с молекулами (или ионами). По разнице изменения энергии фотона можно судить об изменении энергии молекулы, то есть о переходе ее на новый колебательный уровень. Эти переходы можно рассматривать как характерные «отпечатки», которые идентифицируют химическое вещество или вещества в образце [15].

На рисунке 1.4 представлена энергетическая схема упругого и неупругого взаимодействия фотона с веществом. При рэлеевском рассеянии частота отраженного света не меняется. Это "обычное" отражение света от поверхности или из объема вещества. При рамановском рассеянии происходит излучение или, наоборот, поглощение колебания молекулы (фонона в твердом теле). Если при рассеянии частота света уменьшается, такой процесс называется "стоксовское рассеяние". Если, наоборот, частота отраженного света больше, такой процесс называется "антистоксовский".

Метод удовлетворяет требованиям безопасности при обследовании человека, отличается простотой использования, поскольку практически не требуется пробоподготовка, успешно используется для идентификации BB с очень близкого расстояния в лаборатории, но рассеянный сигнал настолько слаб, что обнаружение на больших расстояниях потребуется сочетание большой оптической системы и длительного времени интеграции [16].



Рисунок 1.4 – Схема энергетических уровней, иллюстрирующая основные принципы КР

В работе [17] в результате полевых испытаний поверхностная концентрация обнаруженных следов ВВ (АН и ТНТ) на основе эффекта КР на расстоянии 10 м составила до 10 пг/см². Однако это не является пределом обнаружения, так как авторы не смогли получить тестовые образцы с меньшими количественными показателями. В работе [18] при помощи подобной установки были обнаружены следы гексогена и ТЭНа массой менее 1 мг и следы ТНТ массой 700 мкг на расстоянии 20 м.

Авторы работы [19] продемонстрировали возможность успешного обнаружения жидких ОВ через непрозрачные контейнеры. В работе [20] идентифицировали DNB и THT в малом объеме раствора (60 нл).

1.1.2 Спектроскопия когерентного актистоксова комбинационного рассеяния

света

Более сильное рассеянное излучение можно получить с помощью спектроскопии когерентного антистоксова КР света (KAPC, CARS – Coherent Anti-Stokes Raman Spectroscopy).

Для реализации метода используется излучение лазера с фиксированной частотой ω₁ и излучение с частотой ω₂, создаваемой перестраиваемым лазером.

Облучение образца осуществляется под небольшим углом. В результате совпадения разности ω_1 - ω_2 с одной из внутримолекулярных частот ω_i , на частоте $2(\omega_1-\omega_2)$ возникает направленное лазероподобное излучение, интенсивность которого значительно выше интенсивности обычного КР. Плавно меняя частоту ω_2 , можно получить весь спектр КАРС [21].

В работе [22] пороговая чувствительность составила единицы нг/см². Измерения и обработка полученных данных осуществлялась в режиме реального времени на расстоянии 20 см. Дистанционное обнаружение следов KNO₃ и гексогена с помощью КАРС на расстояниях до 12 м было продемонстрировано в работе [23].

Спектроскопия КАРС позволяет исследовать гораздо меньшие образцы при более быстром времени сканирования. Кроме того, метод КАРС снижает проблему флуоресценции фона [22].Однако в настоящее время он достаточно сложен в плане технической реализации.

1.1.3 Лазерно-искровая эмиссионная спектроскопия

Лазерно-искровая эмиссионная спектроскопия (ЛИЭС, LIBS – Laser-Induced Breakdown Spectroscopy) предполагает быстрый бесконтактный многоэлементный спектральный анализ без дополнительной подготовки образца. ЛИЭС используется для идентификации объектов разнообразного происхождения [24–26].

На рисунке 1.5 представлена типичная схема ЛИЭС-системы. Излучение мощного лазера фокусируется на поверхности образца, что приводит к образованию микроплазмы. В этой горячей плазме материал распадается на возбужденные ионы и атомные участки. По окончании лазерного импульса плазма быстро охлаждается. В течение этого времени возбужденные ионы и атомы испускают характерное оптическое излучение, поскольку они возвращаются в низкоэнергетические состояния. Излучение светящейся лазерной плазмы регистрируется спектральным прибором в виде эмиссионного спектра при

помощи оптоволоконного кабеля. Обработка спектра используется для идентификации и последующего количественного определения состава образца.



Рисунок 1.5 – ЛИЭС-система [27]

В исследованиях технологии ЛИЭС для получения пробоя на поверхности анализируемого образца обычно используются традиционные твердотельные Nd: YAG лазеры с наносекундной длительностью импульса и энергией импульса более 10 мДж [28, 29]. Сравнительно недавно для создания плазмы и выполнения спектроскопических исследований был изучен фемтосекундный лазерный источник возбуждения. В настоящее время выявлены два ключевых фемтосекундной преимущества, связанные С длительностью импульса: незначительное влияние воздуха на эмиссионный спектр плазмы и уменьшение фонового излучения. Оба преимущества связаны с более низкой температурой индуцированной плазмы [29-31].

К преимуществам технологии ЛИЭС следует отнести оперативность, относительно высокую чувствительность, проведение анализа вне зависимости от фазового состояния исследуемого вещества, отсутствие непосредственного контакта с анализируемым веществом, что дает возможность использовать ЛИЭС для дистанционного анализа и получения информации в режиме реального времени. В работах [32-34] бесконтактные измерения были выполнены на расстоянии до 130 м. ЛИЭС технология является более выгодной по сравнению с другими методами элементного анализа, вследствие простоты конструкции аналитической системы и доступности элементной базы.

Однако этому методу присущ и ряд недостатков. Во-первых, он носит разрушающий характер, что делает невозможным его применение для досмотра

физических лиц и транспортных средств. Во-вторых, существующие ЛИЭС устройства работают, как правило, на длине волны 1064 нм, что делает этот метод небезопасным для глаз, а работа в видимом диапазоне (532 нм) лишает его фактора скрытности. И наконец, метод чувствителен к внешним помехам в виде химических загрязнений, которые способствуют изменению пропорции между атомами азота и кислорода в исследуемом веществе [35].

1.1.4 Лазерно-индуцированная флуоресценция продуктов фотофрагментации ВВ

Метол лазерно-индуцированной флуоресценции продуктов (ЛИФ, PF-LIF – Photofragmentation-Laser фотофрагментации BB Induced Fluorescence) основан на получении и идентификации спектров флуоресценции, освещении индуцированной В исследуемом объекте при его лазерным Измеряемый излучением. представляет собой спектр совокупность флуоресцентных ОТКЛИКОВ веществ, имеющихся В исследуемом образце. Поскольку спектральный состав флуоресцентного отклика связан с молекулярной структурой исследуемых объектов, анализ спектров флуоресценции во многих случаях позволяет идентифицировать вещество и определить его концентрацию в объекте (рисунок 1.6).



Рисунок 1.6 – Схема, поясняющая механизм обнаружения следовых количеств ВВ методом ЛИФ [36]

Данный метод чувствителен к широкому спектру взрывоопасных веществ, имеет низкий предел обнаружения, используя лишь одну частоту лазера. Однако применяется для качественного и количественного дистанционного обнаружения только BB, содержащих NO₂ и NO функциональную группу. Также к недостаткам метода относится прямая зависимость вероятности обнаружения от давления насыщенных паров BB, поэтому низко парящие BB (октоген, нитрат аммония) в паровой фазе практически не обнаруживаются.

Так, в работе [37] было показано, что метод на основе одночастотного лазерного фотолиза с последующим возбуждением ЛИФ NO-фрагментов из второго колебательного состояния позволяет проводить дистанционное (на расстояниях более 10 м) обнаружение паров BB, обеспечивая при этом пороговую чувствительность на уровне десятков-сотен ppt.

Применение лазерного фотолиза с последующим возбуждением ЛИФ NOфрагментов для обнаружения следов ВВ продемонстрировано в работе [38]. Заявленная авторами пороговая чувствительность для следов ТНТ составила приблизительно 1 нг/см².

1.1.5 ИК-спектроскопия продуктов лазерной фотофрагментации ВВ

Процесс обнаружения ВВ методом ИК-спектроскопии продуктов лазерной фотофрагментации (MIR-PF – Pulsed laser fragmentation mid-IR spectroscopy) состоит в следующем. При воздействии на объект импульсного лазерного излучения происходит нагрев остатков ВВ и их разложение на характерные фрагменты, которые десорбируются с поверхности и переходят в газовую фазу. При этом, как показали исследования, проведенные с разными ВВ, для получения их фрагментов лучше подходит безопасное для глаз излучение с длиной волны около 1,5 мкм. В процессе лазерной фрагментации ВВ в непосредственной близости ОТ поверхности образуется «облако» ИЗ NO_x-фрагментов, детектирование которых проводится с помощью методов ИК-спектроскопии. Для этого фрагменты облучаются другим лазером с длиной волны, попадающей в полосы поглощения молекул NO_x, лежащие в среднем ИК-диапазоне. Обратно

рассеянный оптический сигнал регистрируется с помощью ИК-камеры. Отношение концентраций NO-фрагментов и NO₂-фрагментов может служить критерием, свидетельствующим о принадлежности исследуемых веществ к взрывчатым. Схема обнаружения ВВ методом MIR-PF представлена на рисунке 1.7.



Рисунок 1.7 – Схема обнаружения ВВ методом MIR-PF [39]

При взаимодействии лазерного излучения с поверхностью, поверхность нагревается до температуры плавления (например, $T_{плав} = 353$ К для THT), затем нагревается до температуры кипения (обычно около 600 К), где происходит тепловая фрагментация и, наконец, материал испаряется. Поэтому применение метода невозможно для досмотра физических лиц, однако имеются данные об экспериментальных данных для дистанционного (с расстояния 5 м) обнаружения следов октогена на металлической поверхности [39].

1.1.6 Методы лазерной фототермической спектроскопии

Особый интерес для дистанционного обнаружения ВВ вызывают методы фототермической спектроскопии (ФТС, РТЅ – Photo-Thermal Spectroscopy). К группы относят метод фототермической методам данной калометрии, фототермической рефракции, дифракции, интерференции, метод фототермического поверхностного отклонения и др. Основой всех методов ФТС является изменение теплового состояния исследуемого объекта в результате

поглощения лазерного излучения. Существующие методы контроля теплового состояния объекта отличаются лишь способом регистрации фототермического сигнала.

Одним из перспективных фототермических методов обнаружения является метод получения ИК фототермического изображения при резонансном воздействии на объект исследования (ИК-ФТИ). Схема метода формирования ИК-ФТИ представлена на рисунке 1.8.



Рисунок 1.8 – Схема метода формирования ИК-ФТИ [40]

ИК-лазер облучает интересующую поверхность, и происходит селективный нагрев поверхности и находящихся на ней частиц ВВ в зависимости от длины волны излучения лазера и спектра поглощения соответственно поверхности и частиц. Тепловой отклик системы «поверхность-частицы» на облучение регистрируется при помощи тепловизионной камеры. Выделение следов ВВ на фоне поверхности подложки и их идентификация производится по анализу теплового контраста.

В работе [41] была продемонстрирована возможность детектирования следовых количеств конденсированного на поверхности ТНТ на расстоянии до 150 м. В процессе исследований была создана экспериментальная установка ROSE (Remote Optothermal Sensor), размещаемая внутри автофургона (рисунок 1.9).



Рисунок 1.9 – Экспериментальный образец сенсора ROSE

Метод обладает высокой чувствительностью, высоким пространственным разрешением, безопасен для глаз и кожи человека.

1.1.7 Метод активного формирования спектральных изображений

Метод активного формирования спектральных изображений (АФСИ, ActiveSI – Active Spectral Imaging) представляет собой достаточно новое перспективное направление для анализа пространственного распределения и идентификации компонентов в сложных объектах.

Особенность метода состоит в облучении поверхности объекта, несущего следовые количества ВВ, перестраиваемым источником лазерного излучения. При облучении ВВ происходит поглощение молекулами фотонов ИК-излучения определенной энергии. Количество поглощенной энергии зависит от свойств облучаемого ВВ и длины волны лазерного излучения.

Взаимодействие лазерного излучения с исследуемым веществом регистрируется в виде обратного диффузно-рассеянного излучения с помощью приёмника излучения (ПИ) с многоэлементной матрицей. При перестройке длины волны лазерного излучения изменяется соотношение между поглощенной и рассеянной объектом энергией, что может привести к заметному контрасту между отдельными деталями наблюдаемой сцены. В результате последовательной регистрации отклика на каждой длине волны получается многомерное пространственно-спектральное изображение, называемое «гиперкубом» данных (рисунок 1.10).



Рисунок 1.10 – Формирование гиперспектрального куба [42]

Гиперкуб представляет собой трёхмерный массив данных, который включает в себя пространственную информацию об объекте, дополненную спектральной информацией по каждой пространственной координате [43]. Каждый кадр (изображение) гиперкуба соответствует отражению от исследуемой поверхности на определенной длине волны, а каждый пиксель гиперкуба содержит спектр отражения в определенном месте исследуемой поверхности.

Результаты идентификации представляют в виде карты обнаружения, в которой каждому пикселю присваивается оценка, основанная на сходстве зарегистрированных спектральных кривых, отражающих зависимость между длиной волны и отражательной (излучательной) способностью исследуемого объекта с эталонным спектром (рисунок 1.11). Это позволяет выделить и идентифицировать различные материалы [44].



Рисунок 1.11 – Процесс идентификации ВВ методом АФСИ [42]

Обнаружение и идентификация следов ВВ методом АФСИ может производиться в любое время суток. Высокое спектральное разрешение, большая спектральная яркость и безопасность для глаз и кожи человека способствую быстрому развитию метода. Недостатками данного метода являются наличие на изображении спекл-шума, необходимость применения мощного программного обеспечения (ПО) и достаточно высокая стоимость оборудования.

В работах [42, 45-47] был продемонстрированы установки и полученные экспериментальные данные на основе метода АФСИ для обнаружения BB.

1.2 Выбор метода обнаружения ВВ

Проведенный теоретический обзор продемонстрировал актуальность создания установок для обнаружения и идентификации следов ВВ. Из рассмотренных методов обнаружения и идентификации конденсированных следов ВВ наиболее приемлемыми для решения поставленных задач являются методы фототермической спектроскопии и метод АФСИ. Они оба обладают реальной дистанционностью и возможностью скрытого сканирования, безопасны для багажа и людей. Кроме того, данными методами возможен поиск других опасных веществ: наркотических, токсичных, фармацевтических и веществ биологического происхождения, имеющих характерные спектральные особенности в рабочем диапазоне длин волн лазерного излучения.

Однако, в силу того, что реализация фототермических методов существенно сложнее в техническом оснащении, а также значительно дороже в стоимостном выражении в сравнении с методом АФСИ, то наиболее подходящим при решении целей настоящего исследования является разработка измерительного комплекса обнаружения следов конденсированных ВВ на основе метода АФСИ.

К сожалению, российские публикации по исследованию метода АФСИ для дистанционной детекции следов ВВ, за исключением обзорных статей, отсутствуют, как и реальные приборы, реализующие данный метод.

Глава 2. Теоретические основы метода активного формирования спектральных изображений

Для реализации метода АФСИ в виде измерительного комплекса необходимо определить рабочий диапазон длин волн сканирующего лазерного излучения, аппаратуру для экспериментальных исследований, вопросы взаимодействия лазерного излучения с тестовым образцом, методы обработки полученных данных, а также выбрать методы подготовки тестовых образцов с известными параметрами.

2.1 Выбор рабочей области исследования

Одной из основных характеристик метода АФСИ является рабочий диапазон длин волн, на котором происходит поглощение излучения. Успешность обнаружения ВВ методом АФСИ определяется наличием особенностей в спектре поглощения искомых веществ в рабочем диапазоне длин волн.

На рисунке 2.1 приведен весь спектр электромагнитного излучения и спектральная область излучения существующих лазеров.



Рисунок 2.1 – Спектр электромагнитного излучения [48]

Учитывая технические особенности источников и приёмников лазерного излучения, а также специфику взаимодействия излучения со средами, применение данного метода возможно в трех областях электромагнитного спектра, а именно в

УФ, видимом и ИК-диапазонах спектрах [49]. Однако, применение рассматриваемого метода для детектирования ВВ в УФ и видимом диапазонах не целесообразно, так как спектры диффузного отражения ВВ в этих областях характеризуются наличием широких полос без каких-либо характерных особенностей (рисунок 2.2), а исследование ВВ в видимом диапазоне еще и лишает фактора скрытности досмотра.



Рисунок 2.2 – Спектры диффузного отражения ВВ в среднем и ближнем УФ, видимом и ближнем ИК-диапазонах [50]

Вследствие поглощения ИК-излучения атмосферой диапазон детектирования ограничивается сверху приблизительно 14 мкм. Дистанционные исследования в ИК-области, как правило, проводят на длинах волн, лежащих в окнах прозрачности атмосферы — диапазоны 3–5 мкм и 8–14 мкм (рисунок 2.3) [51].



Рисунок 2.3 – Окна прозрачности атмосферы в ИК-диапазоне

В ИК диапазоне спектра имеются колебательно-вращательные состояния молекул ВВ [52, 53], поэтому проводить детектирование эффективнее в нем. На рисунке 2.4 приведены ИК-спектры поглощения некоторых ВВ в окнах прозрачности атмосферы, выбранные из базы данных ИК-Фурье спектрометра «Инфралюм ФТ-801».

При рассмотрении спектров поглощения ВВ в этих окнах видно, что особенности спектров поглощения ВВ в диапазоне от 8 до 14 мкм выражены сильнее, чем в диапазоне от 3 до 5 мкм, так как в этом диапазоне, колебательновращательные спектры поглощения молекул ВВ обладают высокой уникальностью. Уникальность определяется их симметрией и химическим составом, что позволяет с высокой степенью достоверности отнести отдельные спектральные линии к определенному химическому соединению [54].

В случае воздействия на человека лазерного излучения в выбранных диапазонах, дополнительным преимуществом является его небольшая проникающая способность [55].





Рисунок 2.4 – ИК-спектры поглощения ВВ

Учитывая все вышеперечисленные факторы, в качестве рабочего диапазона выбран ИК-диапазон с длинами волн 8-14 мкм.

2.2 Формирование гиперспектрального куба данных

Идентификация BB методом АФСИ зависит от дистанции обнаружения, параметров лазерного излучения (мощность и энергия излучения, длина волны, длительность импульса), технических характеристик ПИ, шумов в измерительном тракте, алгоритмов обработки и анализа зарегистрированных данных.

На рисунке 2.5 представлена типовая схема измерительной установки на базе метода АФСИ.



l₁ – расстояние от последнего оптического элемента оптической системы комплекса до объекта, φ – угол между лазерным излучением и направлением наблюдения камеры, l₂ – расстояние от камеры до объекта
 Рисунок 2.5 – Схема подсветки поверхности с частицами BB

Принцип действия установки состоит из следующих этапов.

1. Подсветка поверхности со следами ВВ источником лазерного излучения.

Активное освещение исследуемой поверхности лазером должно быть под углом Ø относительно направления наблюдения камеры. Конфигурации освещения можно классифицировать как коаксиальные ($\phi=0^{\circ}$) или наклонные ($\phi\neq$ 0°). Преимущество коаксиального освещения заключается в том, что лазерный луч может быть зафиксирован в пределах угла поля зрения камеры (FOV) для всех расстояний. Однако для этого требуется использование либо разделителя лучей, либо скрывающего зеркала внутри апертуры приемника, что сложно реализовать с помощью коммерческих объективов, а также необходимо учесть энергии отраженного сигнала. Кроме того, если не правильно потери спроектировать комплекс, рассеянный свет от лазерного луча может помешать приему обратного сигнала. Альтернативой является наклонное освещение, которое проще реализовать для фиксированного расстояния до цели. Однако недостатком наклонного освещения является то, что лазерное наведение должно

быть отрегулировано по мере изменения расстояния до объекта, чтобы центрировать луч в поле зрения камеры.

В связи с вышеуказанными недостатками коаксиальной конфигурации освещения при приеме обратного сигнала выбрано наклонное освещение.

Есть вариантов фокусировки также несколько лазерного луча: коллимированный, расходящийся или адаптивный луч. Для коллимированного пучка диаметр лазерного луча остается постоянным в широком диапазоне расстояний. Это означает, что уровень сигнала для каждого полностью освещенного пикселя не зависит от расстояния. Достоинством данной фокусировки является простота ее реализации, а главным недостатком – малая область детектирования.

В качестве альтернативы может быть расходящийся лазерный луч для освещения фиксированного поля зрения камеры. Однако, энергия отраженного сигнала, принимаемая на каждом пикселе, уменьшается с расстоянием до объекта вследствие увеличения размера пучка. Поэтому данная система фокусировки подходит только для узкого диапазона дистанционных расстояний.

Третий вариант – это адаптивная система, которая оптимально фокусирует лазерный луч в зависимости от свойств мишени. Этот вариант технически более сложный, чем другие.

Вследствие малой области детектирования коллимированной системы и технически сложной реализации адаптивной системы выбрана расходящаяся система фокусировки.

Главной характеристикой лазера в данных исследованиях является его мощность. При условии равномерного распределения интенсивности излучения по всему поперечному сечению пучка при помощи рассеивающего оптического элемента, плотность мощности лазерного излучения $P_{\nu a}$ равна (2.1):

$$P_{y\partial}(\lambda) = \frac{P_{\pi}(\lambda)}{\pi \cdot l_1^2 \cdot tg^2 \frac{\alpha}{2}},$$
(2.1)

где P_n – мощность лазера, l_1 – расстояние от рассеивающего оптического элемента оптической системы комплекса до объекта, α – угол рассеяния излучения после прохождения рассеивающего оптического элемента.

2. Взаимодействие лазерного излучения с поверхностью со следами ВВ

Излучение лазера рассеивается оптическим элементом и подсвечивает объект со следами BB на поверхности. Излучение, падающее на поверхность, частично поглощается поверхностью с коэффициентом поглощения (излучения) ε_n , частично отражается с коэффициентом отражения r_n . Соотношение между этими коэффициентами зависят от вида, толщины слоя и поверхностной концентрации поглощающего вещества [56].

Согласно закону Кирхгофа для непрозрачной поверхности:

$$r_n = 1 - \varepsilon_n \tag{2.2}$$

Для следов BB соответственно коэффициенты излучения ε_{BB} и отражения r_{BB} .

3. Регистрация обратно рассеянного излучения

Зарегистрированное приёмником излучение составит:

$$R_n \approx r_n \cdot P_{\nu \partial}$$
 (для поверхности), (2.3)

$$R_{BB} \approx r_{BB} \cdot P_{\nu \partial}$$
 (для следов BB), (2.4)

где R_n , R_{BB} – полная мощность рассеянного излучения от поверхности и следов ВВ соответственно.

Уверенное обнаружение и идентификация вещества измерительным комплексом возможны в случае, если обратно рассеянное излучение полностью занимает не менее одного пикселя зарегистрированного изображения и энергия отраженного сигнала от ВВ выше отношения сигнал/шум (рисунок 2.6). Геометрические размеры области пространства, проецируемые в пиксель, зависят от характеристик выбранной оптической системы микроболометрической камеры и расстояния регистрации [57].



а – изображение проецируемое на матрицу микроболометрической камеры,
 б – минимальная площадь следа ВВ, необходимая для детектирования
 Рисунок 2.6 – Определение минимальной площади следа ВВ

Поле зрения камеры разбивается на горизонтальную и вертикальную составляющие, обозначаемые HFOV и VFOV соответственно. Поле зрение по горизонтали H и по вертикали V поля обзора определяется по формуле (2.5) и (2.6) соответственно:

$$H = 2 \cdot l_2 \cdot tg(HFOV/2) \tag{2.5}$$

$$V = 2 \cdot l_2 \cdot tg(VFOV / 2) \tag{2.6}$$

где FOV – угол поля зрения камеры.

Отсюда площадь поля зрения камеры (FOV) равна:

$$FOV = V \cdot H \tag{2.7}$$

Минимальная площадь обнаруживаемого объекта на расстоянии l_2 (2.8):

$$\Delta S = FOV / (a \cdot b), \qquad (2.8)$$

где *а* – количество пикселей матрицы по горизонтали, *b* – количество пикселей матрицы по вертикали.

Минимальная толщина слоя вещества на поверхности определяется размером частиц искомого вещества.

Объем и масса искомого вещества на единичной площади определяется по формулам (2.9) и (2.10) соответственно:

$$V = \Delta S \cdot h \,, \tag{2.9}$$

где *h* – толщина слоя.

$$m = V \cdot \rho \,, \tag{2.10}$$

где ρ – плотность.

Отсюда можно определить нижний предел поверхностной концентрации вещества *N* (г/см²):

$$N = \frac{m}{\Delta S} \,. \tag{2.11}$$

Признаком, позволяющим однозначно идентифицировать вещество, спектральная зависимость коэффициента поглощения. Отличие является коэффициентов отражения (поглощения) материалов поверхности и следов ВВ во всём диапазоне перестройки источника излучения определяет возможность идентификации исследуемого вещества на поверхности. Чем больше отличие, тем, соответственно, проще идентификация, и наоборот. Наличие в этой области детектируемого ВВ помимо посторонних веществ, вносит искажения В регистрируемую интенсивность пикселя, что в дальнейшем может привести к пропуску обнаружения фактического наличия вещества.

В случае, если вещество не полностью покрывает пространственную область пикселя, регистрируемый сигнал содержит как характеристику взаимодействия излучения с веществом, так и с подложкой, на которую это вещество нанесено.

При сканировании пикселя по спектральному диапазону будет зарегистрирована сумма спектров вещества и подложки, в которой вклад каждого спектра пропорционален занимаемой веществом (или подложкой) площадью в пределах пикселя.

В случае, если спектр подложки не имеет выраженных особенностей в спектральной области исследований, будет зарегистрирован спектр вещества с уменьшенной в *k* раз амплитудой между максимумами и минимумами:

$$k = \frac{\Delta S}{S_m}, \qquad (2.12)$$

где ΔS — площадь объекта, приходящаяся на один пиксель, S_m — площадь, занимаемая веществом в пределах приходящейся на один пиксель площади объекта.

Для конкретной системы регистрации может быть максимальное значение *k*, при которой вещество может быть идентифицировано по зарегистрированному спектру.

$$k_{MAX} = \frac{I_{MAX}}{2 \cdot SNR \cdot P_{CAM}}$$
(2.13)

где k_{MAX} – максимальное значение отношения площадей, I_{MAX} – максимальное возможное значение яркости регистрируемого пикселя, *SNR* – отношение сигнал/шум, P_{CAM} – амплитуда размаха яркости собственных шумов детектора.

Отсюда определяется минимально обнаруживаемая поверхностная концентрация

$$N_{MIN} = \frac{N}{k_{MAX}} \,. \tag{2.14}$$

Далее необходимо выбрать анализируемые вещества, часто применяемые для изготовления ВУ и имеющие характерные области поглощения в выбранном ИК-диапазоне, а также необходимо проанализировать материалы для применения в качестве подложки на которых могут оставаться следы ВВ при изготовлении ВУ.

2.3 Выбор анализируемых веществ и материалов-подложек

Взрывчатые вещества – это химические соединения или смеси веществ, содержащие большое количество потенциальной энергии, которая может вызвать взрыв, сопровождающийся выделением большого количества тепла, света, звука и образованием газов. Эта реакция, возникнув в какой-либо точке в результате нагревания, удара, трения, взрыва другого ВВ или иного внешнего воздействия, распространяется по заряду за счёт передачи энергии от слоя к слою с помощью процессов тепло- и массопереноса (горение) либо ударной волны (детонация).

Современные ВВ могут пребывать в газообразном, жидком, пластичном и

твердом состоянии. Метод АФСИ предполагает обнаружение и идентификацию ВВ только в твердой фазе в качестве следов конденсированных на поверхности.

По химическому составу ВВ подразделяют на два класса: содержащие хотя бы одну нитро (NO₂)/нитратную (NO₃) группу и не имеющие ни одной из них. В последнем случае ВВ принадлежат к пероксидам (например, триацетон трипероксид (ТАТП)), перхлоратам или азидам. Наиболее широко представлен класс азотосодержащих ВВ (ТНТ, гексоген, ТЭН и др.), в состав которых помимо азота входят водород, углерод и кислород. Общим свойством таких ВВ является существенное превышение содержания в их молекулах азота и кислорода по сравнению с углеродом и водородом (рисунок 2.7). При этом относительное содержание азота в несколько раз больше, чем в обычных материалах, таких, например, как шелк, полиуретан, нейлон и др.





В зависимости от типа взрыва и чувствительности к внешним воздействиям все ВВ делят на три основные группы:

- инициирующие ВВ, которые обладают высокой чувствительностью к
внешним воздействиям и их взрыв, (детонация) оказывает детонационное воздействие на бризантные и метательные BB, которые обычно к остальным типам внешнего воздействия не чувствительны. К инициирующим BB относят гремучую ртуть, азид свинца, тенерес.

– бризантные ВВ менее чувствительны к внешним воздействиям. Различают бризантные ВВ повышенной мощности: ТЭН, гексоген, октоген, тетрил, нормальной мощности: ТНТ, пикриновая кислота, пластит-4, динамит и пониженной мощности: нитрат аммония, аммониты, динамоны.

 метательные BB, основной формой взрывчатого превращения которых является горение. Метательными BB являются пороха и пиротехнические составы.

Из многих способных к взрыву соединений в качестве BB и компонентов взрывчатых смесей применяют лишь 2–3 десятка веществ [58-60].

Исходя из требований к фазе вещества и его чувствительности к воздействию лазерного излучения выбраны четыре BB наиболее распространенные в военной и гражданской промышленности: гексоген, октоген, ТНТ и ТЭН.

Для исследования возможности ложноположительных срабатываний и анализа селективности разработанного измерительного комплекса необходимо наличие в качестве анализируемых, веществ, не обладающих взрывной способностью. В качестве таких веществ необходимо выбрать вещества в твердой фазе, часто встречающиеся в повседневной жизни и на химических предприятиях.

Таким образом, для дальнейшего исследования в качестве анализируемых веществ выбраны кроме часто встречающихся в ВУ веществ, а именно, ТНТ, гексоген, октоген, ТЭН, взрывобезопасные вещества – сахарная пудра, оксид алюминия и мыло.

Для обеспечения транспортной безопасности (в аэропортах, на вокзалах) досмотровые системы обследуют людей и их личные вещи на наличие запрещенных веществ. Лазерное излучение в методе АФСИ является неразрушающим и непроникающим сквозь различные предметы и одежду, оно

воздействует только на поверхность исследуемого объекта. В качестве объекта исследования могут быть кожа человека и его одежда (различные виды ткани, кожи) при условии безопасности системы досмотра, багаж (тканевый или пластиковый чемодан, кожаные сумки и др.), а также поверхности, к которым прикасался обследуемый субъект (ручки автомобиля, окна и двери, различные документы и др.).

При исследовании следовых концентраций ВВ на каких-либо материалахподложках необходимо учитывать дополнительную шумовую составляющую от этих материалов в рабочей области спектра. По характеру влияния в регистрируемой области, исследуемые поверхности можно условно разделить на 3 группы:

1) Прозрачные поверхности (не имеющие существенного поглощения для возбуждающего излучения). К таким поверхностям относятся, прежде всего, материалы оптических элементов прозрачные в области возбуждения. Например, селенид цинка (ZnSe), германий(Ge), арсенид галлия (GaAs), каменная соль. Поверхности первой группы в повседневной жизни человека практически не встречаются.

2) Зеркально отражающие поверхности (полированные металлы, стекло). Интенсивность отражённого сигнала от подложки для материалов данной группы будет на несколько порядков (в зависимости от толщины исследуемого слоя вещества) выше интенсивности сигнала следов. При исследовании подложек данной группы необходимо устанавливать приёмник излучения таким образом, чтобы исключить попадание в него зеркально отраженного лазерного излучения. В таком случае исключается возможность повреждения фотоприёмной матрицы. Кроме того, при этом в приёмник попадает только сигнал от следов.

3) Диффузно отражающие поверхности, например, ткань, бумага, кожа, дерево. Идентифицировать следы искомых ВВ на таких поверхностях сложнее, чем для материалов второй группы, так как дополнительно вносятся помехи от диффузно отражённого излучения подложки.

Поэтому в качестве материала-подложки выбраны материалы из первой и второй группы: искусственная кожа, стекло, фанера.

Для дальнейших исследований необходимо создание образцов несущих следовые количества BB с известными характеристиками (поверхностная плотность, коэффициент заполнения). Поэтому далее будут проанализированы методы создания известных малых концентраций BB на поверхности.

2.4 Выбор методов создания тестовых образцов следовых количеств ВВ

Для оценки эффективности обнаружения ВВ и исследования характеристик разработанного комплекса необходимо иметь в наличии соответствующие испытательные тестовые образцы следов ВВ с известными физическими параметрами.

Существуют различные способы нанесения определенной концентрации ВВ на подложку. ВВ могут быть подготовлены как из твердой, так и из жидкой фазы. Популярные способы создания тестовых образцов и основные особенности нанесения будут рассмотрены далее.

2.4.1 Перевод отпечатков пальцев

Отпечатки пальцев не оставляют равномерно распределенной концентрации на подложке, но фактически такое нанесение более приближенно к реальности, так как представляет собой основной механизм передачи следовых количеств BB при обращении человека с ними.

В работе [61] образцы готовили путем нанесения отпечатка пальца со следами ТНТ и ТЭНа на подложку. В качестве подложек использовались заводские окрашенные листы AutoBody широко распространенных автомобилей среднего класса (Volkswagen Golf IV и Opel Astra), рюкзак из полиакрила и джинсовая ткань. Количество BB, оставшегося на подложке материала составило от 20 до 200 мкг/см². Концентрация оценивалась путем сравнения образцов с хорошо определенным однородным распределением загрязнений.

В работе [62] были проведены исследования следов гексогена, оставленных на предметном стекле 50-тью последовательными отпечатками пальцев (рисунок 2.8).



Рисунок 2.8 – Выборка из 50-ти последовательных отпечатков пальцев со следами гексогена, оставленных на поверхности предметного стекла.

Были рассчитаны значения массы частиц гексогена определенного размера и массы всех частиц вещества для каждого отпечатка. Реальная масса следов проверялась с помощью газохроматографического детектора электронного захвата. Масса вещества, оставленного 50-ым отпечатком пальца, составляет сотни нанограмм. Исходя из того, что площадь отпечатка пальца равна примерно 2-3 см², поверхностная плотность вещества следа составит величину порядка десятков-сотен нг/см².

Данный метод является самых неточным из рассмотренных методов нанесения BB, так как не учитывается однородность нанесения, но наиболее приближен к реальности.

2.4.2 Взвешивание

Одним из наиболее доступных способов применяемых для создания и количественного определения концентрации ВВ на поверхности является его

взвешивание. Для взвешивания малых количеств образца с предельно высокой точностью применяются микровесы.

Для получения эталонного образца данным способом необходимо на подготовленную и предварительно взвешенную подложку нанести исследуемое BB, находящееся в твердой фазе также предварительно взвесив его, либо в жидкой предварительно растворив его в соответствующем растворителе. Тогда на поверхности подложки, после испарения растворителя, остается заранее известное количество BB.

Недостатком метода является, то что он применяется только совместно с другими методами нанесения, ограниченное нанесение раствора BB, так как микровесы имеют недостаточно малый предел взвешивания; неравномерное и неизвестное пространственное расположение раствора BB по поверхности подложки.

2.4.3 Просеивание

Просеивание – процесс разделения частиц в зависимости от их размера с помощью одного или нескольких сит.

Сито является инструментом, который используется для измерения размера частиц. В своей наиболее распространенной форме оно состоит из тканой проволочной сетки, с квадратными или круглыми отверстиями, жестко закрепленной в неглубокой цилиндрической металлической раме (рисунок 2.9).



Рисунок 2.9 – Сита для просеивания

41

С помощью стандартного сита можно быстро и эффективно измерять размеры твердых частиц ВВ от 125 мм до 20 мкм. Но при этом, чем меньше диаметр отверстий сита, тем легче некоторые виды частиц блокируют отверстия. Однако существуют специальные сита с отверстиями до 5 мкм, где микропросеивание может осуществляться только с помощью специальных методов [63].

В работе [64] осуществлялось просеивание частиц ВВ в твердой фазе. На рисунке 2.10 представлен внешний вид системы просеивания (а) и ее внутреннее устройство (б).



а – внешний вид; б – конструкция Рисунок 2.10 – Система просеивания

Материалы, размещенные на различных подложках, включали нитрат аммония, сахарозу, ТНТ и гексоген. ВВ разместили в сите Precision Eforming LLC с квадратными отверстиями размером $20 \pm 0,5$ и $10 \pm 0,3$ мкм со ста шариками из нержавеющей стали для предотвращения агломерации частиц. В зависимости от выбранного сита, и создания необходимой массы ВВ на подложках (10 мкг/см² и 100 мкг/см²) процесс просеивания варьируется от 30 мин до 9 ч.

Изготовление эталонных образцов ВВ методом просеивания не требует каких-либо специальных знаний и навыков. Является быстрым и надежным способом анализа размера просеиваемых частиц. Однако, для точного определения массы нанесенного ВВ просеивание может применяться только совместно с другими методами, чаще всего с методом взвешивания, а коэффициент заполнения невелик, по сравнению с методом струйной печати.

2.4.4 Распыление

Пневматическое распыление – метод распыления при помощи распылителя (или аэрографа) при котором нанесение раствора ВВ осуществляется в результате воздействия потока сжатого воздуха, поступающего из воздушной головки, на струю распыляемого раствора.

В работе [65] использовались: гексоген, тетрил и ТНТ. Подложкой служила дверь автомобиля (рисунок 2.11).



Рисунок 2.11 – Фотография остатков ВВ осаждаемых на двери автомобиля

Образцы были приготовлены следующим образом. Количества каждого образца растворяли в ацетонитриле и распыляли на двери автомобиля через картонные шаблоны, в которых имелись круглые вырезы диаметром 18 см. Поверхностная концентрация следов гексогена составила 81 нг/см², тетрила и ТНТ – 37 и 42 нг/см² соответственно. Каждый образец представляет собой пятна кольцевой структуры кофейного цвета, и отходящие от них ручейки высокой концентрации, оставшиеся от потока растворителя. Стоит отметить, что соответствующие концентрации могут только интерпретироваться как средние оценки массы.

Для устранения человеческого фактора в работе [66] представлена автоматизированная установка по распылению BB, состоящая из окрасочного

сервопривода (рисунок 2.12 а). Управлением пистолета И движением сервопривода осуществлялось компьютером, что позволяло контролировать количество нажатий, а также их силу и темп. На подложку распылялся раствор THT Процесс распыления В ацетонитриле. раствора представлен на рисунке 2.12 б.





б

а – внешний вид; б – процесс распыления раствора ТНТ на подложку
 Рисунок 2.12 – Автоматизированная установка для распыления ВВ

На рисунке 2.13 приведены оптические микрофотографии остатков ТНТ, полученных после осаждения капель.



Рисунок 2.13 – Микрофотография остатка TNT после осаждения растворенного ТНТ на кремниевой пластине. Масштаб изображений составляет 500 мкм [66]

На рисунке 2.13 видна достаточно высокая дисперсия диаметров капель получаемого распыла.

Частным случаем пневматического распыления ВВ на подложку является использование перегретой жидкости. Устройство для получения данного аэрозоля называется аэрозольным баллоном или аэрозольной упаковкой. Конструкция аэрозольного баллона представлена на рисунке 2.14.



1 – баллон; 2 – герметично закрытый клапан; 3 – сифонная трубка;
 4 – клапанно-распылительное устройство; 5 – пропеллент; 6 – раствор ВВ в растворителе

Рисунок 2.14 – Конструкция аэрозольного баллона

Преимуществами аэрозольной упаковки являются долгий срок хранения (более 2-х лет). Достижение однородности факела и высокой дисперсности. Но большие потери раствора ВВ при распылении приводят лишь к средней оценке концентрации ВВ на поверхности. А необходимость изготовления аэрозольного баллона значительно ограничивает применение данного способа.

Относительно новым и перспективным способом нанесения эталонного раствора ВВ является ультразвуковое распыление.

При ультразвуковом способе распыления раствор ВВ переходит в аэрозольное состояние за счет увеличения поверхностной энергии пленки жидкости, которое достигается путем наложения на нее механических колебаний ультразвуковой частоты высокой интенсивности. В аэрозольное состояние под действием высокочастотных (1-3 МГц) ультразвуковых колебаний раствор ВВ переходит на границе раздела газовой и жидкой сред. Акустическая энергия подведена к зоне распыления со стороны раствора ВВ.

Распыление высокочастотными ультразвуковыми колебаниями осуществляется направлением из глубины раствора на его поверхность пучка мощных высокочастотных ультразвуковых волн. При этом на поверхности раствора образуется так называемый ультразвуковой фонтан. В верхней части такого фонтана происходит распыление с образованием тонкого и стойкого монодисперсного аэрозоля (тумана), размер капель которого составляет 2-4 мкм [67].

Для практической реализации ультразвукового способа распыления в фонтане используют фокусирующие излучатели с резонансной частотой 1-3 МГц в виде вогнутых фокусирующих пьезоэлектрических пластин.

Основными преимуществами нанесения ВВ ультразвуковым способом являются небольшие размеры распылительного устройства, возможность получения мелкодисперсного и монодисперсного распыления [68].

2.4.5 Струйная печать

В последнее десятилетие технологию струйной печати стали рассматривать как точный микродозированный инструмент. Сегодня этот инструмент применяется во многих технологических сферах. В том числе, способом струйной печати достигнуто нанесение незначительных количеств сильно разбавленных растворов ВВ на подложку [69].

В отличие от других способов получения образцов, при работе с которыми часто возникает эффект «кофейного кольца» (т.е. большая часть нанесенного материала сосредоточена вдоль краев), образцы, полученные с помощью струйной технологии, равномерно распределяются по поверхности подложки [70].

Струйные системы, предназначенные для генерации капель BB, используют тип подачи красителя, называемого в русской литературе как подача по требованию (Drop-on-demand). Данный тип печати представлен на рисунке 2.15.



Рисунок 2.15 – Подача по требованию. Капля диаметром 55 мкм генерируется на частоте 640 Гц [71]

Для создания капель используется пьезоэлектрический привод. Такая струйная печать основана на объемном изменении в жидкости индуцированного смещения пьезоэлектрического материала. Это объемное изменение создает давление/скорость переходных процессов в жидкости, направленное на получение капли, которая выходит из сопла. Образование капли повторяется, могут частотах. Струйные базе создаваться капли на высоких системы на компьютерного управления, могут быть использованы в гибкой технологии производства и обеспечить большие динамические диапазоны для вывода.

Схема струйного принтера предназначенного для нанесения BB, использующего технологию печати подачи по требованию представлена в работе [72] (рисунок 2.16).



Рисунок 2.16 – Схема струйного принтера

На сегодняшний день объем генерируемых капель варьируется от нескольких пиколитров (10⁻¹² л) до нескольких фемтолитров (10⁻¹⁵ л), однако есть работы, в которых сообщается о получении капель объемом зептолитры (10⁻²¹ л) [73]. Для измерения размеров получаемых капель широкое применение нашли получение их микроскопических оптических изображений и флуоресцентные методы.

В работе [70] описаны вещества, применяемые в исследованиях и их пробоподготовка. Нитрат аммония, хлорат калия (КСЮ₃), гексоген, октоген, ТНТ и ТЭН растворили в растворе метанола (СН₃OH) и воды (2:1), ацетонитрила (CH₃CN) и воды (20% от объема), или в воде, в зависимости от растворимости. Все растворы обрабатывались ультразвуком в течение 30 минут для обеспечения однородности. Фильтрация растворов для удаления частиц перед печатью не производилась, так как не было необходимости.

Печать была выполнена при помощи принтера JetLab® 4 (MicroFab Technologies, США), представленного на рисунке 2.17, на частоте 250 Гц со скоростью капель ~ 2 м/с.



Рисунок 2.17 – Принтер JetLab® 4: внешний вид (а), распределительное устройство (б), печатающая головка (в)

Масса капли была измерена с помощью спектроскопии поглощения ультрафиолетового и видимого диапазона в английской литературе известной как ultraviolet-visible (UV-Vis) absorption spectroscopy.

Скорость 1,5-2 м/с идеально подходит для печати ВВ. Скорость капель менее 1 м/с может привести к неточному размещению капли.

Общее количество капель, необходимых для достижения желаемой концентрации на единицу площади рассчитывается на основе объема одной микрокапли и концентрации раствора. В зависимости от необходимого количества и общего объема капель, расстояние и массив капель в каждой строке могут быть вычислены. Эти значения легко регулировать в зависимости от концентрации раствора.

Преимуществом такого нанесения является быстрое испарение растворителей с подложки и небольшая мощность нагревателя [69]. Этот метод совместим с различными растворителями и подложками, обеспечивает точную дозировку осаждаемых ВВ. Однако требует дорогостоящего и сложного оборудования.

2.4.6 Микропипетирование

Распределение сильно разведенного раствора вещества при помощи микропипетки это достаточно точный способ создания заданных поверхностных концентраций. Для отмеривания точного объема ВВ применяется микродозаторы.

В работе [43] исследования проводились тепловизионным методом по обнаружению и идентификации адсорбированных молекул гексогена на поверхности. Примерные концентрации остатка гексогена на поверхности составляли 20 мкг/см².

Одним из недостатков подобного нанесения является то, что масса исследуемого вещества распределяется по поверхности относительно не равномерно. В работах [74, 75] попытались устранить данный недостаток. В качестве подложки были выбраны алюминиевые пластины с отверстиями диаметром от 100 до 300 мкм с уменьшением глубины на 10 мкм между каждым

49

отверстием. Каждая пластина заполнялась одним из четырех веществ: гексоген, ДНТ, ТНТ и серой (рисунок 2.18).



Рисунок 2.18 – Изображения испытательных пластин с гексогеном, ДНТ ТНТ и серой, полученные с помощью оптического микроскопа [74]

Масса ВВ в каждом отверстии была оценена в зависимости от объема каждого отверстия, плотности нанесенного ВВ, и коэффициента заполнения – 100 %, которого на практике достичь невозможно. Масса, тем самым, не является точно взвешенной. В работах попытались заполнить все отверстия для всех образцов. Однако этого не удалось достичь из-за размеров частиц и физических свойств веществ.

2.4.7 Центрифугирование

Центрифугирование (spin-coating) — разделение неоднородных систем на фракции по плотности при помощи центробежных сил.

Подготовленную подложку помещают на вакуумный захват. ВВ растворенные в растворителе наносятся на подложку. Подложка вращательно ускоряется в течение некоторого времени. Тонкая пленка, которая остается, перетекает медленно от центра к краям подложки под действием центробежных сил и растворитель испаряется. Таким образом, вязкость раствора значительно увеличивается, что останавливает относительное движение. Процесс нанесения ВВ завершается путем удаления остаточного растворителя термической обработкой [76].

В работе [77] порошок ТЭНа растворяли в ацетоне. Для равномерного растворения ВВ раствор обрабатывали ультразвуком. Эксперименты проводились на двух подложках: слюда и кремниевая пластина. Непрерывность нанесенной пленки раствора ТЭНа методом центрифугирования определялась атомносиловым микроскопом. Уменьшение толщины пленки и непрерывности по сравнению со сплошной пленкой может быть объяснено большой начальной концентрацией ВВ.

2.4.8 Погружение

Процесс погружения (dip-coating) является популярным способом создания тонкопленочных покрытий материалов ВВ наряду с процедурой центрифугирования.

Процесс нанесения покрытия погружением, как правило, разделен на пять этапов:

1. Погружение: Подложку погружают в раствор BB с постоянной скоростью.

2. Начало вывода подложки: Поднятие подложки через определенный период времени.

3. Осаждение: пленка наносится на подложку в то время когда ее поднимают из резервуара с раствором. Вывод подложки осуществляется с постоянной скоростью, избегая любой нежелательной вибрации. Скорость вывода определяет толщину осажденной пленки (более высокая скорость производит к образованию более толстой пленки).

4. Дренаж: Избыток жидкости стекает с поверхности.

5. Испарение: Растворитель выпаривают из осажденного раствора, в результате чего образуется пленка ВВ.

Схема процесса нанесения ВВ погружением показана на рисунке 2.19.



Рисунок 2.19 – Схема процесса нанесения ВВ погружением [76]

Нанесенное покрытие может оставаться влажным в течение нескольких минут, пока растворитель не испарится. Этот процесс может быть ускорен с помощью различных средств, включая обычные тепловые, УФ-, и ИК- методики в зависимости от состава раствора покрытия.

Благодаря своей простоте, этот метод поддается автоматизации. Толщина пленки в первую очередь зависит от вязкости жидкости, плотности жидкости, поверхностного натяжения и скорости выхода из резервуара.

Процесс погружения имеет свои недостатки, в том числе: толщина пленки может варьироваться от верха до низа подложки («эффект клина»); могут оставаться толстые ребра на нижней части подложки вследствие избытка стока покрытия.

Выполнен обзор наиболее популярных методов создания тестовых образцов с известными физическими параметрами. Из анализа приведенных способов создания тестовых образцов можно выделить лва способа ЭТО микропипетирование и взвешивание, которые удовлетворяют требованиям интерпретации следовых количеств веществ на поверхности предметов, достаточно просты в применении и обеспечивают необходимые параметры нанесения

2.5 Выбор методов обработки гиперспектральных данных

После регистрации гиперспектрального куба данных не менее важным шагом является его обработка и анализ для определения наличия или отсутствия

следов ВВ на исследуемой поверхности. Одной из главных проблем обработки гиперспектрального изображения является выявление искомого материала из значительного объема информации. Поэтому при работе с гиперспектральными данными необходимы не только мощные аппаратные средства обработки информации, но и ПО, которое сможет анализировать полученные снимки с высоким пространственным и спектральным разрешениями [78]. На сегодняшний день наиболее популярными пакетами лля обработки И анализа гиперспектральных изображений являются ENVI и ERDAS Imagine. В данной главе рассматриваются основные методы обработки гиперспектральных данных применительно к обнаружению следов ВВ методом АФСИ.

Обработка полученных гиперспектральных данных включает в себя предварительную обработку и непосредственно статистическую обработку изображений.

2.5.1 Предварительная обработка

Предварительная обработка гиперспектральных данных представляет собой первичную коррекцию изображений. Основные этапы предварительной обработки спектральных изображений, которые могут применятся в методе АФСИ изложены ниже.

1) Учёт неровности исследуемой поверхности для устранения искажений формы и изменения масштаба объектов сложной формы.

2) Вычитание фонового изображения.

Вычитание фонового изображения необходимо для выявления изменений, идентификации области лазерной засветки и уменьшения собственных шумов ИК-приёмника.

3) Сегментация.

Для идентификации области воздействия лазерного излучения и отделении фона возможно применение сегментации изображения посредством пороговой фильтрации. Пороговая фильтрация может выполняться как бинаризацией по уровню, так и другими методами пороговой фильтрации: Отса [79], Бернсена [80], Эйквила.

4) Нормирование яркости изображений на различных длинах волн с целью компенсации изменения мощности излучения на этих длинах волн.

5) Подавление спекл-шума.

При регистрации изображений поверхности, подсвеченной лазерным излучением, возможно формирование спекл-шума, вносящего дополнительную шумовую составляющую. Наличие спекл-шума обусловлено особенностями рассеяния лазерного излучения на шероховатых поверхностях [81]. При этом длина волны сопоставима с шероховатостью поверхности. Модель рассеивания представлена на рисунке 2.20.



Рисунок 2.20 – Модель рассеивания на шероховатой поверхности [81]

К методам уменьшения спекл-шумов относятся усреднение по кадрам и фильтрация, как при помощи локальных линейных и нелинейных фильтров (медианный, усредняющий, Ли, Фроста, Куана, Сигма), так и посредством фильтров на основе вейвлет-разложения (D4 Daubechies, Villasenor, Odegard) [82].

В работах разных авторов [83-85], в том числе для целей дистанционного зондирования Земли, была выполнена сравнительная оценка подавления спеклшума на изображениях различными фильтрами. Главными критериями фильтров являлись быстродействие и эффективность подавления. Исследования показали, что данным критериям наиболее соответствует медианный фильтр.

6) Контрастирование.

Для повышения качества визуального восприятия гиперспектральных данных применяется контрастирование. Существует несколько методов повышения контраста – это растягивание, нормализация и выравнивание (эквализация) гистограммы значений яркостей элементов изображения [86].

7) Сокращение размера гиперспектральных данных.

Гиперспектральный куб может состоять из десятков или сотен спектральных каналов и занимать гигабайты памяти, что затрудняет процесс передачи, обработки и хранения данных. В связи с этим для уменьшения объема занимаемой памяти применяют методы сжатия спектральных изображений. Популярными методами сжатия являются квантование изображения, кодирование с предсказанием, трансформационное кодирование, энтропийное кодирование [87].

2.5.2 Статистическая обработка

Непосредственный анализ данных гиперспектрального куба представляет собой статистическую обработку.

Изучение ИК-спектров веществ в настоящее время проводится двумя методами:

Первый метод – метод характеристических частот. Молекулы, имеющие одни и те же химические группы, часто имеют одинаковые частоты в спектре. Эти частоты называют характеристическими [88].

Расшифровка ИК-спектра производится следующим образом:

• идентификацию полос поглощения начинают с наиболее сильных и высокочастотных полос в области валентных колебаний ОН-связи.

• По таблицам характеристических частот полосу поглощения относят к колебанию конкретной связи.

• Наличие той или иной связи подтверждают деформационной полосой поглощения, относящейся к данной связи.

Второй метод – метод сравнения с эталоном. Идентификация неизвестного соединения по ИК-спектру осуществляется сравнением его спектра с эталонными спектрами. Для этого необходима обширная картотека эталонных спектров; при этом важнейшим фактором является стандартность условий их регистрации. В

настоящее время имеются многочисленные базы данных органических и неорганических соединений.

Идентификация веществ по ИК-спектру является полностью достоверной только при точном совпадении изучаемого спектра со спектром эталона по положению (частоте), форме и относительной интенсивности всех полос, то есть всей спектральной кривой.

При сравнении данных, каждый пиксель гиперкуба представляют как nмерный вектор спектральных яркостей (2.15):

$$\overrightarrow{f_{ij}} = \begin{pmatrix} f_1 \\ \vdots \\ f_k \end{pmatrix}, \qquad (2.15)$$

где f_k – яркость пикселя в n-ом диапазоне (канале), k — общее число используемых каналов [89].

Классификация методов сравнения представлена на рисунке 2.21.

Разделяют цельнопиксельный (попиксельный) и субпиксельный методы сравнения. В свою очередь попиксельные методы классификации подразделяются на два вида: с обучением и без обучения [90].

Суть классификации без обучения – это автоматическое разбиение изображения на однородные области (кластеры) на основе анализа схожести спектральной яркости пикселей. В данную группу выделяют следующие алгоритмы.

1) Алгоритм k-средних (k-means).

Наиболее простой и популярный метод классификации набора данных на выбранное количество кластеров. Суть алгоритма *k*-средних заключается в следующем. Вначале пользователь задает количество разделяемых на изображении кластеров. Далее производится случайный выбор центров кластеров. На первой итерации вычисляется спектральное расстояние от пикселя до центров кластеров и каждый пиксель относится в тот кластер, где расстояние будет минимальным. Ha каждой последующей итерации для всех кластеров перевыбираются центры и пиксели заново разбиваются на кластеры в

соответствии с тем, какой из новых центров оказался ближе. Критерием завершения алгоритма является итерация, в которой больше не происходит изменения кластеров.

Недостатки алгоритма *k*-средних:

- результат анализа зависит от выбора начальных центров кластеров;

- необходимо заранее знать количество кластеров;

– возникновение неопределенности, когда пиксель принадлежит к разным кластерам в равной степени, или не принадлежит ни одному.

Последний недостаток алгоритма *k*-средних был устранен в алгоритме *с*-средних.



Рисунок 2.21 – Методы анализа спектральных данных

2) Алгоритм *c*-средних (*c*-means) или FCM-алгоритм (Fuzzy Classifier Means).

При помощи алгоритма *с*-средних производится вычисление вероятности, которая определяет принадлежность пикселя к кластеру и тем самым устраняет проблему неопределенности. В остальном суть метода и его недостатки те же, что у алгоритма *k*-средних.

3) Алгоритм ISODATA (Итерационная самоорганизующаяся методика анализа данных – Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique).

Отличие метода от выше рассмотренных в том, что необходимо изначально указывать количество итераций, за которое алгоритм должен разделить изображение на кластеры, или максимальный процент пикселей, не изменивших свой кластер. Формирование кластеров производится по тем же принципам, но их количество алгоритм определяет автоматически.

Рассмотренные алгоритмы классификации без обучения просты в исполнении, не нуждаются в обучении, но требуют задания начальных параметров и обладают сравнительно невысокой точностью исполнения.

Классификация с обучением – это процесс разделения изображения на классы при сравнении значения яркости каждого пикселя с эталонными векторами. В качестве эталонных векторов выступают спектры, непосредственно полученные из изображения, либо спектры из спектральных библиотек, полученные при измерении материалов и объектов. Самые распространенные методы классификации с обучением приведены ниже.

1) Метод минимального расстояния (Minimum Distance).

Методом минимального расстояния определяется спектральное расстояние (*r*) между эталонным вектором (\vec{f}_n) и вектором значений яркости пикселя снимка (\vec{f}_n) по формуле (2.16) [91].

$$r = \sqrt{\sum_{k=1}^{k} (\overrightarrow{f_{nk}} - \overrightarrow{f_{ijk}})^2}$$
(2.16)

По вычисленному значению спектрального расстояния проводится классификация пикселей.

Метод прост в реализации. Недостаток этого метода заключается в том, что при его применении не учитывается распределение (дисперсия) значений яркости пикселей в различных участках, что может привести к ошибкам классификации [85].

2) Метод дистанции Махаланобиса (Mahalanobis Distance).

Метод дистанции Махаланобиса учитывает недостаток предыдущего метода. Вначале на основе значений эталонных векторов и спектральных яркостей пикселя находится матрица ковариации S. Затем по формуле 2.17 подсчитывается расстояние Махаланобиса и производится классификация [85, 91].

$$Dm = \sqrt{\left(\overrightarrow{f_{ij}} - \overrightarrow{f_n}\right)^T \cdot S^{-1}\left(\overrightarrow{f_{ij}} - \overrightarrow{f_n}\right)}, \qquad (2.17)$$

где *T* – оператор транспонирования *S* – матрица ковариации.

3) Метод спектрального угла (SAM, Spectral Angle Map)

Методом спектрального угла измеряется спектральное сходство путем вычисления угла между двумя спектрами, рассматривая их в качестве векторов в n-мерном пространстве (2.18) [92]:

$$\alpha = \cos^{-1} \left(\frac{\sum_{k=1}^{k} \overline{f_{ijk}} \cdot \overline{f_{nk}}}{\left(\sum_{k=1}^{k} \overline{f_{ijk}}^2\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\sum_{k=1}^{k} \overline{f_{nk}}^2\right)^{\frac{1}{2}}} \right)$$
(2.18)

Малые углы между двумя спектрами указывают на высокую степень сходства, а большие углы – на низкую. При этом вектору присваивается значение весом от 0 до 1 соответственно (рисунок 2.22).

Данный метод не чувствителен к фактору освещенности, так как угол между двумя векторами остается постоянным независимо от их длины (т.е. освещения).



Рисунок 2.22 – Метод спектрального угла [92]

4) Метод максимального правдоподобия (ML, Maximum Likelihood).

Методом максимального правдоподобия вычисляется вероятность принадлежности рассматриваемого пикселя к определенному классу. Логарифмическая функция правдоподобия ln *W* определяется по формуле (2.19):

$$L(f_n) = \ln W(f_{ij}, f_n) = -\sum_{k=1}^k \frac{(f_{ijk} - f_{nk})^2}{2\sigma_k^2} + \sum_{k=1}^k \ln \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_k^2}}$$
(2.19)

где σ_k^2 – выборочная дисперсия.

Наиболее вероятное значение определяется по максимуму функции правдоподобия. Если не задано пороговое значение, то пиксель относят к классу, к которому он может принадлежать с самой высокой вероятностью. Если наибольшая вероятность меньше порогового значения, то пиксель остается неклассифицированным. Данный метод достаточно сложен при реализации [93].

5) Метод анализа особенностей спектральной кривой (SFF, Spectral Feature Fitting)

С помощью метода SFF выявляется соответствие полученного спектра пикселя с эталонным спектром материала, на основе характерных зон поглощения данного типа материала. Для нахождения искомого материала с помощью алгоритма SFF эталонные спектры сравниваются с идентифицируемым спектром по двум параметрам измерений. Во-первых, определяется глубина спектра. Вовторых, форма эталонного спектра сравнивается с формой спектра мишени на каждой длине волны (в каждом пикселе) при помощи метода наименьших квадратов.

Основным преимуществом этого метода является то, что с его помощью анализируются особенности спектра поглощения. Тем самым устраняется эффект шума в изображении. Это преимущество также служит и недостатком, например, когда два спектра практически не отличаются друг от друга по форме, а только расходятся в размере коэффициента отражения. Тогда эти два спектра могут быть отнесены к одному классу [94, 95].

Основным недостатком рассмотренных методов попиксельного анализа, является то, что они не позволяют рассчитать значение субпикселей.

Субпиксельные методы анализа позволяют определять состав пикселя изображения. Методы довольно просты, но требуют гораздо большего времени обработки.

1) Искусственные нейронные сети (ИНС)

ИНС решают различные типы задач, в том числе задачи связанные с распознаванием и классификацией материалов в изображении.

ИНС представляют собой систему соединенных между собой слоев искусственных нейронов. Искусственный нейрон имеет некоторое количество соответствует определенный вес. Нейрон ВХОДОВ, каждому из которых рассчитывает выходной сигнал как линейную комбинацию всех входных сигналов. Для кластеризации используются самообучающиеся сети. Самым распространенным методом кластеризации является самоорганизующаяся карта Кохонена (self-organising map, SOM) [96]. Количество нейронов равно количеству кластеров и задается как параметр. Каждый нейрон описывается весовым вектором, имеющий такую же размерность, что и входные данные. В процессе обучения для каждого элемента данных выбирается наиболее похожий по весовому вектору нейрон (победитель), и значение его вектора-веса приближается к текущему элементу. Также приближаются весовые векторы нескольких близлежащих узлов. Циклический процесс обучения, перебирающий входные

данные, заканчивается по достижении картой допустимой погрешности, или при достижении заданного количества итераций. Существует несколько других методов кластеризации на основе нейронных сетей: CDL, HEC, SPLL [97], использовании векторов-прототипов которые также основаны на ЛЛЯ Нейросетевые кластеризации представления кластера. алгоритмы характеризуются устойчивостью к «шуму» и способностью обрабатывать многомерные данные. Главным недостатком ЭТИХ методов считается необходимость жесткого задания числа кластеров и высокая вычислительная сложность [98].

2) Линейное спектральное разделение (Linear Spectral Unmixing).

Концепция алгоритма линейного спектрального разделения заключается в том, что спектры одного пикселя представляют собой линейную комбинацию всех эталонных спектров внутри этого пикселя [99]. Алгоритм разделяет спектры каждого пикселя на составляющие из нескольких спектров сигнала. Вес каждого эталонного спектра – доля области пикселя. Алгоритмом разделения решается система п линейных уравнений для каждого пикселя, где п – число каналов гиперкуба. Неизвестными переменными в этих уравнениях являются фракции каждого эталонного спектра в пикселе. Чтобы решить систему линейных уравнений для неизвестных пиксельных фракций необходимо иметь больше уравнений, чем неизвестных, а это значит, что необходимо больше каналов, чем эталонных материалов. В гиперспектральной съемке это условие практически всегда выполняется.

Общее уравнение разделения приведено в формуле (2.20) [100].

$$S_{j} = \sum_{i=1}^{m} K_{i} \cdot R_{i} + \upsilon_{j} ,$$

$$1 = \sum_{i=1}^{m} K_{i} , \quad K_{i} \ge 0,$$
(2.20)

где m – это число эталонных спектров; R_i – коэффициент отражения эталонного спектра; K – дробное множество каждого компонента в пикселе и υ – остаточная часть для каждого канала.

62

Результатом линейного спектрального разделения является ОДНО фракционное изображение для каждого эталонного спектра (рисунок 2.23). изображениях Значения пикселей В этих указывают процент пикселя, составленного из этого эталонного спектра.



Рисунок 2.23 – Иллюстрация алгоритма линейного спектрального разделения на примере четырех пикселей

3) Согласованная фильтрация (Matched Filtering).

Согласованная фильтрация – один из видов субпиксельного анализа, в котором осуществляется поиск только выбранных пользователем материалов. Поэтому этот вид анализа называют частичным разделением. Данный метод применяется, когда не требуется точный анализ гиперспектральных данных [99].

Рассмотренные методы статистического анализа ланных можно обработки изображений, использовать гиперспектральных как ДЛЯ ПО отдельности, так и в совокупности. Поскольку на данный момент не существует универсального подхода к методам обработки и анализа спектральных изображений, то выбор количества методов обработки в конечном итоге определяется конкретной задачей исследования.

При обнаружении следовых количеств ВВ методом АФСИ нецелесообразно использовать методы без обучения, так как с их помощью невозможно решить основную задачу дистанционного обнаружения ВВ – идентифицировать конкретное вещество.

В связи с этим, для обработки спектральных данных были реализованы два метода цельнопиксельного анализа метод спектрального угла и метод

минимального расстояния, которые отличаются простотой реализации и высокой точностью.

Глава 3. Разработка и создание измерительного комплекса обнаружения конденсированных следов BB

3.1 Выбор оборудования и создание измерительного комплекса

Разработка комплекса для дистанционного обнаружения и идентификации следов ВВ на основе метода АФСИ предполагает выбор источника и приёмника ИК-излучения, метрологического оборудования контроля параметров источника лазерного излучения, а также оптическую систему распределения интенсивности зондирующего излучения с требуемыми параметрами.

3.1.1 Выбор источника излучения

Для дистанционной идентификации следов ВВ на поверхности требуется источник излучения с высокой монохроматичностью, который обеспечит взаимодействие излучения с рассматриваемыми материалами заданном в диапазоне длин волн. В качестве таких источников обычно используются перестраиваемые по длине волны лазеры. Чем шире диапазон перестройки, тем большую номенклатуру веществ можно детектировать с помощью установки. В последнее время наибольшую популярность приобрели квантово-каскадные лазеры (ККЛ) перестраиваемые в широком диапазоне длин волн. К достоинствам их применения можно также отнести небольшие размеры и стабильность длины волны [101, 102].

К недостаткам ККЛ можно отнести невысокую мощность по сравнению с прочими лазерами, их высокую стоимость и главное труднодоступность.

Для целей облучения поверхности с частицами ВВ могут использоваться перестраиваемые CO₂ лазеры. Они характеризуются высоким КПД, являются одними из самых мощных и хорошо изученных лазеров, а также имеют меньшую стоимость.

Из анализа ИК-спектров поглощения типичных ВВ и окон прозрачности атмосферы в ИК-диапазоне следует, что в качестве источника излучения

необходимо выбрать перестраиваемый газовый лазер на основе CO₂, работающий в диапазоне длин волн 8-14 мкм. На сегодняшний день разработано множество конструкций CO₂-лазеров, различающихся по принципу построения системы накачки, технике отвода тепла, способу перестройки частоты генерации, энергетическим, временным, спектральным и эксплуатационным параметрам. Разнообразие конструктивного исполнения CO₂-лазеров определяется многообразием областей применения.

Все лазеры состоят из трёх основных частей: активной (рабочей) среды; системы накачки (источник энергии); оптического резонатора (может отсутствовать, если лазер работает в режиме усилителя).

Лазеры на углекислом газе (CO₂-лазеры) в качестве активной среды используют смесь углекислого газа (CO₂), гелия (He), азота (N₂), в некоторых случаях водорода (H₂), водяного пара и/или ксенона (Xe).

СО₂-лазеры по принципу построения системы накачки подразделяются на: газоразрядные, газодинамические и химические.

Последние два вида лазеров на сегодняшний день не получили широкого практического применения.

Газоразрядные высокой эффективностью лазеры отличаются преобразования электрической энергии в энергию колебаний молекул азота, возможностью регулирования мощности накачки в довольно широких пределах, надёжностью и доступностью аппаратуры. Для накачки применяют тлеющий разряд постоянного тока или высокочастотный (ВЧ). ВЧ разряд обладает, по сравнению с тлеющим, рядом преимуществ. Во-первых, электроны в нем находятся в беспрерывном колебательном движении и производят более сильную ионизацию, чем в тлеющем разряде. Во-вторых, удается значительно повысить рабочее напряжение и, таким образом, обеспечить высокую электронную температуру. Главное же достоинство ВЧ разряда состоит в использовании электродов, находящихся вне рабочего объема разрядной трубки. Такое расположение позволяет полностью устранить связанный с электродами эффект поглощения и отдачи газа. Поэтому конструкция и технология изготовления СО₂-

лазеров с ВЧ накачкой проще, а надёжность, ресурс работы, удельные характеристики существенно выше, чем у лазеров с накачкой постоянным током.

Одним из основных условий работы CO₂-лазера является недопустимость нагрева лазерной смеси выше температуры 600-700 К, а следовательно, необходимо ее эффективное охлаждение. По способу теплоотвода различают CO₂-лазеры с диффузионным и конвективным охлаждением.

Принцип диффузионного охлаждения рабочей смеси газового лазера заключается в отводе тепла, выделяющегося при газовом разряде, вследствие процесса молекулярной теплопроводности газа к охлаждаемым стенкам трубки или камеры.

Конвективный способ охлаждения осуществляется посредством замены отработавшей порции газа. Газовую смесь прокачивают по замкнутому контуру, иначе необходим её большой объем [103, 104].

Для перестройки длины волны излучения в широко диапазоне, чаще всего применяются лазеры с внешним резонатором. В качестве внешнего элемента резонатора используется дифракционная решетка. Для автоматической перестройки лазерного излучения по длинам волн также необходимо обеспечить программно-управляемое перемещение частотно-селективного элемента – дифракционной решетки.

В предыдущей главе были также сформулированы технические требования для источника лазерного излучения.

Таким образом, для создания измерительного комплекса по обнаружению следов ВВ методом АФСИ в качестве источника когерентного ИК-излучения необходим программно-перестраиваемый газоразрядный СО₂-лазер с ВЧ накачкой и диффузным охлаждением, мощностью до 10 Вт и рабочими длинами волн в диапазоне 8-14 мкм.

Всем этим требованиям удовлетворяет газовый лазер LCD-5WGT с перестраиваемой длиной волны. Внешний вид лазера приведен на рисунке 3.1.

Лазер состоит из излучателя, ВЧ источника питания, адаптера и серворегулятора. Излучатель предназначен для генерации лазерного излучения в

67

ИК-области спектра, ВЧ источник питания служит для возбуждения разряда в излучателе, адаптер – для преобразования переменного напряжения 220 В в постоянное напряжение 24 В.



Рисунок 3.1 – Газовый лазер LCD-5WGT

Основные технические данные лазера LCD-5WGT:

- диапазон длин волн лазерного излучения 9,18-10,81 мкм;

- количество длин волн излучения - 75;

– мощность излучения (на сильных линиях), не менее 8,0 – 10,5 Вт;

- спектральный состав 90 % ТЕМ₀₀

- поляризация - линейная;

- энергетическая расходимость лазерного излучения, не более 10⁻² рад;

– диаметр пучка лазерного излучения на выходном зеркале, не более 1,8 мм.

– относительная нестабильность мощности лазерного излучения в течение 30 мин на наиболее сильных переходах, не более ± 7 %.

Перестройку по длинам волн обеспечивает серворегулятор MR-J2S-10 CL (рисунок 3.2) совместно со встроенным в излучатель сервомотором HC-MFS053 компании Mitsubishi Electric.

Основные характеристики серворегулятора MR-J2S-10 CL:

– напряжение питания 1/3ф 220В;

– мощность 0,1 кВт;

– 16 программ с общим количеством действий до 120 команд;

- 2 аналоговых входа скорость/момент;

- интерфейс RS-422.



Рисунок 3.2 – Серворегулятор MR-J2S-10 CL и сервомотор HC-MFS053 компании Mitsubishi Electric

Серворегулятор подключается к ПК через встроенный последовательный интерфейс RS-232C/RS-422 для выполнения настройки и ввода параметров.

Обязательным условием работы лазера является наличие принудительного водяного охлаждения излучателя и источника питания. Главным критерием выбора охладителя является обеспечение достаточной мощность охлаждения лазера и автономная работа от источника подачи воды. В качестве водяного охлаждения выбран циркуляционный охладитель LAUDA WK 2200, представленный на рисунке 3.3, который удовлетворяет данным критериям.



Рисунок 3.3 – Циркуляционный охладитель LAUDA WK 2200

Основные характеристики циркуляционного охладителя:

- диапазон рабочих температур 0..40 °C;

- диапазон окружающей температуры 5..40 °C;

- дискретность установки температуры 0,1 °С;

– дискретность индикации температуры 0,1 °С.

Управление мощностью излучения лазера LCD-5WGT осуществляется при помощи внешнего сигнала управления со следующими характеристиками:

- импульсы TTL уровня (положительные);

- частота 2-4 кГц;

 заполнение периода от десятков микросекунд до непрерывного (максимального) режима.

Средняя мощность излучения лазера пропорциональна площади заполнения управляющего сигнала.

Для генерации управляющего сигнала выбран генератор сигналов специальной формы ГСС-40, который обеспечивает необходимые параметры управления (рисунок 3.4).



Рисунок 3.4 – Генератор сигналов специальной формы ГСС-40

Технические характеристики ГСС-40:

- частотный диапазон 1 мкГц 40 МГц;
- погрешность установки частоты $\pm 5 \cdot 10^{-6}$;
- рабочая температура 0..40 °С;

– погрешность установки уровня на 1 кГц \pm (1%+0,2 мВ);

– возможность генерации различных форм сигналов.

– интерфейс RS-232С.

Ввиду отсутствия на ПК разъема RS-232 ГСС-40 подключался при помощи преобразователя интерфейса RS-232/USB.

3.1.2 Выбор ИК-приемника

Подсвеченная лазерным излучением поверхность со следами BB наблюдается при помощи ПИ, рабочий спектральный диапазон которых должен перекрывать диапазон длин волн излучения перестраиваемого CO₂-лазера. В выбранном диапазоне длин волн к таким приёмникам относятся охлаждаемые и неохлаждаемые тепловизионные камеры.

Камеры с охлаждением являются более точными, но громоздкими и дорогими. Во время работы с данными камерами необходимо длительное время ожидания, связанное с охлаждением камеры для начала или возобновления работы.

Ко второму типу тепловизионных датчиков относят болометры и микроболометры.

Неохлаждаемые ПИ имеют такие преимущества как – отсутствие системы охлаждения и, следовательно, меньший размер, малое энергопотребление и меньшая стоимость.

Главными критериями выбора данных ИК-приемников являются разрешающая способность матрицы, ее чувствительность, стоимость.

Основная составляющая микроболометров – это его чувствительный элемент. Сенсоры датчиков состоят из резистивных слоев оксида ванадия (VOx) или аморфного кремния (α-Si), регистрирующих изменения электрического сопротивления под воздействием температуры. Сенсоры на основе VOx имеют ряд преимуществ: высокая чувствительность (30 мкК), низкий уровень собственных шумов. Однако камеры на основе VOx существенно выше по стоимости. Чувствительность микроболометров на основе аморфного кремния (α-

Si) достигает 100 мкК, что достаточно для целей дистанционного обнаружения, а его низкая стоимость делают данный приёмник доступнее.

Разрешающая способность современной матрицы может быть от 47×47 пикселей до 1024×768 пикселей с шагом от 17 до 40 мкм [105, 106].

Исходя из требований изложенных выше и в предыдущей главе к приёмникам излучения, выбрана компактная неохлаждаемая микроболометрическая камера Gobi-384 с разрешением 384×288 пикселей, работающая в диапазоне от 8 до 14 мкм, которая может обнаруживать разницу температур до 0,05 °C в режиме реального времени (рисунок 3.5).



Рисунок 3.5 – Неохлаждаемая микроболометрическая камера Gobi-384

Технические характеристики Gobi-384:

- тип матрицы: неохлаждаемый микроболометр (α-Si);
- спектральный диапазон 8-14 мкм;
- разрешение 384×288 с шагом 25 мкм;
- частота кадров 50 Гц;
- температурная чувствительность 5 мкК при 30 °С;
- фокусное расстояние 18 мм;
- рабочий диапазон температур: от -40 °C до +50 °C.
3.1.3 Выбор вспомогательного оборудования

Для корректной обработки зарегистрированных спектральных изображений необходимо располагать данными о параметрах воздействующего лазерного излучения.

Для регистрации средней мощности импульсно-модулированного излучения перестраиваемого CO₂-лазера применяется измеритель мощности, который позволяет проводить измерения средней мощности непрерывного лазерного излучения до 10 Вт. Для получения точных измерений мощности лазерного излучения с малым временем отклика выбран измеритель мощности UP19K-30H-H5-D0 фирмы Gentec-EO. А управление и сбор информации с измерителя мощности реализовывается при помощи блока Maestro (рисунок 3.6), взаимодействие которого с ПК осуществляется посредством интерфейса USB.



Рисунок 3.6 – Измерительная головка UP19K-30H-H5-D0 и блок управления, сбора и отображения информации Maestro фирмы Gentec-EO

Основные характеристики измерителя мощности UP19K-30H-H5-D0:

- максимальная мощность непрерывного излучения 30 Вт;
- максимальная средняя мощность в течение 1 минуты 60 Вт;
- эффективная апертура 19 мм;
- спектральный диапазон 0,19...20 мкм;
- чувствительность 0,65 мВ/Вт;
- время нарастания 0,6 с.

Для регистрации спектра и определения длины волны лазерного излучения выбран ИК-Фурье спектрометр «Инфралюм ФТ-801» (рисунок 3.7), который

перекрывает необходимые длины волн ИК-области спектра и связан с ПК по USB-интерфейсу.



Рисунок 3.7 – ИК-Фурье спектрометр «Инфралюм ФТ-801»

Основные характеристики ИК-Фурье спектрометра «Инфралюм ФТ-801»:

– рабочий спектральный диапазон 2–12 мкм (5000 – 800 см⁻¹);

– спектральное разрешение 1-2 см⁻¹;

– пределы допускаемой составляющей систематической погрешности измерения волновых чисел не более $\pm 0,05$ см⁻¹;

– предел допускаемого значения среднего квадратического отклонения случайной составляющей погрешности результатов измерений волновых чисел не более ± 0.02 см⁻¹;

- интерфейс USB.

Для дистанционной регистрации спектра лазерного излучения Фурьеспектрометр «Инфралюм ФТ-801» был сопряжен с зеркальным телескопом (рисунок 3.8) посредством системы оптимального ввода излучения (рисунок 3.9).



Рисунок 3.8 – Внешний вид приёмника ИК-излучения (зеркальный телескоп)



Рисунок 3.9 – Внешний вид системы оптимального ввода излучения

Приемник ИК-излучения (телескоп) представляет собой систему из двух зеркал: сферического (основного) и плоского (отклоняющего), расположенного на оси перед основным под углом 45⁰. Телескоп установлен на металлической платформе, которая позиционируется относительно спектрометра при помощи серийного стыковочного узла.

3.1.4 Выбор материалов и элементов оптической системы

Для измерения параметров лазерного излучения (длины волны и мощности излучения) и увеличения площади сканирования объекта необходима оптическая система.

Необходимо выбрать материал оптических элементов, входящих в оптическую систему, пропускающий в ИК-области спектра. Для работы в ИК-области спектра применяют главным образом оптические элементы из Si, Ge, GaAs, InSb, BaF₂, CaF₂, ZnSe.

Селенид цинка (ZnSe) используется в качестве материала для производства оптических элементов, работающих в ИК-диапазоне. Материал характеризуется однородной структурой, высоким пропусканием в ИК-области и низкими внутренними потерями, связанными с поглощением и рассеянием. ZnSe наиболее часто применяется для изготовления компонентов для CO₂-лазеров (включая высокомощные) и широкополосных спектральных приборов, работающих в диапазоне от 0,6 до 19 мкм. Спектр пропускания пластины из ZnSe представлен на рисунке 3.10.



Рисунок 3.10 – Спектр пропускания пластины из ZnSe

Оптическая система должна состоять из двух светоделительных пластин из ZnSe (D 25x3 мм), предназначенных для разделения падающего лазерного излучения при измерении параметров лазерного излучения в процессе сканирования и выпукло-вогнутой линзы из ZnSe (f=49,93 мм, угол раскрытия $\alpha=30^{\circ}$) для расширения лазерного пучка.

Для обеспечения жесткого крепления оптических элементов выбраны держатели регулируемого диаметра марки 4LM42 (рисунок 3.11а) и универсальный держатель марки 4LM149 (рисунок 3.11б).



а – держатель регулируемого диаметра марки 4LM42; б – универсальный держатель марки 4LM149

Рисунок 3.11 – Держатели оптических элементов

Схема и внешний вид разработанного измерительного комплекса представлена на рисунке 3.12. Измерительная система собрана на оптических столах фирмы Standa.



а



а – схема; б – внешний вид Рисунок 3.12 – Измерительный комплекс

Излучение перестраиваемого ИК-лазера LCD-5WGT разделяется светоделительными пластинами с целью определения стабильности мощности излучения измерителем мощности и длины волны ИК-спектрометром. После этого излучение рассеивается оптическим элементом и подсвечивает объект со следами исследуемого вещества на поверхности. Подсвеченная лазерным излучением поверхность со следами вещества наблюдается при помощи тепловизионного приёмника Gobi-384 [107-109].

3.2 Настройка и автоматизация измерительного комплекса

Если в созданном измерительном комплексе все контрольно-измерительные операции по определению характеристик излучения СО₂-лазера, таких как длина волны излучения, мощность излучения и её стабильность во времени, а также установку этих параметров выполнять оператором вручную, то это существенно

78

увеличит время обследования объекта, а также внесет дополнительную погрешность в получаемые данные.

В связи с этим проведена работа по созданию ПО для автоматизации настройки и контроля технических характеристик CO₂-лазера. ПО разработано в среде программирования Python и состоит из трех модулей.

Первый модуль – модуль определения характеристик лазерного излучения перестраиваемого CO_2 -лазера, необходимый для непрерывного или периодического контроля корректной работы лазера в процессе проведения [110]. Управление оборудованием, измерений всем сбор И обработка измерительной информации осуществляется при помощи ПК. Схема интерфейсов подключения устройств к ПК приведена на рисунке 3.13.



Рисунок 3.13 – Схема интерфейсов подключения устройств к ПК

Для безошибочного детектирования следов ВВ необходимо полное соответствие характеристик лазерного источника паспортным данным. Индивидуальная длина волны излучения лазера регистрируется спектрометром порядка 40 с, что приводит к увеличению времени детектирования. Поэтому следует производить периодическую проверку работоспособности лазера,

результаты которой формируются в виде калибровочного файла с данными о каждой длине волны в отдельности.

Схема разработанного алгоритма автоматизированного управления измерительным комплексом представлена на рисунке 3.14.

Вначале осуществляется установка соединения с измерительным оборудованием, его первоначальная настройка и проверка работоспособности. Начальные параметры настройки оборудования приведены в таблице 3.1.

Основной рабочий цикл алгоритма состоит в последовательной перестройке длин волн излучения в пределах заданного рабочего диапазона длин волн за счет управления генерацией лазерного излучения. Одновременно с генерацией излучения выполняется проверка наличия излучения, измерение ее мощности, зависимости от различных значений коэффициента заполнения управляющего сигнала.

Оборудование Параметр		Значение	
	Виленгиала	Импульсы положительной	
	Вид сигнала	полярности	
ГСС-40	Частота повторения импульсов	2 кГц	
	Коэффициент заполнения	20.0/	
	импульсов	20 %	
Блок управления,	Длина волны измеряемого	10.6 ман	
сбора и отображения	излучения	10;0 MKM	
информации Maestro	Коррекция нулевого уровня сигнала		
ИК-Фурье			
спектрометр	строметр Регистрация опорного спектра ном ΦТ-801»		
«Инфралюм ФТ-801»			

Таблица 3.1 – Начальные параметры настройки оборудования

При получении подтверждения о наличии лазерного излучения в автоматическом режиме определяется коэффициент заполнения сигнала управления, мощность излучения, длина волны линий излучения.

После выполнения алгоритма, полученные настройки сохраняются в виде файла с калибровочными данными.

На данный модуль было получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015613911 (Приложение А).



Рисунок 3.14 – Алгоритм автоматизированного управления измерительным

комплексом

<u>Второй модуль</u> – модуль автоматической регистрации спектральных изображений подсвечиваемой поверхности [111]. Блок-схема разработанного алгоритма представлена на рисунке 3.15.



Рисунок 3.15 – Блок-схема алгоритма автоматической регистрации спектральных изображений на базе разработанного измерительного комплекса

На первом этапе происходит проверка подключения оборудования измерительного комплекса и настройка параметров необходимых для управления процессами генерации лазерного излучения и регистрации изображений. Для генерации управляющего сигнала на генераторе сигналов специальной формы (ГСС-40) автоматически выставляются необходимые параметры управления – это положительная полярность сигнала, частота 2 кГц, скважность 20 %.

Для уменьшения шума в получаемых микроболометрической камерой изображениях устанавливается усредняющий фильтр (количество кадров – 5). Далее выполняется перевод изображения в оттенки серого (Grayscale) с 16-битной глубиной цвета.

На втором этапе производится проверка наличия генерации лазерного излучения во всем рабочем диапазоне длин волн. Для каждой длины волны проводится проверка наличия лазерного излучения. В положительном случае (при наличии лазерного излучения) устанавливается заданная скважность управляющего сигнала, осуществляется перестройка на анализируемую длину волны, регистрируется значение мощности лазерного излучения и производится непосредственная регистрация тепловизионного изображения. Затем осуществляется регистрация фонового изображения для дальнейшего выделения области лазерного воздействия и получения разностных изображений. При отсутствии лазерного излучения происходит переход на следующий по очереди номер длины волны.

Завершающим этапом является очистка буфера обмена, отключение камеры и установка вала сервопривода в начальное положение.

Данный модуль позволил автоматизировать регистрацию спектральных изображений с последующим формированием гиперспектрального куба данных.

<u>Третий модуль</u> – Модуль обработки и интерпретации гиперспектральных данных с выдачей заключения о наличии следов ВВ на исследуемой поверхности [112, 113].

Для корректной идентификации ВВ была реализована предварительная обработка измерительной информации.

Локализация пятна лазерного излучения на поверхности позволяет сформировать область воздействия лазера и исключить из дальнейшей обработки излучение от объектов, находящихся вне зоны подсветки лазера. Для локализации пятна лазерного излучения необходимо получение на каждой длине волны разностных изображений «активного» и «пассивного» кадров с дальнейшей их пороговой обработкой. При этом в зависимости от длины волны форма и размеры пятна изменяются. Эти отличия обусловлены сложным процессом генерации и выделения конкретных линий лазерного излучения в перестраиваемых газовых лазерах. Для обеспечения корректного анализа необходимо определить единую область лазерного воздействия, получаемую за счёт выделения пересечения областей лазерного воздействия на всех длинах волн. Содержимое перекрывающихся областей со значениями больше порогового сохраняются для дальнейшей обработки.

Основным критерием выбора порогового значения, с которым будут сравниваться полученные разностные изображения, является значение собственных шумов камеры.

Для определения погрешности вносимой собственными шумами камеры была последовательно зарегистрирована серия изображений с закрытым объективом камеры. Произведено усреднение полученного массива изображений и вычислено среднеквадратическое отклонение (СКО) значений теплового шума для каждого пикселя. Максимальное значение СКО составило 150 единиц. Вносимая тепловыми шумами в спектральные изображения погрешность составила в среднем 0,5 %.

На рисунке 3.16 представлены бинарные изображения локализации лазерного пятна для области пересечения пятен лазерного излучения на всех (56) длинах волн с разными пороговыми значениями.

Как видно из рисунков форма и размеры зоны воздействия лазерного излучения значительно изменяются в зависимости от выбранного порогового значения. В качестве оптимальной величины порогового значения было выбрано СКО тепловых шумов камеры.

84



а – Пороговое значение<<СКО, б – Пороговое значение=СКО, б – Пороговое значение>>СКО

Рисунок 3.16 – Локализация пятна лазерного излучения

Основным фактором, ухудшающим спектральные изображения и усложняющим анализ спектральных данных, является спекл-шум, который представляет собой случайную интерференционную картину, образующуюся при облучении когерентным излучением шероховатой поверхности. На рисунке 3.17 представлено исходное зарегистрированное спектральное изображение, содержащее ярко выраженный спекл-шум.



Рисунок 3.17 – Исходное спектральное изображение

Для подавления спекл-шума, в регистрирующей тепловизионной камере было реализовано усреднение регистрируемых изображений по 5 кадрам.

Далее спекл-шум был подавлен медианной фильтрацией с областью сглаживания 8×8 пикселей. На рисунке 3.18 представлен результат расчета спектральной плотности мощности шума путем вычисления преобразования

85

Фурье для одной строки исходного изображения (W₁) и изображения после медианной фильтрации (W₂).

Расчет показал снижение высокочастотной составляющей мощности шума в 40 раз.



Рисунок 3.18 – Результат Фурье преобразования для одной строки изображения

Кроме спекл-шума, погрешность в зарегистрированные изображения вносит собственное и отражённое излучение от объектов, находящихся в области исследования. Для устранения этого влияния выполнено предварительное вычитание значений фона, снятого в отсутствии лазерного излучения.

При обнаружении ВВ одной из главных характеристик измерительного комплекса является экспрессность анализа (минимальное время обнаружения), что нехарактерно для методов субпиксельного анализа. Поэтому для обработки гиперспектральных данных, полученных при дистанционном обнаружении реального ВВ, были выбраны и реализованы два цельнопиксельных метода, а именно метод минимального расстояния и метод спектрального угла. Методы заключаются в сравнении исследуемой спектрограммы с эталонными, библиотека которых формируется заранее.

Дополнительно была реализована графическая индикация факта обнаружения следов BB на исследуемой поверхности.

Каждый из выше описанных модулей может выполняться независимо от других, как самостоятельная программа, так и в составе единого программного комплекса.

По результатам отладки и тестирования ПО весь процесс регистрации и обработки гиперспектральных данных с измерением характеристик, необходимых для анализа (мощность излучения, длина волны, коэффициент заполнения), выполняется в автоматическом режиме.

3.3 Подготовка тестовых образцов

В предыдущем разделе были выбраны анализируемые вещества и подложки, а также два способа создания тестовых образцов следовых количеств ВВ.

Образцы были изготовлены [114] двумя ранее выбранными методами – методом микропипетирования и взвешивания.

Для изготовления тестовых образцов из жидкой фазы методом микропипетирования использован набор механических дозаторов Proline Plus компании Sartorius общим объемом от 0,1 до 10 мкл. При этом BB предварительно были растворены в ацетонитриле ЧДА (ТУ 2636-092-44493179-04).

Другие тестовые образцы изготавливались методом взвешивания. Взвешивание проводилось на аналитических весах CAS CAUX 220 с ценой деления 0,0001 г, пределом допускаемой погрешности 0,001 г (класс точности I специальный по ГОСТ 53228-2008). Массу нанесённого анализируемого вещества определяли как разность масс образца до и после нанесения BB на подложку.

Был проведен анализ полученных образцов оптическим анализатором размеров частиц PIP 9.0 с диапазоном измерения от 0,5 до 3000 мкм. Была определена площадь следов октогена на поверхности образцов. Зная концентрацию октогена, диаметр капель и площадь следа, была вычислена поверхностная концентрация.

В качестве примера на рисунке 3.19 показана микрофотография следов

87

октогена (объём капли 0,5 мкл) на подложке из стекла, полученная после испарения ацетонитрила.



а – масштаб клетки изображения составляет 300 мкм; б – масштаб клетки
изображения составляет 112 мкм

Рисунок 3.19 – Микрофотография следов октогена после испарения ацетонитрила на подложке из стекла (объем капли 0,5 мкл).

Из рисунка 3.19 видно, что при нанесение октогена на подложку методом микропипетирования, исследуемое вещество распределяется по поверхности не равномерно, кристаллы октогена, за исключением нескольких крупных агломератов, имеют округлую форму.

В зависимости от типа подложки образцы разделены по группам.

Первая группа. Подложка – предметное стекло.

Внешний вид первой группы тестовых образцов на стекле приведен на рисунке 3.20. Образцы изготавливались способом микропипетирования.

В образце №1-1 следы октогена сформировались в виде трех колец, поверхностная концентрация которых составила 1,7, 1,2 и 0,85 мг/см² соответственно. Исследуемое вещество на подложку нанесено неравномерно, края следа содержат бо̀льшую концентрацию вещества. Следы гексогена в образце №1-2 представляют собой три пятна, поверхностная концентрация которых 1, 0,64 и 0,8 мг/см². Образец №1-3 представляет собой два сформировавшихся пятна ТНТ. Поверхностная концентрация пятен – 0,64 и 0,78 мг/см² соответственно. Образец №1-4 представляет четыре близко расположенных пятна ТЭНа. Поверхностная концентрация пятен – 1,1 мг/см², 1,3 мг/см², 0,85 мг/см² и 0,75 мг/см² соответственно. Образец №1-5 – равномерно распределенная по поверхности предметного стекла сахарная пудра со средней поверхностной концентрацией 2,6 мг/см². Образец №1-6 – распределенный до середины стекла Al₂O₃ со средней поверхностной концентрацией 1,9 мг/см². Образец №1-7 – распределенное по поверхности стекла мыло с несколькими крупными частицами. Средняя поверхностная концентрация без учета крупных частиц составила 2,1 мг/см².



а – образец №1-1(октоген); б – образец №1-2 (гексоген); в – образец №1-3(ТНТ); г – образец №1-4 (ТЭН); д – образец №1-5(сахарная пудра);

е – образец №1-6 (Al₂O₃); ж – образец №1-7 (мыло)

Рисунок 3.20 – Первая группа тестовых образцов на стекле

Вторая группа. Подложка – искусственная кожа.

Внешний вид второй группы тестовых образцов на подложке из искусственной кожи приведен на рисунке 3.21. Все образцы изготавливались способом взвешивания.



а – образец №2-1 (октоген); б – образец №2-2 (гексоген); в – образец №2-3(ТНТ);
г – образец №2-4 (ТЭН); д – образец №2-5(сахарная пудра); е – образец №2-6 (Al₂O₃); ж – образец №2-7 (мыло)

Рисунок 3.21 – Вторая группа тестовых образцов на подложке из искусственной кожи

Образец №2-1 (октоген) выполнен в виде буквы «Н». Поверхностная концентрация октогена на образце №2-1 составила 2,4 мг/см². Образец №2-2 (гексоген) выполнен в виде буквы «R». Поверхностная концентрация гексогена на образце №2-2 составила 2,85 мг/см². Образец №2-3 (ТНТ) выполнен в виде буквы «T». Поверхностная концентрация ТНТ на образце №2-3 составила 3,2 мг/см². Образец №2-4 (ТЭН) выполнен в виде буквы «Р». Поверхностная концентрация ТЭНа на образце №2-4 составила 2,3 мг/см². Образец №2-5 (сахарная пудра) выполнен в виде буквы «S». Поверхностная концентрация сахарной пудры на образце №2-5 составила 3 мг/см². Образец №2-6 (Al₂O₃) выполнен в виде буквы

«А». Поверхностная концентрация Al₂O₃ на образце №2-6 составила 2,5 мг/см². Образец №2-7 (мыло) выполнен в виде буквы «М». Поверхностная концентрация мыла на образце №2-7 составила 2 мг/см².

Третья группа. Подложка – фанера.

Внешний вид образцов изготовленных на подложке из фанеры представлен на рисунке 3.22. Все образцы изготавливались способом взвешивания.





Рисунок 3.22 – Третья группа тестовых образцов на подложке из фанеры

Изготовленные образцы были выполнены в виде букв, как и образцы второй группы.

Образец №3-1 (октоген) представляет собой букву «Н». Поверхностная концентрация октогена на образце №3-1 составила 2,6 мг/см². Образец №3-2 (гексоген) представляет собой букву «R». Поверхностная концентрация гексогена на образце №3-2 составила 3 мг/см². Образец №3-3 (ТНТ) представляет собой букву «Т». Поверхностная концентрация ТНТ на образце №3-3 составила 2,1 мг/см². Образец №3-4 (ТЭН) представляет собой букву «Р». Поверхностная концентрация ТЭНа на образце №3-4 составила 2,8 мг/см². Образец №3-5

(сахарная пудра) представляет собой букву «S». Поверхностная концентрация сахарной пудры на образце №3-5 составила 3,54 мг/см². Образец №3-6 (Al₂O₃) представляет собой букву «A». Поверхностная концентрация составила 2,57 мг/см². Образец №3-7 (мыло) представляет собой букву «М». Поверхностная концентрация составила 2,9 мг/см².

В качестве контрольных образцов, необходимых для выявления ложноположительных срабатываний, использовались чистые подложки из тех же материалов, что и подложки со следами ВВ. Образец №1 – стекло, образец №2 – искусственная кожа, образец №3 – фанера.

3.4 Методика выполнения исследований

Для проведения экспериментального исследования обнаружения и идентификации ВВ была разработана следующая методика выполнения измерений.

1. Предварительная проверка работоспособности оптико-электронного комплекса (установление рабочих длин волн и мощности лазерного излучения при помощи созданной программы автоматического определения характеристик CO₂-лазера).

2. Установка тестового образца в области воздействия лазерного излучения.

3. Регистрация гиперспектрального куба данных на 56 длинах волн лазерного излучения.

4. Обработка и анализ зарегистрированного спектрального гиперкуба.

5. Выдача результатов в виде зарегистрированного спектрального изображения с выделением цветом идентифицированного вида ВВ (белый цвет – октоген, красный – гексоген, зеленый – ТНТ, синий – ТЭН, фиолетовый – вид ВВ неопределен) и количеством занимаемых им пикселей.

6. Повторение действий с пункта 2 по пункт 5 для различных тестовых образцов.

Глава 4. Экспериментальные исследования и определение характеристик измерительного комплекса

4.1 Регистрация эталонных спектров ВВ

Для анализа гиперспектрального куба и выделения из него спектральной информации о BB необходимо наличие их эталонных спектров. Возможно выбрать спектры из любой доступной базы данных, но при этом необходимо выполнить обработку изображения, так чтобы получился точный коэффициент отражения, либо сделать свою библиотеку.

Была создана собственная библиотека ИК-спектров поглощения. Для этого в реальных условиях при помощи разработанного комплекса были зарегистрированы спектральные изображения содержащие данные о четырех ВВ: октогена, гексогена, ТНТ и ТЭНа. Все зарегистрированные данные прошли предварительную обработку, которая будет в последующем осуществляться и с тестовыми образцами. Для получения эталонного спектра в каждом полученном гиперкубе были выделены и усреднены 50 пикселей со спектрами обратного рассеяния от ВВ.

4.2 Результаты экспериментального исследования обнаружения и идентификации ВВ

Первоначально были определены характеристики перестраиваемого CO₂лазера LCD-5WGT. Результатом автоматизированных измерений является зависимость интенсивности излучения перестраиваемого лазера от длины волны. Пример зарегистрированных данных приведен на рисунке 4.1 [107].



Рисунок 4.1 – Зависимость относительной мощности лазерного излучения от длины волны

Также было выявлено полное соответствие длин волн паспортным данным. При этом из 75 длин волн приведенных в документации зарегистрировано 56 рабочих, на остальных длинах волн либо отсутствовала генерация излучения, либо мощность излучения была нестабильна. Результатом является файл с автоматически зарегистрированными фактическими данными (рисунок 4.2)

-	uni4new - I	DAIOKHUT	
Φai	йл Правка	Формат Вид	Справка
0	18178989	18178769	-220 -0.000130 0.000 100 Нет излучения
1	18242885	18243149	264 0.000160 0.000 100 Нет излучения
4	18265084	18265402	318 0.000200 0.000 100 Нет излучения
2	18455707	18455834	127 0.00050 0.000 100 net usnyyeenus 127 0.16550588 10 811 38 n.v.bnc:ments and Settings\Admin\PycharmProjects\Laser\Y34467 V000 IDX
5	18540246	18540764	518 0.67782354 10.787 30 D:\bocuments and Settings\Admin\PycharmProjects\Laser\x34463_v001.jdx
6	18596168	18596214	46 0.6796416 10.765 29 D:\Documents and Settings\Admin\PycharmProjects\Laser\x34463_y002.jdx
7	18684687	18684816	129 0.68209966 10.740 36 D:\Documents and Settings\Admin\PycharmProjects\Laser\x34463_y003.jdx
8	18767259	18767659	400 0.6400413 10.720 22 D:\bocuments and Settings\Admin\PycharmProjects\Laser\x34463_y004.jdx
10	18832527	18832885	338 0.60482002 10.696 19 D: DOCUMENTS and Settings Admin PycharmProjects (Laser (Lited)_00348.JDX
11	18975892	18910093	-153 0.5626442 10.070 30 0. DOCUMENTS and Settings Admin (Pycham Projects) aser/134463 v006 idv
12	19026731	19026860	129 0.5692458 10.632 20 D: Documents and Settings Vadmin VyCharmProjects Vaser V34463 v007.jdx
13	19101924	19101758	-166 0.58145554 10.611 18 D:\Documents and Settings\Admin\PycharmProjects\Laser\x34463_y008.jdx
14	19179521	19179728	207 0.57969056 10.592 18 D:\Documents and Settings\Admin\PýcharmProjects\Laser\11feb15_00340.JDX
15	19231697	19231336	-361 0.56889716 10.568 16 D:\Documents and Settings\Admin\PycharmProjects\Laser\11feb15_00341.JDX
16	19289954	19290175	221 0.54999906 10.555 21 D:\Documents and Settings\Admin\PycharmProjects\Laser\x34463_y009.jdx
1/ 10	19338319	19338100	-163 0.05151762 10.534 16 D: DOCUMENTS and Settings (Admin) PycharmProjects (Laser (Lited)_0052.JDX
19	19466829	19467013	184 0.636758 10.493 11 b: Documents and Settings Kaminer Pychammeniets Laser (X34463 v015.jdx
žő	19520234	19520479	245 0.4657817 0.000 100 D: Documents and Settings Admin PycharmProjects Laser x34463 v016 idx
21	19748964	19749299	335 0.000040 0.000 100 нет излучения
22	19788140	19787981	-159 -0.000170 0.000 100 Нет излучения
23	19892113	19892406	293 0.18915632 10.348 36 D:\Documents and Settings\Admin\PycharmProjects\Laser\X34486_y000.jdx
24	19959883	19959498	-385 U.41143/3 1U.333 33 D:\Documents and Settings\admin\PycharmProjects\Laser\x34463_y018.jdx
20	20030220 TAAA0\22	70030251	-255 0.40007616 10.316 27 D:\U0Cumments and Settings\Admin\PycharmProjects\Laser\X34465_VU9.10X
20	20039239	20039331	282 0.35004354 10.303 23 0.000000000 and Settings AdminityCriatine Dieus (Laser (X34405_0020.10X
28	20122210	20121755	-455 0.62040774 10.275 22 D:\Documents and Settings\Admin\PycharmProjects\Laser\X34463 V022.idx
29	20162116	20162477	361 0.66818442 10.258 26 D:\Documents and Settings\Admin\PycharmProjects\Laser\x34463_y023.jdx
30	20219315	20218583	-732 0.64458088 10.245 28 D:\Documents and Settings\Admin\PycharmProjects\Laser\x34463_y024.jdx
31	20259538	20260138	600 0.64408488 10.233 30 D: Documents and Settings Admin PycharmProjects Laser X34494_y000.JDX
32	20298335	20298046	-289 0.648/137 10.221 28 D: Documents and Settings Admin. PycharmProjects Laser (X34495_y000. JDX
33 24	20334040	20334114	74 0.03974138 10.208 33 D: DOCUMENTS and Settings Admin PycharmProjects (Laser (X34495_2000.3DX
35	20403512	20403841	329 0.7013574 10.184 35 D:\Documents and Settings\admin\cychammerojects\Laser\x34498 v000.10X
36	20441385	20442020	635 0.40493106 10.172 37 D:\Documents and Settings\Admin\PycharmProjects\Laser\x34499_v000.jdx
37	20478698	20478976	278 0.15420496 10.159 65 D:\Documents and Settings\Admin\PycharmProjects\Laser\x34500_y000.jDX
38	20526553	20525945	-608 0.000030 0.000 100 Нет излучения
39	20553371	20552941	-430 -0.0001/0 0.000 100 HeT M3/JY4EHMA
40 41	20366200	20300075	
42	21625880	21626094	214 -0.000120 0.000 100 Нет излучения
43	21679617	21679905	288 —0.000500 0.000 100 Нет излу́чения
44	21731913	21731587	-326 -0.000530 0.000 100 Нет излучения
45	21/8688/	21/8/228	341 -0.000330 0.000 100 Нет излучения
40 17	21830018	21830/83	107 -0.000040 0.000 100 негизуучения 780 0 130250 9 659 40 D:\Documents and Settings\@dmin\DycharmBrnierts\Laser\x34510 y000 1DY
48	21939995	21939691	-304 0.29136362 9.638 44 D:\bocuments and Settings\Admin\PycharmProjects\Laser\X34511 v000.idx
49	21980888	21980993	105 0.40689342 9.619 36 D:\Documents and Settings\Admin\PycharmProjects\Laser\x34512_y000.jDX
50	22020140	22019703	-437 0.42421564 9.605 35 D:\Documents and Settings\Admin\PycharmProjects\Laser\12feb15_00438.JDX
51	22075241	22075379	138 0.58338824 9.585 36 D:\Documents and Settings\Admin\PycharmProjects\Laser\x34514_y000.jdx
52	22129/29	22129/40	LL 0.00290732 9.372 27 D: UDCUMENTS and Settings Admin PycharmProjects Laser (X34515_U000.]dX
54	222100933	2220/29/	-606 0.6302836 9.536 90 D. Cocuments and Settings Valinty Yutanin Ojects (Lase (X34110_Y000, juk
55	22262467	22262606	139 0.61266494 9.520 32 D:\Documents and Setting\Admin\PycharmProjects\Laser\x34518 v000.JDX
56	22297804	22298130	326 0.55895808 9.504 31 D:\Documents and Settings\Admin\PycharmProjects\Laser\x34519_y000.jdx
57	22339601	22340240	639 0.47052732 9.487 34 D:\Documents and Settings\Admin\PycharmProjects\Laser\x34520_y000.jdx
58	22388079	22388355	276 0.3897155 9.470 31 D:/Documents and Settings/Admin/PycharmProjects/Laser/x34521_y000.JDX
59	22428543	22428832	289 0.13/42/04 9.459 51 D:\Documents and Settings\Admin\PycharmProjects\Laser\x34522_y000.jdx
61	22084281	22084092	2.0 11135194 9 340 31 D-bhocuments and Settings\Admin\PycharmProjects\Laser\Y34524 v000 IDX
62	22757922	22757828	-94 0.34892994 9.331 28 D:\Documents and Settings\Admin\PycharmProjects\Laser\x34525 \0000.idv
63	22793653	22794288	635 0.50369448 9.316 25 D:\bocuments and setting\Admin\PycharmProjects\Laser\X34526_V000.jdx
64	22821720	22821470	–250 0.6772899 9.306 25 D:\Documents and Settings\Admin\PycharmProjects\Laser\x34527_y000.jdx
65	22852792	22852525	-267 0.640636 9.297 25 D:\Documents and Settings\Admin\PyCharmProjects\Laser\x34528_y000.Jbx
66	22880972	22881567	595 U.65872996 9.284 27 D:Documents and Settings\Admin\PycharmProjects\Laser\x34529_y000.JDX
0/ 60	22903402	22903627	225 U. 69205650 9.272 SU D: \DOCUMENTS AND SETTINGS \Admin\PyCharmProjects\Laser\X34550_V000.]dX
69	22931370	22931001	251 0.0540504 9.219 24 0.700 comments and Settings/Admini/PycharmProjects/Laber/03451_9000.10X 160 0.68386334 9.249 5 D:\Documents and Settings/Admin/PycharmProjects/Laber/03456b15 00486 DDY
70	22991176	22991609	433 0.56103932 9.240 37 D:\bocuments and Settinds\Admin\PychammProlects\Laser\x34533 v000.idx
71	23018121	23017935	-186 0.42190762 9.231 32 D:\Documents and Settings\Admin\PycharmProjects\Laser\X34534_v000.jdx
72	23047645	23048047	402 0.1998653 9.218 39 D:\Documents and Settings\Admin\PycharmProjects\Laser\x34535_y000.jdx
73	23069667	23069692	25 0.000800 0.000 100 HET ИЗЛУЧЕНИЯ
74	23093015	23093237	242 0.00070 0.000 100 НЕТ ИЗЛУЧЕНИЯ _377 0.000750 0.000 100 НЕТ излучения
10	C 2 T 2 2 0 0 04		STE AFAAATAA TAA HEL NDANAEHNY

Рисунок 4.2 – Файл с автоматически зарегистрированными калибровочными

данными

На рисунке 4.3 представлены зарегистрированные длины волн, генерируемые лазером, и их сопоставление со спектрами поглощения выбранных ВВ.



Рисунок 4.3 – Сопоставление спектров поглощения BB с длинами волн генерации лазера LCD-5WGT

В соответствии с разработанным ПО регистрации спектральных данных формируется гиперкуб с 56 спектральными каналами в диапазоне от 9,18 мкм до 10,81 мкм. Время регистрации гиперкуба во всем диапазоне лазерного излучения составляет не более 5 мин.

На вероятность дистанционного обнаружения следов ВВ методом АФСИ влияют следующие факторы:

1) вид ВВ;

2) материал подложки;

3) дистанция обнаружения;

4) мощность лазерного излучения;

5) поверхностная концентрация ВВ.

Проведено нескольких серий экспериментов. Исследование работоспособности комплекса и определение его характеристик проводилось на 30 тестовых образцах. Для наработки статистических данных полный цикл исследования с каждым образцом выполнялся по 20 раз. Кроме того для оценки пространственного разрешения комплекса был проведен ряд опытов с

изменением пространственного положения образца относительно исследуемой сцены. [115]. Все тестовые образцы располагались на расстоянии 0,5 м от приёмника излучения.

Результаты обнаружения и идентификации ВВ выдаются в виде зарегистрированного тепловизионного изображения, в легенде которого указан тип найденного вещества. Тип ВВ дополнительно дублируется на изображении цветом (белый цвет –октоген, красный – гексоген, зеленый – ТНТ, синий – ТЭН, фиолетовый – ВВ обнаружено, но не идентифицировано).

При обработке гиперспектрального куба данных выбранными методами анализа (методом спектрального угла и методом минимального расстояния), а именно при сравнении полученных спектров с эталонным из библиотеки, было экспериментально подобрано пороговое значение, ниже которого вещество идентифицируется как взрывчатое. Установлено, что при отклонении полученного спектра от эталонного менее чем на 20 %, пиксель изображения принимается как ВВ и окрашивается в соответствующий цвет. В случае, если полученный спектр соответствует нескольким эталонным спектрам BB, то BB обнаружено, но не идентифицировано.

В первой серии была проанализирована первая группа тестовых образцов – следовые количества ВВ нанесены на подложки из стекла.

Результаты обнаружения тестового образца №1-1 (октоген) с использованием метода спектрального угла представлены на рисунке 4.4, а метода минимального расстояния – на рисунке 4.5.



а б в Рисунок 4.4 – Результат анализа тестового образца №1-1 методом спектрального угла

97



а б в Рисунок 4.5 – Результат анализа тестового образца №1-1 методом минимального расстояния

В данной серии опытов обнаружены правильно и идентифицированы все следы ВВ, попадающие в область воздействия лазерного излучения. Различие в количестве обнаруженных пикселей двумя методами составило менее 5 %.

Результаты обнаружения тестового образца №1-2 (гексоген) на стекле: метод спектрального угла – рисунок 4.6, метод минимального расстояния – рисунок 4.7.



а б в Рисунок 4.6 – Результат анализа тестового образца №1-2 методом спектрального угла

Все следы ВВ были обнаружены, но в некоторых случаях не идентифицированы, т.е. тип ВВ определен не был.



Рисунок 4.7 – Результат анализа тестового образца №1-2 методом минимального расстояния

Результаты анализа тестового образца №1-3 (ТНТ) на стекле: метод спектрального угла – рисунок 4.8, метод минимального расстояния – рисунок 4.9.



а б в Рисунок 4.8 – Результат анализа тестового образца №1-3 методом спектрального

угла



Рисунок 4.9 – Результат анализа тестового образца №1-3 методом минимального расстояния

Как видно из рисунков 4.8 и 4.9 тип ВВ определен корректно.

99

Результаты обнаружения тестового образца №1-4 (ТЭН) на стекле: метод спектрального угла – рисунок 4.10, метод минимального расстояния – рисунок 4.11.



а б в Рисунок 4.10 – Результат анализа тестового образца №1-4 методом спектрального

угла





Тип ВВ идентифицирован верно, однако не просматривается форма нанесенных следов. Возможно, такая идентификация связана с тем, что камера находилась под углом к регистрируемой поверхности.

Как следует из результатов экспериментов и анализа рисунков различный уровень яркости ПИ не повлияет на результаты детектирования. Это объясняется выполнением нормировки яркости пикселей всех спектральных изображений, входящих в гиперкуб данных.

Также были проведены экспериментальные исследования по идентификации следов веществ не обладающих взрывной способностью (образцы №1-5-№1-7). На рисунке 4.12 в качестве примера приведены точки отклонения

взрывобезопасных веществ для одной строки изображения (№106) от порогового значения эталона ТНТ. Красной линией показано пороговое значение.



Рисунок 4.12 – Отклонение от порогового значения эталона ТНТ для взрывобезопасных веществ на подложке из стекла (строка 106)

Во всех проведенных экспериментах с данными образцами ложноположительный результат отсутствовал.

Вторая серия экспериментов проводилась с тестовыми образцами, у которых следовые количества ВВ нанесены на подложки из искусственной кожи.

Результаты обнаружения октогена на образце №2-1 как методом спектрального угла, так и методом минимального расстояния представлены на рисунке 4.13.





 а – метод спектрального угла, б – метод минимального расстояния
Рисунок 4.13 – Результат анализа зарегистрированных тепловизионных изображений образца №2-1 Обоими методами обработки спектрального гиперкуба данных правильно локализовано местоположение следов и идентифицирован тип ВВ. Различие в количестве обнаруженных пикселей двумя методами составило менее 8 %.

Результаты обнаружения гексогена на образце №2-2 как методом спектрального угла, так и методом минимального расстояния представлены на рисунке 4.14.





а – метод спектрального угла, б – метод минимального расстояния
Рисунок 4.14 – Результат анализа зарегистрированных тепловизионных изображений образца №2-2

BB было обнаружено и идентифицировано, однако из рисунка видно наличие пикселей с ложным срабатыванием.

Результаты обнаружения ТНТ на образце №2-3 как методом спектрального угла, так и методом минимального расстояния представлены на рисунке 4.15.





 а – метод спектрального угла, б – метод минимального расстояния
Рисунок 4.15 – Результат анализа зарегистрированных тепловизионных изображений образца №2-3

Образец ТНТ был идентифицирован и локализован.

Результаты обнаружения ТЭНа на образце №2-4 с использованием двух методов анализа представлены на рисунке 4.16.



а – метод спектрального угла, б – метод минимального расстояния
Рисунок 4.16 – Результат анализа зарегистрированных тепловизионных изображений образца №2-4

Обоими методами локализовано местоположение, а идентификация типа BB не была произведена с нескольких случаях.

На рисунке 4.17 приведены полученные точки отклонения взрывобезопасных веществ (образцы №2-5-№2-7) для одной строки изображения от порогового значения эталона ТНТ.



Рисунок 4.17 – Отклонение от порогового значения эталона ТНТ для взрывобезопасных веществ на подложке из кожи (строка 106)

Как и в экспериментах с первой группой образцов (на стекле), результаты обработки образцов №2-5-№2-7 (взрывобезопасные вещества) не дали ложноположительных срабатываний.

Третья серия экспериментов проводилась с тестовыми образцами следовых количеств ВВ на подложке из фанеры.

Результаты обнаружения октогена на образце №3-1 как методом спектрального угла, так и методом минимального расстояния представлены на рисунке 4.18.



 а – метод спектрального угла, б – метод минимального расстояния
Рисунок 4.18 – Результат анализа зарегистрированных тепловизионных изображений образца №3-1

Обоими методами правильно локализовано местоположение и идентифицирован тип BB.

Результаты обнаружения гексогена на образце №3-2 как методом спектрального угла, так и методом минимального расстояния представлены на рисунке 4.19.





 а – метод спектрального угла, б – метод минимального расстояния
Рисунок 4.19 – Результат анализа зарегистрированных тепловизионных изображений образца №3-2 Местоположение образца №3-2 правильно локализовано, а тип ВВ не идентифицирован.

Результаты обнаружения ТНТ на образце №3-3 с использованием двух методов анализа представлены на рисунке 4.20.



а – метод спектрального угла, б – метод минимального расстояния
Рисунок 4.20 – Результат анализа зарегистрированных тепловизионных изображений образца №3-3

Образец ТНТ был идентифицирован и локализован с ложноотрицательными срабатываниями не более 15 %.

Результаты обнаружения ТЭНа на образце №3-4 с использованием двух методов анализа представлены на рисунке 4.21.



 а – метод спектрального угла, б – метод минимального расстояния
Рисунок 4.21 – Результат анализа зарегистрированных тепловизионных изображений образца №3-4

Обоими методами локализовано местоположение и идентифицирован тип BB.

В экспериментах с взрывобезопасными веществами в нескольких опытах образец №5 (сахарная пудра) был идентифицирован как ТНТ. На рисунке 4.22

приведены полученные точки отклонения взрывобезопасных веществ для одной строки изображения от порогового значения эталона ТНТ.



Рисунок 4.22 – Отклонение от порогового значения эталона ТНТ для взрывобезопасных веществ на подложке из кожи (строка 106)

Результаты обнаружения на образце №3-5 с использованием двух методов анализа представлены на рисунке 4.23.





а – метод спектрального угла, б – метод минимального расстояния
Рисунок 4.23 – Результат анализа зарегистрированных тепловизионных изображений образца №3-5

На остальных образцах №3-6 (Al₂O₃) и №3-7 (мыло) ложные тревоги отсутствовали.

В среднем различие в количестве обнаруженных пикселей двумя методами составило менее 10 %.

4.3 Определение характеристик измерительного комплекса и исследование возможности их улучшения

4.3.1 Определение вероятности обнаружения и идентификации ВВ

В первую очередь, комплексы по детектированию ВВ характеризуются вероятностью обнаружения.

На основе собранных статистических данных была составлена таблица 4.1 вероятности обнаружения.

Таблица 4.1 – Вероятность обнаружения ВВ на базе разработанного измерительного комплекса.

ВВ Подложка	Октоген, %	Гексоген, %	THT, %	ТЭН, %	Р _{ср. обнар.} , %
Стекло	95	90	95	95	94
Искусственная кожа	90	85	90	85	87
Фанера	90	85	85	80	85
Р _{ср. обнар.} , %	92	87	90	87	89

Самая высокая вероятность обнаружения ВВ на подложке из стекла, при этом самым обнаруживаемым ВВ является октоген. В среднем вероятность обнаружения ВВ методом АФСИ с использованием разработанного измерительного комплекса на основе перестраиваемого СО₂-лазера составила 89 %.

Также была составлена таблица 4.2 вероятности идентификации типа ВВ при установлении факта обнаружения на базе разработанного измерительного комплекса.

Лучше всех был идентифицирован октоген. В среднем вероятность идентификации в случае обнаружения составила 91 %.

ВВ Подложка	Октоген, %	Гексоген, %	THT, %	ТЭН, %	Р _{ср. идент.} , %
Стекло	100	89	100	95	96
Искусственная кожа	100	88	100	82	92
Фанера	94	82	88	81	86
Р _{ср. идент.} , %	98	86	96	86	91

Таблица 4.2 – Вероятность идентификации типа ВВ при установлении факта обнаружения на базе разработанного измерительного комплекса.

4.3.2 Определение предела обнаружения измерительного комплекса

В соответствии с формулами описанными в главе 2.2 был произведен теоретический расчет предела обнаружения. В работе [116] было выявлено, что наиболее оптимальным ВВ для обнаружения методом АФСИ является октоген (HMX). Поэтому для расчета предела обнаружения измерительного комплекса выбран октоген промышленного производства с плотностью 1,91 г/см³ и средним диаметром частиц 28 мкм. Отсюда, поверхностная концентрация октогена при 100 % заполнении поверхности в виде монослоя составляет 5,3 мг/см². Размах собственных шумов камеры, как было сказано выше, составил 150 единиц. Максимальное возможное значение регистрируемого пикселя для данной камеры составляет 65535 единиц.

Задаваясь отношением сигнал/шум можно получить зависимость минимально обнаруживаемой поверхностной концентрации вещества (рисунок 4.24).

Принимая значение SNR=10 для надёжного обнаружения сигнала в шумах можно определить минимальную обнаруживаемую поверхностную концентрацию $N_{MIN} = 0.2 \text{ мг/cm}^2$.


Рисунок 4.24 – Зависимость минимально обнаруживаемой концентрации вещества от отношения сигнал/шум

Экспериментально предел обнаружения исследовался на следах четырех BB [117]. Следовые количества на стеклянной подложке и подложке из искусственной кожи были нанесены методом микропипетирования с шагом 10 мкл. Нанести BB методом микропипетирования на подложку из фанеры не удалось из-за пористости материала. Поэтому для данных образцов применялся метод взвешивания.

Результаты экспериментов представлены в таблице 4.3. Эксперименты по обнаружению ВВ проводились на расстоянии от поверхности со следами ВВ до приемника излучения равном 0,5 м.

Таблица 4.3 – Предел обнаружения ВВ на базе разработанного измерительного комплекса.

BB	Октоген,	Гексоген,	THT,	ТЭН,	Итого,
Подложка	мг/см ²				
Стекло	0,2	0,44	0,35	0,5	0,37
Искусственная кожа	0,7	0,9	0,7	0,85	0,79
Фанера	1,4	1,3	1,2	1,5	1,35
Итого, мг/см ² :	0,77	0,88	0,75	0,95	0,84

109

Самый малый предел обнаружения октогена на подложке из стекла – 0,2 мг/см². В среднем предел обнаружения ВВ составил 0,84 мг/см².

4.3.3 Определение селективности обнаружения и идентификации ВВ

Другой важной характеристикой измерительного комплекса является селективность — способность достоверно различать химические вещества.

Проведены экспериментальные исследования по определению селективности измерительного комплекса. Вещества (октоген, гексоген, ТНТ, ТЭН, сахарная пудра, Al₂O₃, мыло) были одновременно нанесены на три вида подложек. Схемы нанесения веществ и их расположение в сцене, а также внешний вид полученных образцов, нанесенных на различные поверхности, представлены на рисунке 4.25.



а- схема нанесения веществ; б – подложка – стекло; в – подложка – искусственная кожа; г – подложка – фанера

Рисунок 4.25 – Схема нанесения и внешний вид образцов для проверки селективности измерительного комплекса

Результаты экспериментального исследования при обработке результатов детектирования двумя методами анализа представлены на рисунках 4.26 и 4.27.



а – подложка – стекло; б – подложка – искусственная кожа; в – подложка – фанера

Рисунок 4.26 – Результат анализа тестовых образцов методом спектрального угла



расстояния

Комплекс показал достаточно высокую селективность при классификации взрывчатых и взрывобезопасных веществ.

4.3.4 Определение дальности и времени обнаружения ВВ

Дальность обнаружения (дистанционность) – максимальное расстояние, на котором с помощью комплекса можно обнаружить и идентифицировать объект (цель) и определить его координаты с требуемой точностью.

Дальность обнаружения данного комплекса зависит от разрешения и чувствительности камеры. В связи с использованием попиксельного анализа гиперкуба достоверное обнаружение и идентификация вещества разработанным измерительным комплексом возможны в случае, если излучение отраженного от облучаемого вещества попадает как минимум на один пиксель зарегистрированного изображения.

На рисунке 4.28 представлен график зависимости минимальной площади объекта, проецируемого на один пиксель матрицы используемой микроболометрической камеры Gobi-384, от расстояния.



Рисунок 4.28 – Зависимость минимальной площади объекта, проецируемого на один пиксель матрицы, от расстояния до него

Для данной компоновки измерительной установки расстояние обнаружения составляет 0,5 м с минимальной площадью объекта, приходящегося на один пиксел, равной 1,3 мм².

Время обнаружения состоит из времени затрачиваемого на регистрацию данных гиперкуба и времени его обработки и анализа.

Время регистрации данных на всех 56 длинах волн составляет порядка 5 мин. Большая длительность регистрации тепловизионных изображений вызвана особенностью процессов перестройки используемого CO₂-лазера.

Время анализа данных гиперкуба на всех 56 длинах волн составляет около минуты.

4.3.5 Технические характеристики комплекса обнаружения следов ВВ

Проведенные экспериментальные исследования позволили конкретизировать основные технические характеристики, предъявляемые к измерительному комплексу в задачах дистанционного зондирования [118].

1. Вероятность обнаружения – параметр, характеризующий отношение числа верных срабатываний к общему числу проводимых регистраций.

В среднем вероятность обнаружения следов конденсированных BB разработанным оптико-электронным комплексом составила 89 %.

2. Вероятность идентификации – параметр, характеризующий отношение числа верных идентификаций к общему числу верных обнаружений.

В среднем вероятность идентификации следов конденсированных ВВ при установлении факта обнаружения составила 91 %.

3. Предел обнаружения – это минимальная поверхностная концентрация ВВ, которая при взаимодействии с лазерным излучением вызывает отклик, достаточный для регистрации и извлечения из него информации о наличии следов искомого вещества.

Предел обнаружения следов конденсированных ВВ на поверхности с помощью разработанного комплекса составляет: 0,2 мг/см² – для октогена; 0,9 мг/см² – для гексогена; 0,35 мг/см² – для ТНТ и 0,5 мг/см² – для ТЭНа.

4. Селективность (избирательность) – возможность определения какого-то вещества в присутствии других.

Комплекс показал высокую селективность при классификации взрывчатых и взрывобезопасных веществ.

5. Дальность обнаружения (дистанционность) – максимальное расстояние, на котором с помощью комплекса можно обнаружить и идентифицировать объект (цель) и определить его координаты с требуемой точностью.

Для данной компоновки измерительной установки расстояние обнаружения составляет 0,5 м с минимальной площадью объекта, приходящегося на один пиксел, равной 1,3 мм².

113

6. Время обнаружения (экспрессность).

Общее время обнаружения с использованием всех 56 длин волн не превышает 6 мин.

7. Уровень автоматизации комплекса.

Разработанный оптико-электронный комплекс автоматизирован и не требует в управлении особых умений, навыков и квалификации от персонала. Присутствует возможность добавления в библиотеку спектров других веществ, в том числе взрывчатых, опасных и наркотических, имеющих характерные спектральные особенности в исследуемом диапазоне.

4.3.6 Практические рекомендации по улучшению технических характеристик

комплекса

Вероятность и предел обнаружения во многом определяется разрешением ИК-камеры. В разработанном измерительном комплексе использовались камера разрешением 384×288 пикселей с шагом 25 мкм. При замене ИК-камеры на камеру другой модели с более высоким разрешением, например, 1024×768 с шагом 17 мкм позволит оценочно существенно повысить вероятность обнаружения до 99% и более или снизить предел обнаружения с 0,2 мг/см² до примерно 25 нг/см²,

В случае замены камеры на более высокочувствительную с лучшим соотношением сигнал/шум, например, за счет охлаждения, с эквивалентной шумовой разницей температур равной 5 мК можно достичь предела обнаружения 20 нг/см².

Увеличить дистанцию обнаружения возможно путем замены объектива (f =18 мм) микроболометрической камеры на длиннофокусный. Например, при одинаковом разрешении камеры, но с объективом f = 500 мм обнаружение объекта с площадью, приходящей на один пиксель равный 1,3 мм² будет возможно с расстояния около 20 м. Также увеличить расстояние приблизительно в 10 раз возможно с применением субпиксельных методов анализа гиперкуба данных при увеличении времени обнаружения.

В случае выбора нескольких длин волн для выявления пиков поглощения конкретного вещества время регистрации может быть уменьшено до 20 раз, а при использовании ККЛ или набора CO₂-лазеров, в том числе с фиксированными длинами волн излучения позволит сканировать исследуемую поверхность приблизительно в 60 раз быстрее.

Ускорить процесс в 20 раз возможно за счет использовании другого языка программирования, а также за счет использования более мощных компьютеров и оптимизации алгоритма.

Заключение

В результате выполнения работы решены следующие задачи:

1. Проведено теоретическое исследование применимости метода АФСИ для дистанционного обнаружения следов ВВ. Проанализирована и выбрана ИК рабочая область спектра в диапазоне 8-14 мкм. Исследовано взаимодействие лазерного излучения с тестовым образцом. На основе анализа методов обработки гиперспектральных данных выбраны два попиксельных метода – метод спектрального угла и метод минимального расстояния, заключающиеся в сравнении зарегистрированных и эталонных спектров.

2. На основе установленных оптимальных параметров (лазер – CO₂ с BЧ накачкой и диффузным охлаждением, мощностью до 10 Вт, и имеющий возможность программной перестройки длины волны в диапазоне 8-14 мкм, ИК-приёмник – неохлаждаемая микроболометрическая камера с матрицей на основе аморфного кремния) был произведен выбор оборудования и разработан измерительный комплекс на базе перестраиваемого CO₂-лазера и микроболометрической камеры с многоэлементной матрицей.

3. Выполнена автоматизация измерительного комплекса дистанционного обнаружения и идентификации следов ВВ, позволяющая управлять процессами генерации лазерного излучения на каждой длине волны с одновременным измерением его характеристик (коэффициент заполнения сигнала управления, мощность излучения, длина волны линий излучения), автоматически для каждой длины волны регистрировать спектральные изображения; а также обрабатывать гиперспектральные данные и выдавать заключение о наличии следов искомых веществ на исследуемой поверхности.

4. Проведена серия экспериментальных исследований по проверке работоспособности и определению характеристик разработанного комплекса на специально подготовленных образцах взрывчатых и взрывобезопасных веществ с известными параметрами. Установлено, что в среднем вероятность обнаружения ВВ составила 89 %, а предел обнаружения следов конденсированного ВВ

составил 0,84 мг/см². Комплекс показал высокую селективность при разделении взрывчатых от не взрывчатых веществ. Общее время обнаружения с использованием всех 56 длин волн не превышает 6 мин. Дистанция обнаружения – 0,5 м при минимальной площади объекта, приходящегося на один пиксель, равной 0,013 см².

5. Предложены рекомендации по возможности улучшения характеристик измерительного комплекса программно-алгоритмическими и аппаратурными способами (замена ИК-камеры на камеру с более высоким разрешением, с более высокой чувствительностью; использование более длиннофокусного объектива; снижения шумов камеры за счет охлаждения; использование квантово-каскадного лазера или набора СО₂-лазеров, в том числе с фиксированными длинами волн тестовых излучения; изготовления мишеней с меньшей поверхностной концентрацией; применение субпиксельных алгоритмов обработки; использование более мощных компьютеров; оптимизация алгоритма ПО).

Список сокращений и условных обозначений

АН – аммоний нитрат, аммиачная селитра;

АФСИ – метод активного формирования спектральных изображений;

ВВ – взрывчатое вещество;

ВУ – взрывное устройство;

ВЧ – высокочастотный;

ГНС – гексанитростильбен;

ДНБ – динитробензол;

ДНТ – динитротолуол;

ИК – инфракрасный;

КАРС – спектроскопия когерентного антистоксова комбинационного рассеяния света;

ККЛ – квантово-каскадный лазер;

КР – комбинационное рассеяние;

ЛИФ – лазерно-индуцированная флуоресценция;

ЛИЭС – лазерно-искровая эмиссионная спектроскопия;

НГЦ – нитроглицерин;

НТ – нитротолуол;

ПИ – приёмник излучения;

ПК – персональный компьютер;

ПО – программное обеспечение;

СКО – среднеквадратическое отклонение;

ТАТБ – триаминотринитробензол;

ТАТП – триацетона трипероксид;

ТНТ – тринитротолуол;

ТЭН – пентаэритриттетранитрат;

УФ – ультрафиолетовый;

ЭГДН – этиленгликольдинитрат.

Список литературы

1. Global Terrorism Database [Электронный ресурс] // – Режим доступа https://www.start.umd.edu/gtd/.

2. К.К. Андреев, А.Ф. Беляев Теория взрывчатых веществ. – М: Государственное научно-техническое издательство ОБОРОНГИЗ. – 1960. – 595 с.

3. R.K. Eckhoff, Explosion Hazards in the Process Industries, 2^{nd} edition. – Elsevier Inc. – 2016. – p. 576.

4. T.K. Ghosh, M.A. Prelas, D.S. Viswanath, S.K. Loyalka, Science and Technology of Terrorism and Counterterrorism. – CRC Press. – 2009. – p. 604.

5. National Research Council. Detection of Explosives for Commercial Aviation Security. – DC: The National Academies Press. –1993. – p. 108.

6. Л.А. Скворцов Лазерные методы дистанционного обнаружения химических соединений на поверхности тел. – М: Техносфера. – 2015. – 208 с.

7. S. Wallin, A. Pettersson, H. Östmark, A. Hobro, Laser-based standoff detection of explosives: a critical review // Anal. Bional. Chem. – 2009. – pp. 259-274.

8. Pellegrino P.M., Holthoff E.L., Farrell M.E. Laser-Based Optical Detection of Explosives // CRC Press. – 2015. – p. 381.

9. Е.С. Петренко Средства поиска взрывоопасных предметов по косвенным признакам // Специальная техника. – №2. – 2002. – с. 28-34.

Z. Bielecki, J. Janucki, A. Kawalec, J. Mikolajczyk, N. Palka, M. Pasternak,
 T. Pustelny, T. Stacewicz, J. Wojtas Sensors and System for the Detection of Explosive
 Devices – An Overview . – Metrol. Meas. Syst. – vol. XIX. – no. 1 – 2012. – pp 3-28.

11. Борейшо А. А., Страхов С. Ю., Коновалов К. А., Романов А. Ю., Дружинин С. Л., Перхина Е. В. Практическая реализация технологии абсорбционной спектроскопии в приборе для обнаружения следовых количеств взрывчатых веществ на предметах // Специальная техника. – № 2. – 2009. – С. 10– 14.

 H. Östmark, S. Wallin, H.G. Ang Vapor Pressure of Explosives: A Critical Review. – Propellants Explos. Pyrotech. – 37. – 2012. – pp. 12-23. 13. Петренко Е.С. Некоторые особенности поиска взрывчатых веществ и взрывоопасных предметов с помощью собак, газоаналитических приборов и химических экспресс-тестов // Специальная техника. 2002. № 4.

14. S. Desilets, N. Ho, P. Mathieu, J.R. Simard, E. Puckrin, J.M. Theriault, H. Lavoie, F. Theberge, F. Babin, D. Gay, R. Forest, J. Maheux, G. Roy, M. Chateauneuf, Standoff detection of explosives, a challenging approach for optical technologies // Micro- and Nanotechnology Sensors, Systems, and Applications III, Proc. of SPIE Vol. 8031, 80312C. – 2011. – pp. 1-6.

15. Краткая химическая энциклопедия. Под ред. И. Л. Кнунянца, Т. 2: Ж — Малоновый эфир. — 1963. — 1088 стб.: ил.

16. Dogariu A., Pidwerbetsky A. Coherent anti-Stokes Raman spectroscopy for detecting explosives in real-time. – Proc. of SPIE, Vol. 8358, 83580R (2012), pp. 1–8.

17. E.Ceco, H. Önnerud, D. Menning, J.L. Gilljam, P. Baath, H. Östmark,
Stand-off imaging Raman spectroscopy for forensic analysis of post-blast scenes –
Trace detection of ammonium nitrate and 2,4,6-trinitrotoluene. – Chemical, Biological,
Radiological, Nuclear, and Explosives Sensing XV, *Proc. of SPIE*, Vol. 9073, 90730G.
– 2014. – pp. 1-9.

18. Zachhuber B., Ramer G., Horbo A., Lendl B., Stand-off Raman specroscopy of explosives, Proc. of SPIE, Vol. 7838, 78380F (2010), p. 1-10.

19. Maskall G., Bonthron S., Crawford D., Spatially offset Raman spectroscopy for explosives detection through difficult (opaque) containers, Proc. of SPIE, Vol. 8901, 890104 (2013), p. 1-9.

20. Tsiminis G., Chu F., Warren-Smith S. C., Spooner N.A., Monro T.M. Identification and quantification of Explosives in nanolitre solution volumes by Raman spectroscopy in suspended core optical fibers, Sensors 13 (2013), p. 13163-13177.

21. Кнунянц И. Л. Химическая энциклопедия / Под ред. И.Л. Кнунянца. М.: Советская энциклопедия, (1988).

22. Dogariu A., Pidwerbetsky A. Coherent anti-Stokes Raman spectroscopy for detecting explosives in real-time. – Proc. of SPIE, Vol. 8358, 83580R (2012), pp. 1–8.

23. Katz O., Natan A., Silberberg Y., Rosenwaks S. Standoff detection of trace amounts of solids by nonlinear Raman spectroscopy using shaped femtosecond pulses // Appl. Phys. Lett. 2008. V. 92, N 17. P. 171116.

24. Vieitez M. O., Hedberg J., Launila O., Berg L. E. Elemental analysis of steel scrap metals and minerals by laser-induced breakdown spectroscopy. – Spectrochim. Acta Part B 60, (2005), pp. 920 – 925

25. Rosenwasser S., Asimellis G., Bromley B., Hazlett R., Martin J., Pearce T., Zigler A. Development of a method for automated quantitative analysis of ores using LIBS. – Spectrochim. Acta Part B 56, (2001), pp. 707–714.

26. Solo-Gabriele H. M., Townsend T. GD. W., Moskal T. M., Hosein N., Jambeck J., Jacobi G., Evaluation of XRF and LIBS technologies for on-line sorting of CCA-treated wood waste. – Waste Management 24, (2004), pp. 413-424.

27. Лабутин Т.А., Попов А.М., Зоров Н.Б. Лазерно-искровая эмиссионная спектроскопия – современный экспресс метод дистанционного контроля материалов. Сборник тезисов Выставки инновационных проектов Химического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова. – Москва, т. 23, (2009), с. 35–36.

28. Lazic V., Palucci A., Jovicevic S., Carpanese M., Poggi C., Buono E. Detection of explosives at trace levels by Laser Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) – Proc. of SPIE Vol. 7665, 76650V (2010), pp. 1-9.

29. Sreedhar S., Kumar M. A., Kumar G. M., Kiran P. P., Tewari S. P., Rao S. V. Laser Induced Breakdown Spectroscopy of RDX and HMX with nanosecond, picosecond, and femtosecond pulses – Proc. of SPIE Vol. 7665, 76650T (2010), pp. 1-12.

30. Lucia Frank C. De, Jr., Gottfried J. L., Miziolek A. W. Evaluation of femtosecond laser-induced breakdown spectroscopy for explosive residue detection – OPTICS EXPRESS, Vol. 17, No. 2, (2009), pp. 419-425.

31. Huang H., Yang Lih-Mei, Liu J. Femtosecond fiber-laser-based laserinduced breakdown spectroscopy – Proc. of SPIE Vol. 8358, 835817 (2012), pp. 1–9.

32. C. López-Moreno, S. Palanco, F: De Lucia, Jr., A.W. Miziolek, J. Rose, R.A. Walters, A. Whitehouse, J.J. Laserna. Test of a stand-off laser-induced breakdown

spectroscopy sensor for the detection of explosive residues on solid surfaces. – J. Anal. At.Spectrom. 21, (2006), pp. 55-60.

33. Palanco S., López-Moreno C., Laserna J.J. Design, construction and assessment of a field-deployable laser induced breakdown spectrometer for remote elemental sensing", Spectrochimica Acta Part B 61, (2006), pp. 88-95.

34. Wynn C. M.; Palmacci S.; Kunz R. R.; Rothschild M. A Novel Method for Remotely Detecting Trace Explosives. – Lincoln Laboratory Journal, 17, №2, (2008), pp. 27–39.

35. Скворцов Л.А. Лазерные методы обнаружения следов взрывчатых
веществ на поверхностях удаленных объектов. – Квантовая электроника. – 42 (1).
– 2012. – с. 1-11.

36. Wynn C. M.; Palmacci S.; Kunz R. R.; Rothschild M. A Novel Method for Remotely Detecting Trace Explosives. – Lincoln Laboratory Journal, 17, №2, (2008), pp. 27–39.

37. Бобровников С.М., Горлов Е.В. Лидарный метод обнаружения паров взрывчатых веществ в атмосфере // Оптика атмосф. и океана. – Т. 23. – № 12. – 2010. – с. 1055–1061.

38. Wynn C.M., Palmacci S., Kunz R.R., Aernecke M. Noncontact optical detection of explosive particles via photodissociation followed by laser-induced fluorescence // Opt. Express. 2011. V. 19, N 19. P. 18671–18677.

39. Bauer C., Geiser P., Burgmeier J., Holl G., Schade W. Pulsed laser surface fragmentation and mid-infrared laser spectroscopy for remote detection of explosives. – Appl. Phys. B, 85 (2006), pp. 251–256.

40. Kendziora C. A., Furstenberg R., Papantonakis M., Nguyen V., Stepnowski J., McGill R. A. Advances in stand-off detection of trace explosives by infrared photothermal imaging. – Proc. of SPIE, Vol. 7664, (2010), pp. 1–12.

41. Mukherjee A., Porten S., Patel C.K.N. Standoff detection of explosive substances at distances of up to 150 m // Appl. Opt. 2010. V. 49. N 11. P. 2072–2078.

42. Morales-Rodrígueza M. E., Senesaca L.Thundat T., Rafailov M. K., Datskos P. G. Standoff imaging of chemicals using IR spectroscopy. – Proc. of SPIE, Vol. 8031, 80312D (2010), pp. 1–8.

43. Зимичев Е.А., Казанский Н.Л., Серафимович П.Г. Пространственная классификация гиперспектральных изображений с использование метода кластеризации k-means++ // Компьютерная оптика. – том 38. – №2. – 2014. – с. 281-286.

44. Л.А. Скворцов Дистанционное обнаружения взрывчатых веществ с помощью методов активного формирования спектральных изображений / Квантовая электроника, 41, №12 (2011). – с.1051-1060.

45. Ruxton K., Robertson G., Miller W., Malcolm G.P.A., Maker G.T. Midinfrared hyperspectral imaging for the detection of explosive compounds. – Proc. of SPIE Vol. 8546, 85460V (2012), pp. 1-9.

46. Bernacki B. E., Blake T.A., Mendoza A., Johnson T.J. Visible hyperspectral imaging for standoff detection of explosives on surfaces. – Proc. of SPIE Vol. 7838, 78380C (2010), pp. 1-7.

47. Hempler N., Nicholls J., Malcolm G. Active hyperspectral sensing and imaging for remote spectroscopy applications (2013) http://www.laserfocusworld.com/articles/print/volume-49/issue-11/features/spectralimaging-active-hyperspectral-sensing-and-imaging-for-remote-spectroscopyapplications.html.

48. Вейко В.П., Либенсон М.Н., Червяков Г.Г., Яковлев Е.Б. Взаимодействие лазерного излучения с веществом. Силовая оптика. / Под ред. В.И. Конова. – М.:ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 312 с.

49. Спектроскопия рассеянного излучения: учеб. Пособие / П.Е. Тимченко, Е.В. Тимченко. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2015. –88с.

50. Borg Rodney A.J. Diffuse reflectance spectra of energetic material – DSTO Aeronautical and maritime research laboratory (1994), pp. 1-15.

51. Федоров Б.Ф. Лазерные приборы и системы летательных аппаратов. –
 М.: Машиностроение, – 1979. –268 с.

52. Л. Беллами Инфракрасные спектры сложных молекул / перевод с англ.
В.М. Акимова, Ю.А. Пентина, Э.Г. Тетерина, Издательство иностранной литературы, Москва. – 1963. – 590 с.

53. А.Н. Зайдель, В.К. Прокофьев, С.М. Райский Таблицы спектральных линий / Москва: Государственное издательство технико-теоретической литературы. – 1952. – 561 с.

54. C. K. N. Patel, Laser photoacoustic spectroscopy helps fight terrorism: High sensitivity detection of chemical warfare agent and explosives, – Eur. Phys. J. Special Topics. – 153. – 2008. – pp. 1–18.

55. Е.А.Шахно. Физические основы применения лазеров в медицине. – СПб: НИУ ИТМО, 2012. – 129 с.

56. Максименко Е.В. Оценка эффективности дистанционного обнаружения следов взрывчатых веществ методом активного формирования спектральных изображений с использованием перестраиваемого CO₂ лазера // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2014. – Т. 57. – № 5. – С. 26-31.

57. Павленко А.А., Максименко Е.В., Чернышова Л.В., Диденко А.В. Определение порога чувствительности комплекса дистанционного обнаружения следов взрывчатых веществ // Ползуновский вестник. – 2016. – №4. – Т. 1. – С.68-72.

58. T.J. Janssen Explosive Material: Classification, Composition, and Properties // Nova Science Publishers, Inc.; UK ed. – 2010. – p. 292.

59. Existing and potential standoff explosives detection techniques. Committee of the Review Existing and Potential Standoff Explosives Detection Techniques. Washington DC: The National Academies Press. 2004. 148 p.

60. GlobalSecurity.org. Reliable Security Information [Электронный ресурс]. – URL: http://www.globalsecurity.org.

61. F. Fuchs, S. Hugger, M. Kinzer, R. Aidam, W. Bronner, R. Lösch, Q. Yang Imaging standoff detection of explosives using widely tunable midinfrared quantum cascade lasers // Optical Engineering. – 49 (11). – 111127. – 2010. – pp. 1-8.

62. J.R. Verkouteren, J.L. Coleman, I. Cho, Automated Mapping of Explosives
Particles in Composition C-4 Fingerprints // J Forensic Sci. – 55(2). – 2010. – pp. 334– 340.

63. Test sieving manual present by Endecotts Ltd, 9 Lombard Road, London SW19 3TZ England. – Режим доступа:

https://www.endecotts.com/dltmp/www/55d75b18-261c-4582-8a67-4f7ebc282b86-2f1065996953/test_sieving_manual_en.pdf.

64. V. Nguyen; M. Papantonakis; R. Furstenberg; C. Kendziora; R. Andrew McGill "Real World" Particulate Explosives Test Coupons for Optical Detection Application // Proc. of SPIE. – Vol. 8710, –2013. – pp. 1-11.

65. J.D. Suter, B. Bernacki, M.C. Phillips, Spectral and angular dependence of mid-infrared diffuse scattering from explosives residues for standoff detection using external cavity quantum cascade lasers // Appl. Phys. B. -108. -2012. - pp. 965-974.

66. K. Yasuda, M. Woodka, M. Polcha, D. Pinkham, Reproducible Deposition of Trace Explosives onto Surfaces for Test Standards Generation // Science and Technology Division. – 2010. – pp. 1-12.

67. В.Н. Хмелев, Ультразвуковое распыление жидкостей: монография / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, А.В. Шалунова; Алт. гос. техн. ун-т, БТИ. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2010. – 272 с.

68. В.Н. Хмелёв Ультразвуковые распылители наноматериалов / В.Н. Хмелёв, А.В. Шалунов, М.В. Хмелев, А.В. Шалунова, Д.В. Генне // Южно-Сибирский научный вестник. – 2012. – № 1. – С. 193–197.

69. D. Wallace, P. Cooley, B. Antohe, D. Hayes, T. Chen, Proceedings, 20th workshop on Micromachining, Micromechanics and Microsystems (MME 09), September 20-22, 2009, Toulouse.

70. Holthoff E.L., Farrell M.E., Pellegrino P.M. Standardized Sample Preparation Using a Drop-on-Demand Printing Platform, Sensors (Basel), 13(5), pp. 5814–5825 (2013).

71. D. Wallace, B. Antohe, Ink-jet Technology for Trace Vapor Detector Development and Calibration // PDHS S&T/EXD Advanced Trace Detection Industry Day, July 25-26. – 2013. – Washington DC.

72. B.V. Antohe, D. J. Hayes, D.W. Taylor, D.B. Wallace, M.E. Grove, M. Christison, IEEE International Conference on Technologies for Homeland Security, May 11-13. – 2008. – Boston, MA.

73. R.M. Verkouteren J.R. Verkouteren, Inkjet Metrology: High-Accuracy Mass Measurements of Microdroplets Produced by a Drop-on-Demand Dis-penser, Anal. Chem. 81(20) 8577–8584 (2009).

74. E. Ceco, M. Nordberg, A. Ehlerding, H. Östmark, The detection limit of imaging Raman spectroscopy for 2,4,6-TNT, 2,4- DNT and RDX // Proc. of SPIE Vol. 8546, 854604. – 2012. – pp. 1-9.

75. Nordberg M., Ceco E., Wallin S., Östmark H., Detection limit of imaging Raman spectroscopy, Proc. of SPIE Vol. 8357, 83571H (2012), pp. 1-11.

76. J. Almirall, P. Diaz-Guerra, H. Holness, K. Furton, Field Detection of Drugs and Explosives by SPME-IMS // Florida International University, Award No: 2006-DN-BX-K027.

77. O.A. Nafday, R. Pitchimani, B.L. Weeks, J. Haaheim, Patterning High Explosives at the Nanoscale // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. – 31(5). – 2006. – pp. 376–381.

78. Абросимов А.В., Черепанов А.С. Обработка гиперспектральных изображений в ПК ENVI // Геопрофи. – 2007. – №2. – С.55–57.

79. Болотова Ю.А., Спицын В.Г., Рудометкина М.Н. Распознавание автомобильных номеров на основе метода связных компонент и иерархической временной сети // Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39, №2. – С. 275–280.

80. Мищенко В.А., Коробкин А.А. Предварительная обработка изображения в процессе распознавания текста // Фундаментальные исследования.
 2011. – №8. – С. 652–655.

81. Магурин В.Г., Тарлыков В.А. Когерентная оптика. Учебное пособие по курсу «Когерентная и нелинейная оптика». – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2006. – 122 с.

 P.Z. Bernardino Alves, H. Schiabel, Comparison of Techniques for Speckle Noise Reduction in Breast Ultrasound Images // IFMBE Proceedings 25/II. – 2009. – pp. 569-571.

83. Костров В.В., Антонов А.Ю. Оценка эффективности нескольких локальных фильтров подавления спекл-шума на радиоизображениях // Материалы всерос. науч. конф. «V Всероссийские Армандовские чтения». – Муром, 2015. – С. 105–109.

84. J.L. Mateo, A. Fernandez-Caballero Finding out general tendencies in speckle noise reduction in ultrasound imsges // Expert Systems with Applications. – 36. – 2009. – p. 7786-7797.

85. J. F. Richards, X. Jia, Remote Sensing Digital Image Analysis. – 4th ed. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg. – 2006. – p. 454.

86. Ritika, S. Kaur, Contrast Enhancement Techniques for Images – A Visual Analysis // International Journal of Computer Application. – 64 (17). – 2013. – p. 20-25.

87. Горьков А.Г. Метод, алгоритмы и устройства фрагментарного сжатия видеопотока [Текст]: дис. канд. тех. наук: 05.13.05: защищена 27.06.14 / Горьков Алексей Геннадьевич. – М., 2014. – 139 с. – Библиогр.: с.125-130 – 04201458271.

88. Юинг Г. Инструментальные методы химического анализа. Пер. с англ.
5 изд. — М.: Мир. – 1989. —608 с.

89. P.S. Thenkabail, J.G. Lyon, A. Huete, Hiperspectral remote sensing of vegetation. – CRC Press Taylor & Francis Group. – 2012. – p. 765.

90. Е.В. Кочуб, А.А. Топаз Анализ методов обработки материалов дистанционного зондирования Земли // Вестник полоцкого государственного университета. – №16. – 2012. – с.132-140.

91. Шумская А.О. Оценка эффективности метрик расстояния Евклида и расстояния Махаланобиса в задачах идентификации происхождения текста // Доклады ТУСУРа. –2013. – №3 (29). – С. 141–145.

92. LU-Xingchang, LIU-Xianlin A study on information extraction from hyper spectral image based on samc&epv // Proceedings of the ISPRS Commission VII Symposium 'Remote Sensing: From Pixels to Processes' – Vol. XXXVI, Part 7, 2006.

93. M. Li, Y. Lu, B. He, Array Signal Processing for Maximum Likelihood Direction-of-Arrival Ectimation // Journal of Electrical & Electronic Systems. – 3 (1). – 2013. – pp. 1–5.

94. J. W. Klatt, Error Characterization of Spectral Products Using a Factorial Designed Experiment. – Rochester Institute of Technology. – 2001. – p. 138.

95. R. Jain, R. Sharma, Mapping of Mineral Zones using the Spectral Feature Fitting Method in Jahazpur belt, Rajasthan, India // International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). -5(1). -2018. -pp. 562-567.

96. Q. Yang, F. Fuchs, and J. Wagner, Quantum cascade lasers (QCL) for active hyperspectral imaging // Advanced Optical Technologies. – 3(2). – 2014. – pp. 141–150.

97. J.S. Li, B. Yu, H. Fischer, W. Chen, A.P. Yalin Contributed Review: Quantum cascade laser based photoacoustic detection of explosives // Review of Scientific Instruments. -86. -031501. -2015. - pp. 1-8.

98. Газовые лазеры: Пер. с англ. / под ред. И. Мак-Даниеля, У. Нигэна. –
М.: Мир. – 1986. – с. 552.

99. Ю.П. Райзер Мощные электрозарядные лазеры на углекислом газе // Соросовский образовательный журнал. – № 8. – 1997. – с. 99-104.

100. М.Л. Бараночников Приемники и детекторы излучений. Справочник // М.: ДМК-Пресс. – 2017. – с. 1041.

101. G.H. Rieke Detection of light: from the ultraviolet to the submillimeter. -2^{nd} ed. -2003. - p. 365.

102. Kohonen, T. Self-Organizing Maps / T. Kohonen, M.R. Schroeder, T. S. Huang, S.O. Maps // (Third Extended Edition), New York, 2001. – 501 P.

103. Xu, R. Survey of clustering algorithms / R. Xu, D. Wunsch // IEEE Transactions, Neural Networks. – 2005. – Vol. 16. – No. 3. – P. 645-678

104. Petropoulos G.P., Vadrevu K.Pr., Xanthopoulos G., Karantounias G, Scholze M. A Comparison of Spectral Angle Mapper and Artificial Neural Network Classifiers Combined with Landsat TM Imagery Analysis for Obtaining Burnt Area Mapping // Sensors. – 2010. –№10. –P. 1967-1985.

105. R.B. Smith, Introduction to Hyperspectral Imaging // MicroImages, Inc. – 2012. – p. 24.

106. Zeng Y., Schaepman M.E., Wu B., Clevers J.G.P.W., Bregt A.K. Using linear spectral unmixing of high spatial resolution and hyperspectral data for geometric-optical modelling. // In proceedings of the 10th International Symposium on Physical Measurements and Spectral Signatures in Remote Sensing. – Davos, Switzerland, 2007.

107. Павленко А.А., Максименко Е.В., Чернышова Л.В. Дистанционное обнаружение следов октогена методом активного формирования спектральных изображений с использованием перестраиваемого СО₂-лазера // Квантовая электроника. – 2014. – Т. 44, № 4. - С. 383-386.

108. Максименко Е.В. Чернышова Л.В. Экспериментальная установка для исследования характеристик метода активного формирования спектральных изображений с использованием перестраиваемого CO₂-лазера // Южно-Сибирский научный вестник. – 2014. – № 1. – С. 9–12.

109. Максименко Е.В., Чернышова Л.В. Дистанционное обнаружение следовых количеств взрывчатых веществ методом активного формирования спектральных изображений // Южно-Сибирский научный вестник. – 2014. – № 2. – С. 64–66.

110. Павленко А.А. , Максименко Е.В. , Чернышова Л.В. Автоматизированная система определения характеристик излучения перестраиваемых СО₂-лазеров // Датчики и Системы – 2015. – №8(195), С.33-37.

111. Maksimenko E.V., Chernyshova L.V. Automated System For Registration of Spectral Images Set // 16th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices «EDM 2015»: Conference Proceedings, Erlagol, Altai, 29 June – 3 July 2015. – Novosibirsk: NSTU publishing office, IEEE, 2015. – P. 337-339.

112. Maksimenko E.V., Chernyshova L.V., Didenko A.V. Applying of Methods of Processing of Hyperspectral Data for Identification of Traces of Explosives // 17th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron

Devices «EDM 2016»: Conference Proceedings, Erlagol, Altai, 30 June – 4 July 2016. – Novosibirsk: NSTU publishing office, IEEE, 2016. – P. 358-363.

113. Кузовникова Л.В. Анализ гиперспектральных данных для идентификации следов остогена. / Л.В. Кузовникова, Е.В. Максименко, А.А. Павленко, А.В. Диденко // Южно-Сибирский научный вестник. – 2017. – № 2. – С. 24–28.

114. Максименко Е.В., Чернышова Л.В., Диденко А.В. Создание тестовых образцов для исследования характеристик комплекса дистанционного обнаружения следов взрывчатых веществ // Ползуновский вестник. – 2015. – №4. – Т. 2. – С.140-144.

115. L. Kuzovnikova, E. Maksimenko, A. Pavlenko and A. Didenko Automated optical-electronic complex for detection of traces of explosives, The 6th International Symposium on Energetic Materials and their Application, Tohoku University, Sendai, Japan, 6-10 November, 2017, p. 154.

116. Максименко Е.В. Оценка эффективности дистанционного обнаружения следов взрывчатых веществ методом активного формирования спектральных изображений с использованием перестраиваемого CO₂-лазера // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2014. – Т. 57. – № 5. – С. 26-31.

117. Павленко А.А. Определение порога чувствительности комплекса дистанционного обнаружения следов взрывчатых веществ / А.А. Павленко, Е.В. Максименко, Л.В. Чернышова, А.В. Диденко // Ползуновский вестник. – 2016. – Т. 1. – № 4. – С.68-72.

118. Кузовникова Л.В. Определение характеристик оптико-электронного комплекса обнаружения следов ВВ. / Л.В. Кузовникова, Е.В. Максименко // Южно-Сибирский научный вестник. – 2017. – № 3. – С. 74–77.

Приложение А

(справочное) Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015613911 (копия)



Приложение Б

(справочное)

Акт использования результатов работы в БТИ АлтГТУ



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ

Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» (БТИ АлтГТУ) ул. Трофимова, 27, г. Бийск, 659305 тел.(3854)432285, факс:(3854)435300 Е-mail: info@bti.secna.ru http://www.bti.secna.ru http://www.bti.secna.ru «24 » _____2 2018 г. № _____3 об использовании результатов диссертационной работы «УТВЕРЖДАЮ»

Зам. директора по научной работе Бийского технологического института (филиала) АлтГТУ



Акт

использования результатов диссертационной работы Кузовниковой Людмилы Владимировны «РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА ДИСТАНЦИОННОГО ОБНАРУЖЕНИЯ И ИДЕНТИФИКАЦИИ СЛЕДОВ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ НА ПОВЕРХНОСТИ ОБЪЕКТОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ИК-ДИАПАЗОНА»

Комиссия в составе: заведующего кафедрой естественно-научных дисциплин технологического факультета БТИ (филиала) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», д.ф.-м.н., профессора Галенко Ю.А., начальника отдела НИРСиП БТИ, к.т.н., доцента Барсукова Р.В., доцент кафедры МСИА, к.т.н., доцента Цыганка С.Н., составила настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Кузовниковой Л.В. используются в учебном процессе БТИ АлтГТУ в виде разделов курсов лекций и лабораторных работ в дисциплине «Методы неразрушающего контроля» для студентов направления 12.03.01 «Приборостроение».

Научные положения диссертационной работы послужили основой при разработке оптико-электронного измерительного комплекса и проведения исследований ИК-спектров поглощения различных материалов при дистанционном обнаружении взрывчатых веществ.

Члены комиссии:

д.ф.-м.н., профессор Галенко Ю.А. <u>Бар</u> к.т.н., доцент Барсуков Р.В. к.т.н., доцент Цыганок С.Н.

Приложение В

(справочное)

Акт использования результатов работы в ИПХЭТ СО РАН



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем химикоэнергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН) 659322, г.Бийск Алтайского края, ул. Социалистическая 1

т.(3854) 305-955, ф. 303-043, 301-725, e-mail:admin@ipcet.ru ОКПО 10018691, ОГРН 1022200571051, ИНН 2204008820, КПП 220401001



АКТ

использования результатов диссертационной работы Кузовниковой Людмилы Владимировны

Комиссия в составе: ученого секретаря ИПХЭТ СО РАН, к.т.н. Титов С.С., г.н.с., д.ф.м.н. Павленко А.А., с.н.с., к.т.н. Муравлева Е.В., рассмотрев материалы кандидатской диссертации Кузовниковой Л.В. «Разработка комплекса и исследование метода дистанционного обнаружения и идентификации следов взрывчатых веществ на поверхности объектов при воздействии лазерного излучения ИК-диапазона», установила, что результаты исследований использовались в рамках проектов: фундаментальных исследований СО РАН V.49.1.4: «Разработка теоретических основ, методов и высокотехнологичных средств преобразования энергии высокоэнергетических материалов (ВЭМ) для генерации пространственнораспределенных полей субмикронных и наноразмерных частиц со специальными контролируемыми свойствами с целью дезактивации опасных химических агентов с одновременным дистанционным обнаружением и идентификацией опасных веществ», междисциплинарного интеграционного проекта фундаментальных исследований МИП-9 «Физические основы новых дистанционных методов и технологий обнаружения взрывчатых веществ», а также при выполнении НИР «Исследование лидарных методов дистанционного обнаружения следов азотосодержащих взрывчатых веществ (ВВ) на одежде и коже человека, поверхности ручной клади и багажа в условиях интенсивного пассажиропотока» (шифр НИР «Шток-Л2», заказчик ФГКУ «Войсковая часть 68240»).

Члены комиссии:

С.С. Титов А.А. Павленко Е.В. Муравлев

133