**«Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова»**

**(БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова)**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | |  | |  | | ДОПУСКАЕТСЯ К ЗАЩИТЕ: | | | | | | | | | |
| **Факультет** | | И | | Заведующий кафедрой | | | | |  | | И1 | | |
|  | |  | |  | | | | |  | | шифр кафедры | | |
| **Выпускающая кафедра** | | И1 | | Борейшо А.С. | | |  |  | | | | | |
|  | |  | | Фамилия И.О. | | |  | подпись | | | | | | |
| **Группа** | | И131 | | «\_\_\_\_\_» | |  | | | | | | 2017 г. | |
|  |  | |  | |  | |  | | | | |  | | |

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

|  |  |
| --- | --- |
| Иванова Сергея Викторовича | |
| Фамилия, имя, отчество обучающегося | |
| **На тему** | Система диагностики выбросов загрязняющих веществ |
|  | |
|  | |

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Направление подготовки** | 200500 |  | Лазерная техника |
|  | индекс направления |  | полное наименование направления |
|  | | |

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Консультант:** | | | | |  | | | |  | **Руководитель:** | | |  | | | | | | |
| при необходимости | | | | | подпись | | | |  |  | | | подпись | | | | | | |
|  | | |  | |  | | | |  |  | | | | |  | |  | | |
| ученая степень, ученое звание | | | | | Фамилия ИО | | | |  | ученая степень, ученое звание | | | | | | Фамилия ИО | | | |
| « » |  |  | | | | |  | 201\_\_г. |  | « » |  |  | | | | | |  | 2017 г. |
|  | | | | | |  | | |  | **Обучающийся:** | | | |  | | | | | |
|  | | | |  | |  | | |  |  | | | | |  | |  | | |
|  | | | | | |  | | |  | подпись | | | | |  | | Фамилия ИО | | |
|  |  |  | | | | |  |  |  | « » |  |  | | | | | |  | 201 7 г. |

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

2017 г.

**РЕФЕРАТ**

Выпускная квалификационная работа содержит 52 страницы, 21 иллюстрацию, 9 таблиц, 1 приложение.

В первом разделе рассмотрены физические основы дистанционного зондирования, а в частности лидарные системы для наблюдения за состоянием атмосферы, активные и пассивные методы. Так же был произведён обзор рынка Фурье – спектрометров.

Во втором разделе произведён выбор функциональных компонентов для лидара, энергетический расчёт лидарного канала, энергетический расчёт канала Фурье – спектрометра, так же разработана 3D модель лидара и рабочая конструкторская документация к устройству.

ЛИДАР, ЛИДАРНЫЕ СИСТЕМЫ, ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ, АТМОСФЕРА, АЭРОЗОЛЬНЫЕ ЧАСТИЦЫ, ФУРЬЕ-СПЕКТРОМЕТР, ПРИЁМНЫЙ ТЕЛЕСКОП, МЕРСЕНН, ПОРОГ, ОБЛАКО, АЭРОЗОЛЬ, РАЗНОСТЬ ТЕМПЕРАТУР, КОНТРОЛЬ, МОНИТОРИНГ, ЗАГРЯЗНЯЮЩИЕ ВЕЩЕСТВА.

**СОДЕРЖАНИЕ**

[ВВЕДЕНИЕ 4](#_Toc484463548)

[1 ЛИДАР КАК СРЕДСТВО МОНИТОРИНГА АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА 6](#_Toc484463549)

[1.1 Обоснование необходимости создания системы дистанционного зондирования выбросов загрязняющих веществ 6](#_Toc484463550)

[1.2Физические основы дистанционного зондирования.8](#_Toc484463551)

[1.3 Лидарные системы для наблюдения за состоянием атмосферы 10](#_Toc484463552)

[1.3.1 Лидары рассеяния для наблюдения за состоянием атмосферы 11](#_Toc484463553)

[1.3.2 Флуоресцентные лидары для мониторинга атмосферы 12](#_Toc484463554)

[1.4 Измерение параметров аэрозольных частиц в атмосфере 14](#_Toc484463555)

[1.5 Модель пассивного дистанционного ИК-зондирования 16](#_Toc484463556)

[1.6 Чувствительность и пределы обнаружения для пассивного дистанционного ИК - зондирования 22](#_Toc484463557)

[1.7 Спектрометры дистанционного анализа 25](#_Toc484463558)

[2 РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОСТАВОВ ВЫБРОСОВ 29](#_Toc484463559)

[2.1 Выбор и расчёт параметров аэрозольного лидара 30](#_Toc484463560)

[2.2 Расчёт эквивалентной шуму разности температур 34](#_Toc484463561)

[2.3 Расчёт телескопического узла по системе Мерсенна 37](#_Toc484463562)

[2.4 Разделение пучков на два канала 40](#_Toc484463563)

[2.5 Компоновка устройств и визуализация модели 44](#_Toc484463564)

[ЗАКЛЮЧЕНИЕ 48](#_Toc484463565)

[БИБЛИОГРАФИЯ 49](#_Toc484463566)

[ПРИЛОЖЕНИЕ А. КОНСТРУКТОРСКАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ 52](#_Toc484463567)

# ВВЕДЕНИЕ

Проблема мониторинга состояния атмосферы с целью контроля химического состава аэрозолей и переменных газов и регистрации загрязнений окружающей среды экотоксикантами и биогенными частицами сильно обострилась в связи с усилением техногенной нагрузки на окружающую среду. Одним из перспективных направлений в области экологического мониторинга является применение многоспектрального лазерного комплекса, позволяющего в режиме реального времени регистрировать наличие в атмосфере малых концентраций загрязняющих газов и аэрозольных веществ.

На сегодняшний день лидарные системы позволяют проводить измерения и с поверхности Земли и с космического спутника. Первые публикации по зондированию SO2 и СО2 регистрацией сигналов комбинационного рассеяния (КР) света от дымовой трубы промышленного производства появились в 1970г. Малые сечения КР предопределили использование этого метода лазерного газоанализа лишь при высоких уровнях концентраций загрязняющих газов атмосферы, превышающих ПДК.

В настоящее время со стороны морских портов возросли требования к выбросу в составе отработавших газов морских судов различных веществ: NOx, SO2, CO, CO2 и др. Наиболее экологически опасные из них – выбросы оксидов азота и оксидов серы с отработавшими газами дизелей и котлов морских судов. Несмотря на то, что вклад морских судов в глобальное загрязнение воздушного бассейна во всех странах оценивается в 2-3% от общего количества выбрасываемых вредных веществ всеми источниками, в местах интенсивного судоходства и скопления судов – портах, проливах, каналах и пр. – судовые дизели и котлы становятся мощными источниками локального и регионального загрязнения атмосферы. Указанное требует разработки системы мониторинга выбросов рассматриваемых загрязняющих веществ в атмосферу с отработавшими газами судовых дизелей и котлов. Требует разработки методов прогнозирования влияния их выбросов на качество окружающей среды, без которой невозможно организовать качественный контроль администрациями морских портов.

Для анализа и прогноза экологической ситуации в целом необходимо, чтобы все полученные данные были согласованы в пространстве как по зонам покрытия, так и по пространственному разрешению, синхронизированы во времени, имели единый формат и опирались на единую методическую базу. Современные программные и аппаратные средства компьютерного моделирования делают возможными обоснованные и детальные прогнозы экологической ситуации, адекватность которых определяется лишь тем, насколько полными и непротиворечивыми являются исходные данные. Задачу сбора таких данных решают мобильные и бортовые лидарные измерительные системы наземного, воздушного и космического зондирования.

**Целью** выпускной квалификационной работы является создание системы для дистанционного мониторинга и диагностики выбросов загрязняющих веществ на территории морских портов.

Для достижения поставленной цели необходимо выполнить ряд задач:

* анализ методов дистанционного зондирования атмосферы;
* выбор и расчёт параметров аэрозольного лидара;
* энергетический расчёт Фурье – спектрометра;
* габаритный расчёт приёмной части телескопа;
* разработка оптической схемы;
* проектирование разрабатываемого прибора.

# ЛИДАР КАК СРЕДСТВО МОНИТОРИНГА АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА

## Обоснование необходимости создания системы дистанционного зондирования выбросов загрязняющих веществ

Ведущийся в настоящее время эпизодический контроль загрязнения атмосферы непосредственно в устье источника выброса, а также контроль воздуха рабочей и санитарно-защитной зон не даёт полной картины загрязнения. Для выработки эффективных и своевременных мероприятий по снижению вредного воздействия на природу необходимо обладать объективной, качественной и количественной информацией о текущем состоянии окружающей среды и динамике его изменения. Такую информацию могут дать дистанционные методы контроля и особенно метод лазерного зондирования [1, 2].

Высокая чувствительность лидаров при обнаружении малых аэрозольных и газовых примесей в атмосфере, дистанционность и большая оперативность получения данных дают реальную основу их использования для контроля распространения загрязнений в атмосфере [3].

Практическая потребность в лазерной системе обусловлена её преимуществами по сравнению с традиционными химическими методами. Это возможность проведения непрерывного дистанционного анализа, большой радиус действия, оперативность получения результатов измерений, с их выводом на монитор, меньшая трудоёмкость измерений.

Лидар, внешний вид которого показан на рисунке 1, состоит из следующих частей: лазера, передающей оптики, приёмного телескопа, спектроанализатора, фотоприёмника и электронной измерительной системы. Импульс лазерного излучения, сформированный передающей оптикой, направляется в мишень.

Излучение, рассеянное мишенью назад, собирается приёмным телескопом и через спектроанализатор направляется на фотоприёмник. Электрический сигнал с фотоприёмника обрабатывается измерительной системой по заданному алгоритму.

Способность лидаров проводить в реальном масштабе времени дистанционный анализ даёт возможность для мгновенного обнаружения любых избыточных концентраций загрязняющих веществ в атмосферном воздухе.

В настоящее время лидары применяются для решения следующих задач [3]:

* получения карт параметров рассеяния шлейфами выбросов и их эволюции во времени;
* порогового обнаружения некоторых параметров загрязнения, как правило, контроль аварийных ситуаций;
* измерения концентраций как основных, так и малых составляющих атмосферы (контроль загрязнения).

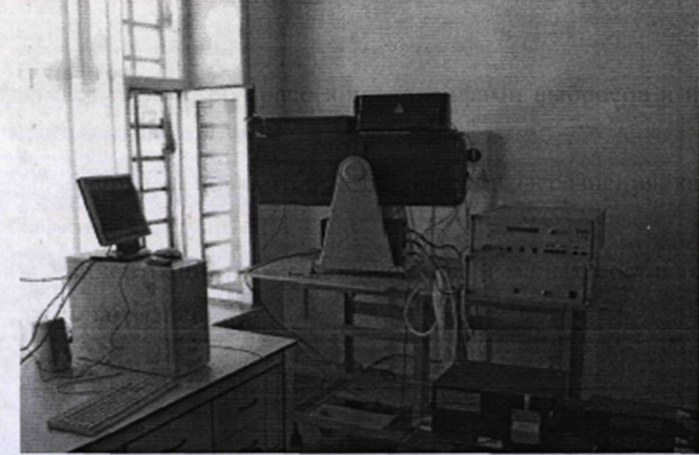


Рисунок - Внешний вид лидара дистанционного зондирования

Эти наблюдения можно проводить дистанционно с наземных платформ или судов, самолётов или спутников с получением большого пространственного и временного разрешения.

## Физические основы дистанционного зондирования

Лазерная система дистанционного зондирования или лидар представляет собой бесконтактное средство измерения параметров удалённой мишени, в котором лазерное излучение направляется через атмосферу на мишень, а рассеянное мишенью излучение с этого расстояния собирается приёмным телескопом на фотоприёмник. Лидар состоит из передатчика – лазерного излучателя, приёмника – приёмного телескопа, спектроанализатора и фотоприёмного устройства. Для дистанционного зондирования представляют интерес лазеры, которые способны генерировать спектрально–ограниченные импульсы излучения наносекундной длительности высокой мощности и небольшой угловой расходимости. В тех случаях, когда сигнал является очень слабым, необходима также достаточно высокая частота повторения импульсов.

Принцип действия систем дистанционного лазерного зондирования атмосферы следующий (Рисунок 2): импульсы зондирующего лазерного излучения через коллимирующую оптическую систему направляются на исследуемый объём в атмосфере, отражаются либо от исследуемого объёма газа (или аэрозоля), либо от уголкового отражателя, регистрируются приёмным телескопом. Часть зондирующего излучения (доли процента) ответвляются светоделителем и используется для формирования опорного сигнала (начало отсчёта). Обратный сигнал, собранный приёмным телескопом, поступает на фотоприёмник, затем на блок, в котором осуществляется фильтрация, оцифровка, затем на процессор, где осуществляется обработка информации с учётом опорного сигнала [4].

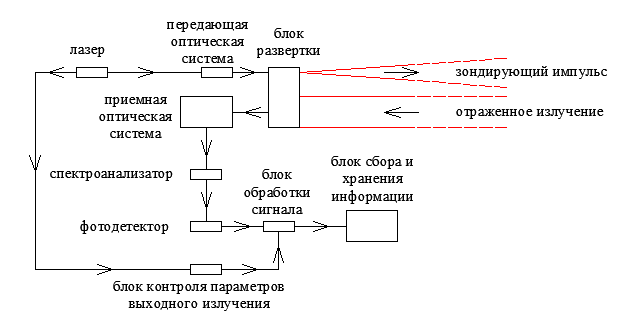


Рисунок Упрощённая схема лидарной системы

Во многих работах подробно рассмотрены явления, возникающие при взаимодействии лазерного излучения с мишенью. В общем случае такая мишень представляет собой газовый поток или смесь, состоящий из аэрозольных частиц и газовых молекул. При распространении лазерного излучения сквозь такую мишень интенсивность лазерного излучения уменьшается за счёт поглощения (или абсорбции) излучения с веществом мишени за счёт преобразования энергии световой волны в другие виды энергии [5] по закону Бугера–Ламберта–Бера [3]:

|  |  |
| --- | --- |
| *I = I0 · exp(-k·x),* | (1) |

где *х* – толщина поглощающего слоя, а *k* – коэффициент поглощения, зависящий от длины волны лазерного излучения, химической природы и состояния вещества. Согласно развитым в [5] преставлениям элементарный акт поглощения происходит при переходе свободного атома или атома в составе молекулы газа в возбуждённое состояние и при этом поглощается квант лазерного излучения.

Основные методы дистанционных измерений базируются на следующих явлениях, происходящих в атмосфере при распределении в ней монохроматического оптического излучения:

1. Упругое рассеяние на атомах и молекулах без изменения частоты излучения (рассеяние Рэлея);
2. Упругое рассеяние на малых частицах без смещения частоты излучения (рассеяние Ми). Это явление лежит в основе лидаров, предназначенных для измерения параметров аэрозоля в атмосфере;
3. Комбинационное рассеяние (КР) на молекулах со сдвигом частоты рассеянного излучения, определяемым параметрами частиц (рассеяние Рамана). Это используется при измерении профилей плотности температуры атмосферы на высотах до 100 км;
4. Поглощение излучения частицами среды [6].

## Лидарные системы для наблюдения за состоянием атмосферы

Взаимодействие лазерного излучения с составляющими атмосферы характеризуется такими физическими эффектами, как поглощение газами, молекулярным рассеянием, рассеянием и поглощением аэрозолями, комбинационным рассеянием, флуоресценцией атмосферных газов и аэрозолей. Перечисленные явления могут рассматриваться независимо, то есть выбором параметров зондирующего излучения можно усилить тот или иной эффект по сравнению с другими для получения информации об атмосфере.

### Лидары рассеяния для наблюдения за состоянием атмосферы

Спектроскопический метод, использующий методики зондирования на основе явления рассеяния Рэлея, рассеяния Ми и рассеяния Рамана позволяет получать информацию об атомных и молекулярных составляющих, их концентрациях, а также измерять метеопараметры атмосферы (температура, влажность, направление и скорость ветра).

Измерения с помощью лидарных систем на явлении комбинационного (рамановского) рассеяния молекулами воздуха начали проводиться с тех пор, как была изучена возможность обнаружения и анализа атомных составляющих вредных примесей в загрязнённом воздухе. Схема, использующая КР для дистанционного анализа молекулярных загрязнений в атмосфере, впервые была рассмотрена в 1969 г. [7]. Первые экспериментальные работы [8,9] были опубликованы в 1970 г., в которых сообщается, что авторам удалось обнаружить молекулы SO2 и CO2 в выбросе дымовой трубы с помощью лидара на рубиновом лазере с модуляцией добротности, а также зарегистрировать сигналы КР назад от продуктов сгорания нефти и выхлопных газов автомобиля с расстояния 30м [10]. Первая мобильная лазерная локационная система, установленная в кузове автофургона и использующая КР для анализа ряда составляющих смеси газов из одного пункта была изготовлена в Японии в 1971г. [11]. В качестве источника излучения – Nd:YAG лазер с модуляцией 8 добротности, излучающий импульсы на второй гармонике (532нм) с энергией 14мДж и частотой повторения 40Гц. Полевые испытания описаны в [12], где измерялись выбросы SO2 от действующей электростанции за время наблюдения в несколько минут. О создании мобильных передвижных лабораториях сообщается во многих работах [13]. Комбинационное рассеяние является надежным средством при обнаружении молекул, но использование метода осложняется малым поперечным сечением рассеяния, что при небольшом содержании исследуемого газа в атмосфере даёт слабый сигнал поглощения.

### Флуоресцентные лидары для мониторинга атмосферы

Метод лидарной флуоресценции является одним из методов дистанционного зондирования, который, по существу состоит в анализе света (флуоресценции), испускаемого объектом, при освещении объекта световым импульсом.

Лидарные методы были разработаны для дистанционного зондирования атмосферы в начале 1960-х годов: первые работы на эту тему были опубликованы в 1963 году [14]. В последующие годы данный метод был также применен для дистанционного зондирования природных вод, что и привело к первым опытным испытаниям в этой области с использованием флуоресцентных лидаров, которые изначально использовались для обнаружения разливов нефти, а затем для изучения растворенных органических веществ и фитопланктона[15].

В настоящее время актуальной задачей является разработка и создание аппаратуры, позволяющей разрешить проблему дистанционного обнаружения источников выбросов вредных веществ в атмосферу. В статье [16] сообщается о создании прототипа самолётного флуоресцентного лидара для контроля радиоактивного загрязнения атмосферного воздуха посредством измерения концентрации изотопов молекул йода вблизи химических предприятий и атомных электростанций. Излучателем служит Nd:YAG лазер, испускающий импульсы длительностью 10 нс и энергией 10 мДж на длине волны 532 нм. Для оценки эффективности детектирования флуоресценции молекул йода авторами статьи [16] было выполнено компьютерное моделирование, результаты которого показывают, что для самолётного зондирования молекул I2 на высоте до 3 км с концентрацией 1010 см-3 и энергии флуоресценции, равной энергии 1 фотона, оптимальной длиной волны зондирования является λ=532нм, время измерения при использовании этой длины волны для диапазона высот 0,1-3 км составит от 1,32 мкс до 1,19 мс.

По материалам статьи [9] лабораторные эксперименты демонстрируют возможность использования лидара на явлении флуоресценции для дистанционного зондирования галоидо-углеводородов в атмосфере. Авторы данной статьи использовали фемтосекундый лазер на Ti:Sapphire с длительностью импульса 42 фс, а центральной длиной волны 810 нм с шириной полосы 23 нм, выходной энергией импульса 20 мДж и частотой повторения 10 Гц.

Глобальные изменения климата учёные связывают с промышленными выбросами химических, радиоактивных веществ, с образованием в атмосфере углеродосодержащих аэрозолей, вторичного биогенного аэрозоля [17]. Для дистанционного обнаружения в атмосфере и идентификации физиологически активных веществ (ФАВ), включая бактерии и вирусы, могут быть использованы методы лазерно-индуцированной флуоресценции и КР. В работе [18] сообщается о создании первого в истории мировой практики мобильного двухчастотного флуоресцентно-аэрозольного лидара. В лидаре реализована схема одновременного наблюдения лидарных сигналов упругого рассеяния и флуоресценции при облучении среды на лазерных длинах волн 1064 и 266 нм соответственно, в ИК-канале сигнал формируется аэрозолями любой природы, а в УФ-канале – аэрозолями только биогенного происхождения. Источником излучения в лидаре является лазер на алюмоиттриевом гранате с неодимом. Энергия выходного излучения на длинах волн 1064 и 266 нм при частоте повторения импульсов 20 Гц составляет 250 и 80 мДж соответственно, на длине волны 532 нм не превышает 10 мДж. Лидар размещен на автомобильной платформе, способен проводить полевые измерения в любом доступном месте в любое время суток, осуществлять исследование аэрозольных слоёв до высот 20-25км. Основным достоинством лидара по мнению авторов статьи [18] является то, что в приборе комплексно сочетаются различные технические и методологические подходы.

## Измерение параметров аэрозольных частиц в атмосфере

Стационарный и мобильный многоволновые лидарные комплексы дают информацию о концентрации и физической природе атмосферного аэрозоля, химическом составе газовой фазы атмосферы, ветре и турбулентности на расстоянии до 25 км на вертикальной и наклонных трассах в любых направлениях. Лидарный комплекс включает в себя комплектующие и технологии современного уровня как российских, так и зарубежных производителей, и позволяет осуществлять дистанционное зондирование в широком спектральном диапазоне длин волн [19].

Лазерные импульсы длительностью порядка 10 наносекунд, распространяясь в атмосфере, взаимодействуют с различными ее составляющими и частично рассеиваются назад к лидару. Сигналы обратного рассеяния в атмосфере от каждого лазера принимаются одним телескопом и направляются на соответствующий приемник. Принятый сигнал передается в управляющий компьютер, где происходит его обработка в реальном масштабе времени. В компьютере предусмотрена первичная обработка «сырого» сигнала (учет фоновой засветки, сглаживание по группе импульсов). Развертка сигналов во времени обеспечивает получение информации о точках в пространстве на луче распространения лидарного импульса. Характерные времена лидарного зондирования сопоставимы с временами изменчивости самой атмосферы, поэтому лидары позволяют синхронно получать данные об аэрозоле и о газовой фазе [19].

Аэрозольный лидар определяет наличие атмосферного аэрозоля и измеряет его концентрацию, строит пространственное распределение в реальном времени и анализирует его физическую природу.



Рисунок - Действие аэрозольного лидара

Преимуществами аэрозольного лидара, то есть активного метода является:

* возможность использования по мере необходимости проведения эксперимента, независимо от времени суток и сезона;
* работа на больших расстояниях;
* большой диапазон применения в дистанционном контроле качества атмосферного воздуха;
* удобство в эксплуатации, надёжность
* формирование двухмерной или трёхмерной картины;
* анализ свойств прозрачной среды, рассеивающей свет;
* применение технологии с радиусами действия от сотен метров до сотен километров.

Недостатки:

* невозможность получения информации о состоянии газов в чистой атмосфере;
* большие габариты.

Далее решается обратная задача лидарного зондирования – восстановление концентраций определяемых веществ. Для этого были разработаны специальные алгоритмы решения всего набора обратных задач, которые отличаются методами и подходами к регуляризации решений для разных исследуемых компонентов. На выходе предлагается как сглаженный сигнал обратного лидарного рассеяния, так и информация о количестве загрязняющих веществ, их сравнение с пороговыми значениями, направление и скорость их распространения, т.е. фактически осуществляется первый этап обратной задачи экологической безопасности.

Для восстановления оптических параметров атмосферы используется основное уравнение лидарного зондирования, которое обычно записывается в виде [20]:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2) |

где *Р(R)* – мощность рассеянного сигнала с дистанции *R*; *А* – аппаратная константа, включающая мощность лазера, апертуру приёмного телескопа и эффективность системы регистрации; *β(R)* и *α(R)* – коэффициенты обратного рассеяния и экстинкции, которые зависят от свойств рассеивающих частиц.

## Модель пассивного дистанционного ИК-зондирования

Пассивное дистанционное зондирование с помощью преобразования инфракрасного Фурье-спектрометра позволяет детектировать и распознавать загрязнённые облака в атмосфере. Спектрометры FTIR основаны на интерферометре Майкельсона. Интерферометр состоит из фиксированного зеркала, светоделителя и зеркала, которое имеет точное движение вперед и назад. Разделитель луча изготовлен из специального материала, который позволяет передавать половину падающего излучения, а оставшуюся часть - отражать. Излучение попадает на разделитель луча и расщепляется на два луча, из которых один луч достигает фиксированного зеркала через светоделитель, а второй отражается от светоделителя в направлении движущегося зеркала. Излучение отражается обратно на светоделитель фиксированными и движущимися зеркалами, вызывая передачу только половины отраженного излучения и отражая остающееся излучение на светоделителе. Это приводит к передаче одного пучка к детектору, а второй - к источнику. Схема интерферометра Майкельсона представлена на рисунке 4 [21].

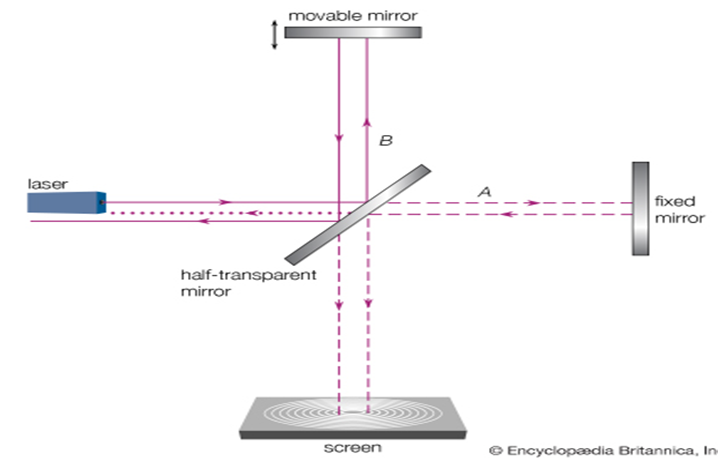


Рисунок - Схема интерферометра Майкельсона

Принцип действия пассивных дистанционных приборов на основе ИК-Фурье спектроскопии основан на регистрации характеристических спектров излучения или поглощения загрязняющих веществ в инфракрасном (ИК) диапазоне. Фурье-спектрометры способны регистрировать тепловое излучение атмосферы, земли, зданий, растений, облаков, а также произвольную комбинацию этих излучений, прошедших через облако загрязнителя, и, кроме того, собственное тепловое излучение газов-загрязнителей.

Методологически изделие строится на основе метода пассивной дистанционной спектральной диагностики. В этом способе измерений источником излучения является атмосфера или элементы ландшафта. Исследуемым объектом является загрязняющие газы на оптическом пути в атмосфере между источником излучения и приемником. Чувствительность метода не является постоянной величиной и возрастает при увеличении разности температур ∆Т между объектом и источником излучения (фоном) [22].

Типичный предел детектирования химических веществ составляет величину порядка 1 ppm (при ΔТ = 1 К и размере облака порядка 1 м) [23].

Спектральный диапазон прибора может быть разным. Он выбирается, исходя из того, какое в этом диапазоне находится «окно прозрачности» атмосферы (компоненты атмосферы не имеют линий поглощения или излучения) и линии спектра основных интересующих нас загрязнителей [24].

Исходными данными для определения интегрального содержания вещества-мишени служат три экспериментальных спектра [25]:

1. “Чистый” спектр фона. Представляет собой не просто спектр удаленного фонового объекта, а спектр, зарегистрированный точно в тех же условиях, в которых в дальнейшем предполагается регистрировать спектр вещества-мишени. Например, если концентрация вещества-мишени будет измеряться в спектрометрической кювете на фоне нагретого черного тела, то “чистым” фоновым спектром будет спектр этого черного тела, зарегистрированный сквозь пустую кювету. В дальнейшем расположение прибора, черного тела и кюветы не должно меняться. Тем самым автоматически окажется учтено влияние окон кюветы, а также естественных поглотителей излучения, которые присутствуют в окружающей атмосфере (вода, углекислый газ).
2. Спектр вещества-мишени. Регистрируется точно в тех же условиях, что и предыдущий, фоновый спектр. Вещество-мишень может быть распределено вдоль трассы измерения произвольным образом. Например, в кювете вещество занимает ограниченный объем и его концентрация в этом объеме постоянна; в случае открытого облака вещества-мишени его объем ничем не ограничен, а концентрация вдоль трассы измерения меняется.
3. Спектр черного тела, имеющего температуру газа-мишени. Обычно, как открытое облако вещества, так и спектрометрическая кювета, имеют температуру окружающей атмосферы. В этом случае используемое для регистрации третьего спектра черное тело может быть не очень качественным – на практике достаточно записать спектр любого объекта с пористой матовой поверхностью (например, листа картона).



Рисунок - Результат пассивного дистанционного зондирования

В процессе работы измерительная техника и методика анализа таковы, что не требуют предварительных описаний измерений фонового спектра. Пассивная ИК-спектроскопия менее чувствительна, чем активная, так как чувствительность уменьшается с разницей температур между фоном и целевыми соединениями. В случае малого чувствительного контраста чувствительность обнаружения оставляет желать лучшего. Для эффективной разности температур в 1 К можно дать оценку, что чувствительность примерно в 1000 раз меньше по сравнению с чувствительностью активного. Но, тем не менее, пассивное дистанционное зондирование является единственным методом обнаружения, который позволяет мобильно и быстро обнаружить опасные химические вещества [20].

Для того чтобы понимать измеренные спектры, используют модель. Атмосфера перед ИК-датчиком разделяется на несколько однородных слоёв. У каждого слоя температура и различное парциальное давление ИК-активных газов. В простейшей модели можно определить слой наблюдения и фон. Если не учитывать в первом приближении рассеяние света от аэрозолей и частиц, то наблюдаемая светимость L равна:

|  |  |
| --- | --- |
| *L = B0·(1-τ0) + BB·τ0*, | (3) |

где *В0* – излучение чёрного тела при данной температуре наблюдаемого слоя, *ВВ* – излучение фона, *τ0* – коэффициент пропускания наблюдаемого слоя [20].

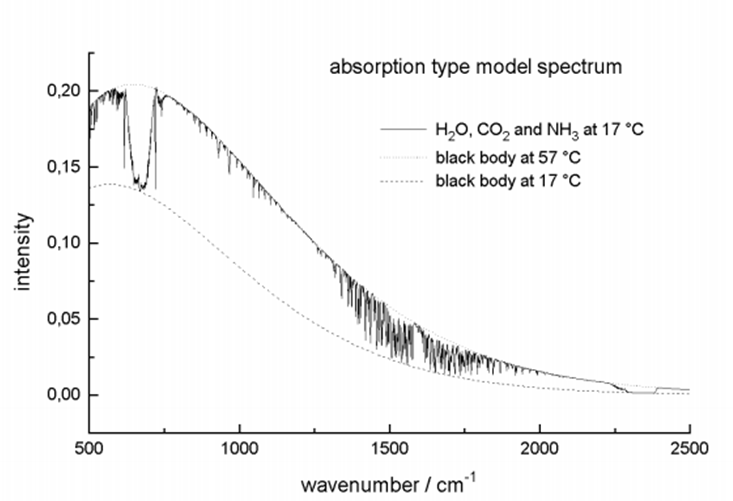


Рисунок - Излучательный спектр для простой модели пассивного  
дистанционного зондирования двух слоёв

Тип оптической плотности излучения со следами воды, углекислого газа и газообразного аммиака, который является охладителем относительного фона. Верхняя и нижняя пунктирные линии соответствуют излучению чёрного тела при температуре 330 К и 290 К. На рисунке 6 приведён типичный абсорбционный след, если облако имеет температуру 17оС и фон 57оС. Следы излучательных компонентов облаков не приводят к нулевому излучению. Те же аргументы применимы, если рассмотреть обратную ситуацию. Наблюдаемые следы выбросов никогда не будут подниматься над теоретической кривой излучения чёрного тела. Этот физический факт ограничивает динамический диапазон спектра целевого соединения. Если нет разницы температур между облаком и фоном, то никакой информации о составе облака не может быть получено. Это ограничение не преодолеть с помощью улучшений датчиков. Тем не менее, вероятность такой особой точки равенства температур является бесконечно низкой, однако может быть маленькая разница температур [4].

ИК-поглощение газовыми примесями в атмосфере (например, вода и углекислый газ) перекрывается отпечатками следов (излучение или поглощение) целевых соединений. В большинстве случаев это влияет на результат измерения и уменьшает диапазон частот, которые могут быть использованы для дистанционного зондирования. Взаимодействие обнаруженных химических агентов с водой и диоксидом углерода снижают избирательность и чувствительность. Из сказанного выше можно сделать вывод, что, чтобы поглощение не перекрывалось, нужно работать в спектральных областях, где вода и СО2 слабо поглощают излучение [24].

Преимущества и недостатки Фурье спектроскопии (пассивного метода) представлены ниже:

Преимущества:

* универсален для обнаружения многоатомных молекул;
* быстрый анализ многокомпонентных смесей;
* мониторинг в режиме реального времени газообразных выбросов на расстоянии;
* большая площадь зондирования, без подготовки и обработки образца;
* во время измерений датчик не загрязняется;
* простота эксплуатации и малое техобслуживание.

Недостатки:

* менее чувствительна, чем активный метод;
* возможность изучения только газообразных примесей;
* нет картографической информации, о расположении выбросов.

## Чувствительность и пределы обнаружения для пассивного дистанционного ИК - зондирования

Как видно из простой двухуровневой модели, чувствительность пассивного ИК-детектирования не является постоянной величиной, но зависит от соотношения спектрального шума ∆L к динамическому диапазону |BB-BO|. Более высокие значения (ВВ-ВО)/ ∆L повышают чувствительность для обнаружения химического агента. Для оценки обнаружения можно использовать в хорошем приближении предел от коэффициента пропускания к закону Ламберта [23]:

|  |  |
| --- | --- |
| , | (4) |

где - коэффициент поглощения, *с* – концентрация, *d* – оптическая длина пути [5].

Для анализа спектров удобно преобразовывать спектры пассивного ИК в излучательные и вычислить соответствующие температуры излучения (яркостная температура) Т(ν) по закону Планка:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (5) |

Давно введённой и наиболее широко применяемой характеристикой способности системы различать слабые сигналы на фоне шумов является эквивалентная шуму разность температур NE∆T. Эквивалентная шуму разность температур является мерой чувствительности детектора теплового излучения в [инфракрасной](https://en.wikipedia.org/wiki/Infrared) области [терагерцового](https://en.wikipedia.org/wiki/Terahertz_radiation) или [СВЧ](https://en.wikipedia.org/wiki/Microwave) частей [электромагнитного спектра](https://en.wikipedia.org/wiki/Electromagnetic_spectrum). Это количество сигнала падающей [температуры](https://en.wikipedia.org/wiki/Temperature), что было бы необходимо, чтобы соответствовать внутренним шумам детектора таким образом, чтобы [отношение сигнал-шум](https://en.wikipedia.org/wiki/Signal-to-noise_ratio) равно единице. Часто спектр NE∆T сообщается как температура в корневой полосе пропускания. Детектор, который измеряет мощность, часто заинтересован в аналогичной [мощности, эквивалентной шуму](https://en.wikipedia.org/wiki/Noise-equivalent_power) (NEP). Если соотношение между интенсивностью и температурой хорошо определена по [полосе пропускания](https://en.wikipedia.org/wiki/Pass_band), как и в случае [черного тела](https://en.wikipedia.org/wiki/Blackbody), то сеть просто масштабируется с NEP [26].

В формулу для NE∆T входят следующие параметры: a, b – размеры чувствительного элемента приёмника излучения, см; α, β – угловые размеры чувствительного элемента приёмника излучения, рад; ТВ – температура фона, К; D\*(λ) – удельная обнаружительная способность в зависимости от длины волны, определённая при электрической частоте, при которой спектр напряжения шума приёмника приведён к единице, см·Гц1/2/Вт; g(f) – нормализированный спектр напряжения шума приёмника излучения (безразмерная величина); А0 – эффективная площадь входного зрачка инфракрасной оптической системы, см2; τ0(λ) – коэффициент пропускания оптической системы в зависимости от длины волны λ (безразмерная величина); f – эффективное фокусное расстояние оптики, см; ∆fR – эквивалентная шумовая полоса стандартного фильтра, используемого при определении NE∆T, при спектре шума источника g(f), Гц [26]:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (6) |

Так как мы определяем NE∆T для единичного отношения сигнал/ шум, примем ∆Vs/Vn = 1 и решим уравнение относительно NE∆T:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (7) |

Спектральный шум ∆Т (среднеквадратическое отклонение Т) является разностью температур, которая может быть решена с помощью спектрометра. Любой ИК-след от целевого соединения будет появляться в виде отклонения ∆2Т(ν)=Т(ν)-ТВ(ν) от температуры фона ТВ [27]. Идентификация возможна, если:

|  |  |
| --- | --- |
| *∆2Т(ν) ≥NE∆Т* | (8) |

Для небольших NE∆Т выражение (8) можно переписать в величинах эквивалентных температур излучения следующим образом:

|  |  |
| --- | --- |
| *∆2Т ≈ ∆Т[1-exp(-εcd)]*, | (9) |

где - коэффициент поглощения, с – концентрация, d – оптическая длина пути, ∆Т – среднеквадратическое отклонение [23].

При малых значениях ×c×d<1 в хорошем приближении линейная зависимость будет выглядеть:

|  |  |
| --- | --- |
| *∆2Т ≈ ∆Т εcd* | (10) |

Выражение (9) можно преобразовать в

|  |  |
| --- | --- |
| *∆2Т/ε ≈ ∆Т cd* | (11) |

Из этого выражения можно вычислить предел обнаружения G, которое включает в себя влияние ∆Т при хорошем приближении:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (12) |

Таким образом, значение G даёт соответствующий предел обнаружения при пассивном методе дистанционного зондирования, который может быть определён при помощи параметра NE∆Т и сечения поглощения[23].

## Спектрометры дистанционного анализа

В мире существует множество спектрометров дистанционного анализа, которые базируются на ИК-Фурье спектроскопии, один из них SIGIS 2. SIGIS 2 - сканирующая система инфракрасной визуализации газов, которая используется для идентификации, визуализации и количественного анализа потенциально опасных газовых облаков с большого расстояния. Такой спектрометр совмещает в себе ИК-спектрометр и сканирующую систему.



Рисунок – Спектрометр дистанционного анализа SIGIS 2

Видео- или ИК-камера показывает изображение местности. В основном режиме работы оператор выбирает область для исследования, выделяя ее рамкой. Местность сканируется зеркалом, и поступающее на него инфракрасное излучение немедленно анализируется. Результат анализа визуализируется и накладывается на изображение потенциально опасного газового облака. Поскольку изображение поступает непосредственно с камеры, это упрощает оценку расположения и размера облака. Благодаря тому, что сканирующее зеркало расположено на вращающейся платформе, угол обзора составляет 360°.

Поле зрения такого спектрометра составляет 10 мрад, спектральный диапазон лежит в пределах 680-1500 см-1, спектральная скорость 16 спектров/с, среднеквадратичный коэффициент отклонения NE∆T равен 20 мК.

Также существует спектрометр OPS для системы мониторинга воздуха с открытым оптическим путём. Система базируется на методе инфракрасной Фурье-спектроскопии (FT-IR). Инфракрасное излучение, модулируемое интерферометром, при помощи телескопа направляется на ретрорефлектор, расположенный обычно в нескольких сотнях метров от прибора. Отраженное излучение собирается тем же телескопом и фокусируется на детектор. Большой спектральный диапазон позволяет идентифицировать и количественно определять широкий набор соединений. Важным применением системы является мониторинг воздуха в промышленных, строительных или муниципальных зонах. Спектральный диапазон в пределах 650-5000 см-1, спектральная скорость 4 спектров/с.

Система мониторинга окружающей среды EM 27 является ИК-Фурье спектрометром с открытым оптическим путем, разработанным и оптимизированным для дистанционного обнаружения опасных веществ в атмосфере. Благодаря высокой чувствительности и скорости анализа, а также механической устойчивости, система используется для широкого круга задач, от мониторинга воздуха в промышленных зонах до научно-исследовательской работы. EM 27 легко может быть развернут в области для различных областей применения.



Рисунок – Спектрометр OPS

Заражение воздуха, выбросы из дымовых труб, диффузные выбросы от размещения отходов или опасных выбросов в результате аварий на химических предприятиях может наблюдается с рабочим диапазоном до нескольких километров. Система позволила локальных сетей отображает результаты анализа в режиме реального времени.



Рисунок – Ик-Фурье спектрометр ЕМ 27

Поле зрения составляет 30 мрад, диафрагменное число 0.9, спектральное разрешение ∆σ = 1 см-1, скорость сканирования при ∆σ = 4 см-1 составляет 9 спектров/с, спектральный диапазон в пассивном режиме σ = 700 – 2000 см-1.

Из приведённого обзора следует, что все Фурье спектрометры, работающие в ИК-диапазоне компактны, мобильны, отличаются быстродействием и работают в спектральном диапазоне от 650 см-1.

Ниже в таблице приведены краткие характеристики обнаруженных некоторых загрязняющих веществ методом ИК-Фурье спектроскопии:

Таблица 1 - Краткая характеристика исследуемых молекул

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Наименование токсичного вещества | ПДК, мг/м3 | Молярная масса, г/моль | Частота собств. колебаний молекул ν0, см-1 | ПДК, см-3 |
| Диоксид азота (NO2) | 0,085 | 46 | 1320 | 1,1·1012 |
| Оксид азота (NO) | 0,4 | 30 | 1877 | 8·1012 |
| Диоксид серы (SO2) | 0,5 | 64 | 1152 | 4,7·1012 |

# РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОСТАВОВ ВЫБРОСОВ

В данной работе требуется создать систему дистанционного мониторинга для определения составов выбросов на территории морских портов. Нужно чтобы система могла не только определять наиболее загрязнённые зоны в режиме реального времени независимо от времени суток и сезона, но и чтобы могла определить на какой дистанции находится данное загрязнённое облако и полный состав загрязняющих веществ, то есть своего образа гибрид активного и пассивного методов дистанционного зондирования.

Морские порты представляют собой совокупность гидротехнических сооружений, объектов и технологического оборудования, расположенных на специально отведённой территории, и акватории, предназначенной для стоянки и обработки судов. Морские порты являются выраженными неорганизованными источниками загрязнения атмосферы твёрдыми и газообразными веществами [28]. Исключительно важным показателем степени влияния вредных выбросов дизельных и котельных установок судов на окружающую среду является уровень их приземных концентраций в атмосферном воздухе в непосредственной близости к судовым фарватерам, местам скопления флота, портам. Интенсивность загрязнений воздушного бассейна и дальность распространения загрязнений зависят от объёмов и видов основных перерабатываемых грузов, технологии их перегрузки. Результаты многих исследований показывают, что содержание в воздушной среде оксида углерода, оксидов азота, оксидов серы превышает предельно допустимые максимально-разовые концентрации для атмосферного воздуха. Это свидетельствует о существенном загрязнении воздуха морскими судами [29].

## Выбор и расчёт параметров аэрозольного лидара

Теоретические и экспериментальные исследования последних лет показывают, что измеренные коэффициенты обратного рассеяния и экстинкции аэрозоля могут быть инвертированы в микрофизические параметры частиц путём решения обратной задачи зондирования. В данной работе будет создаваться лидар на основе импульсного эрбиевого волоконного лазера с безопасной для глаз длиной волны 1.5 мкм, оптические характеристики которого представлены в таблице 2.

Таблица 2 - Оптические характеристики волоконного лазера

|  |  |
| --- | --- |
| Параметр | Значение |
| Длина волны, нм | 1550 |
| Длительность импульса, нс | 5 |
| Энергия излучения, мкДж | 20 |
| Габаритные размеры, мм | 150х125х30 |

Методика лазерных дистанционных измерений концентраций загрязняющих веществ состоит в следующем. Результат одного измерения представляет собой распределение мощностей сигналов обратного рассеяния для выбранных веществ по расстоянию R вдоль лазерного луча с шагом 1 м. Одно значение этого распределения – суммарная мощность обратного рассеяния на всех молекулах, находящихся внутри измерительного объёма. Сам измерительный объём представляет собой Гауссов пучок. Это распределение записывается в буферное запоминающееся устройство, а затем анализируется микропроцессором. Обработка результатов проводится на ПК с помощью специального программного обеспечения. Для каждого значения мощности, скорректированной на фон, программное обеспечение решает уравнение лидарного зондирования, которое было представлено выше в формуле (2).

Как уже говорилось, аппаратная константа *А* включает в себя мощность лазера, апертуру приёмного телескопа и эффективность системы регистрации, то есть:

|  |  |
| --- | --- |
| *А = PL·S·ƞ* | (13) |

Тогда формулу (2) можно будет перезаписать в виде:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (14) |

В расчётах апертура приёмного телескопа S, исходя из предыдущих расчётов, берётся равной 0.00785 м2. Телескоп данной апертуры компактен, обеспечивает надёжную регистрацию сигнала и не приводит к необоснованному удорожанию системы. Эффективность системы ƞ равна 0.12. Максимальная дальность зондирования R предполагалась 5000 м. Коэффициент обратного рассеяния β и коэффициент экстинкции α для атмосферы брался из источника [22] и равны β = 2.48·10-6 м-1 и α = 2.077·10-5 м-1 соответственно. Энергия излучения Е составляет 20 мкДж из характеристик лазера.

Мощность излучения определяется как отношение энергии излучения Е к длительности импульса τ, которая равна 1 нс:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (15) |

После того, как подставили известные значения в формулу лидарного зондирования (2), получаем множество значений мощностей с интервалом в 1 м, которые представлены в таблице ниже:

Таблица 3 - Полученные результаты решения уравнения

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| P(R), Вт | 3.3·10-3 | 8.3·10-4 | 3.6·10-4 | 2.1·10-4 | 1.3·10-4 | 9.2·10-5 | 6.7·10-5 | 5.2·10-5 | …… |

По полученным мощностям требуется определить пороговое значение, при котором или выше этого значения, приёмник будет принимать сигналы. Для этого берётся фотоприёмное устройство, которое может принимать длину волны 1.5 мкм. В данной работе из каталога Thorlabs был выбран InGaAs фотодиод, характеристики которого представлены ниже:

Таблица 4. Характеристики InGaAs фотодиода

|  |  |
| --- | --- |
| Параметр | Значение |
| Диапазон длин волн, нм | 900 - 1700 |
| Диаметр площадки, мм | 1 |
| NEP, Вт/Гц1/2 | 2.5\*10-14 |
| Материал датчика | InGaAs |
| Полоса частот, Гц | 1.5\*108 |

Пороговая мощность приёмника рассчитывается как:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (16) |

где Фп – чувствительность приёмника, а *SNR* – отношение сигнал/шум. Чувствительность определяется как произведение NEP (сигнал эквивалентный шуму) к полосе частот:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (17) |

NEP берётся из характеристик приёмника и равный 2.5·10-14 [Вт/Гц1/2], полоса частот равна 1.5·108 [Гц]. Зная эти значения можем посчитать чувствительность:

Зная, что SNR = 10, можем посчитать пороговую мощность фотоприёмника:

*.*

Из полученной пороговой мощности приёмника видно, что система детектирует на несколько сотен метров, что не устраивает для требуемой разработки. Чтобы увеличить дистанцию детектируемых сигналов, требуется усилить этот сигнал, для этого нужно полученную мощность умножить количества накопленных импульсов, определяемое формулой:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (18) |

где *f* – частота длительности импульса, а *∆Т* – время импульса.

Чтобы система быстро определяла выбросы, время импульса берётся равным 1 с, а частота длительности импульса равна 5 кГц. Соответственно количеств накопленных импульсов будет равно 5·103.

После произведённых расчётов можно построить зависимость мощности от дистанции, для детектирования атмосферы, на которой можно будет увидеть порог определения сигналов:

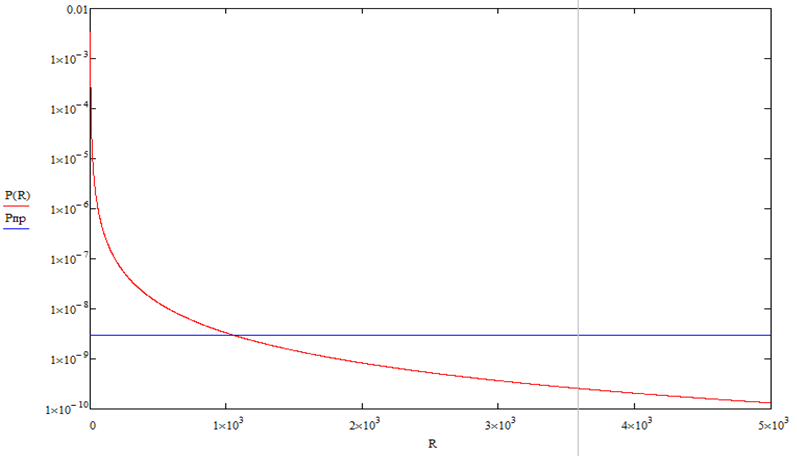


Рисунок - Зависимость мощности от дистанции для атмосферы

Далее требуется смоделировать загрязнённое облако, чтобы определить, будет ли разрабатываемая система с заданным порогом определять его. Это можно сделать с помощью Гауссого распределения:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (19) |

где βатм – коэффициент обратного рассеяния для атмосферы; βоб – коэффициент обратного рассеяния для облака; R – дистанция всего зондирования; R0 – дистанция, на которой находится облако; σ – ширина облака.

Дистанция зондирования также берётся 5000 м с шагом в 1 м, а облако находится на расстоянии 3000 м. В статье исследовалось подобное облако, поэтому коэффициент обратного рассеяния для облака был заимствован из источника [22] и соответственно равен 1.74·10-2 м-1. После того, как посчитали распределение Гаусса, подставляем полученные значения в формулу лидарного зондирования, заменяя коэффициент обратного рассеяния для атмосферы и также строим зависимость мощности от дистанции.

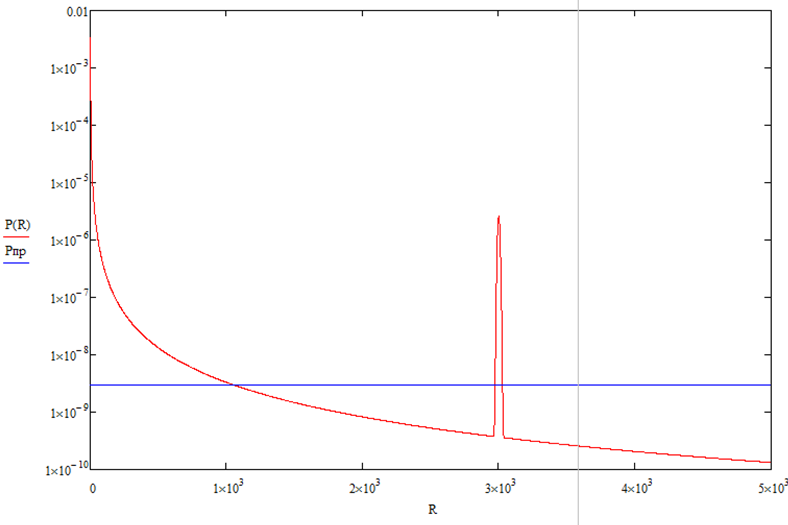


Рисунок - Зависимость мощности от дистанции для загрязнённого облака

Из данной зависимости видно, что атмосфера будет детектироваться на расстоянии 1 км, а данное загрязнённое облако будет распознаваться выбранным приёмником на дистанции 3000 м при мощностях от 10-9 и выше линии порога чувствительности.

## Расчёт эквивалентной шуму разности температур

Как известно, прибор принимает большое количество сигналов, поэтому для того, чтобы система могла различать слабые сигналы на фоне шумов, требуется рассчитать чувствительность детектора теплового излучения в инфракрасной области, а именно эквивалентной шуму разность температур NE∆T. В каталоге Thorlabs был выбран приёмник среднего ИК - диапазона, характеристики которого представлены в таблице 5.

Таблица 5 - Характеристики FTIR приёмника

|  |  |
| --- | --- |
| Параметр | Значение |
| Длина волны, мкм | 4.7 – 9.3 |
| Ширина полосы шума, кГц | 30 |
| Площадь области детектора, м2 | 0.0886 |
| NEP, Вт/Гц1/2 | 2.61\*10-11 |
| Материал датчика | HgCdTe |
| Удельная обнаружительная способность, см\*Вт/ Гц1/2 | 1.975\*1011 |

Далее можно производить NE∆T по формуле (6) для разрабатываемой системы, со следующими основными параметрами:

* диаметр объектива приёмника излучения равен 1.9 см;
* размер стороны квадратного чувствительного элемента приёмника 0.05 см;
* соответствующий угловой размер 1 мрад;
* эффективная ширина полосы шума 30 кГц;
* эквивалентная шумовая полоса 2.94·104 Гц;
* спектральный рабочий диапазон системы 4.7 – 9.3 мкм;
* эффективный коэффициент пропускания оптической системы 0.6.

Удельная обнаружительная способность детектора рассчитывается по формуле:

|  |  |
| --- | --- |
| , | (20) |

где А – площадь фоточувствительной области детектора, ∆f – эффективная ширина полосы шума, NEP – сигнал эквивалентный шуму.

Зная значения всех параметров из характеристик детектора, то можем определить удельную обнаружительную способность данного детектора:

Так как теперь удельная обнаружительная способность детектора известна, посчитаем NE∆T, подставив все значения в формулу (6):

Сравнивая полученное значение NE∆T с другими, которые получены в различных работах, можно сделать вывод, что полученный порог температур является очень высоким, для обнаружения множества частиц многоатомных молекул. Для того, чтобы в этом убедиться нужно рассчитать предел обнаружения, рассчитываемый по формуле (11):

Основными определяемыми токсичными веществами являются оксид азота, диоксид азота и диоксид серы. Зная коэффициенты сечения поглощения для всех веществ, можно определить предел обнаружения для данной системы.

Коэффициент сечения поглощения для диоксида серы SO2 равен 0.00018 ppm-1·m-1, тогда предел обнаружения будет равен:

Предел обнаружения для оксида и диоксида озона будут равны:

После того, как были найдены пределы обнаружения для данных концентраций, требуется сравнить их со значениями ПДК, которые представлены в таблице 6. Ниже представлена таблица, в которой сравнивается ПДК с полученными значениями:

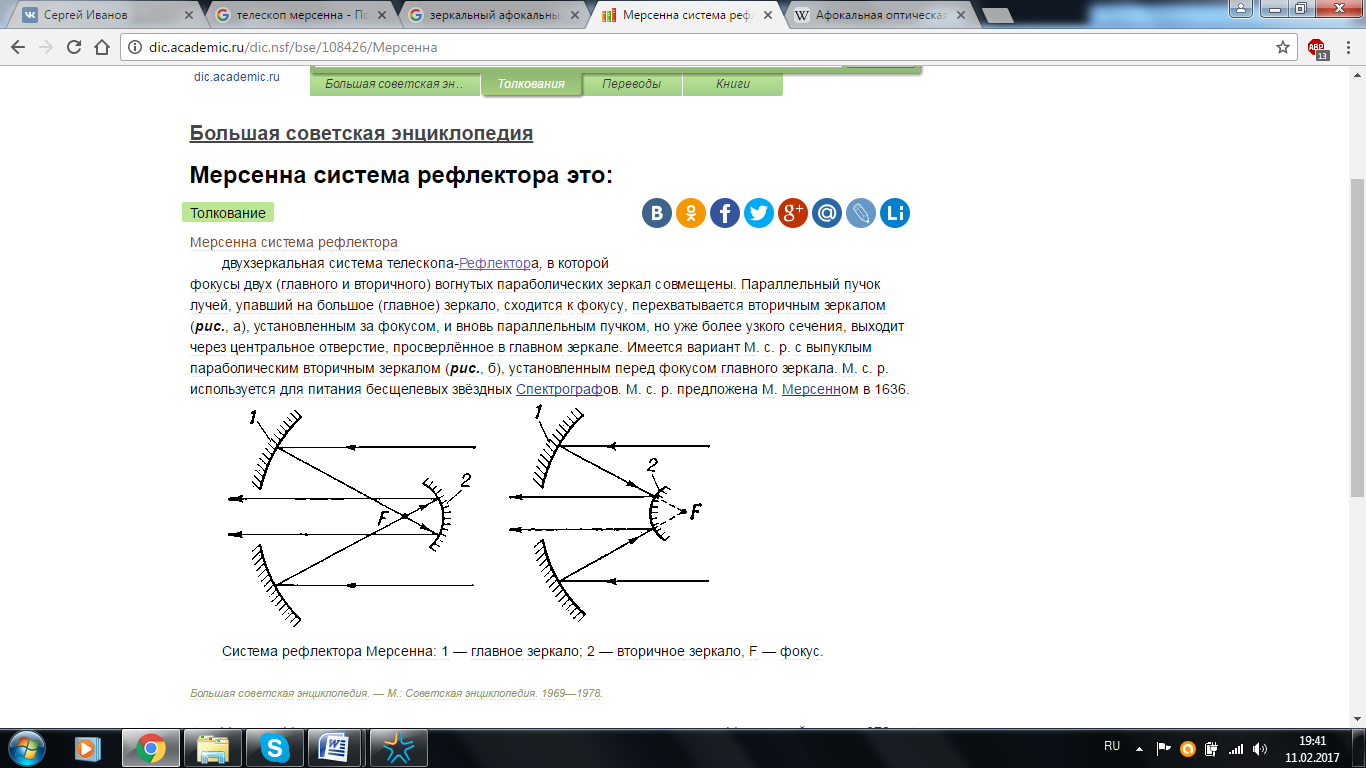
Таблица 6. Сравнение ПДК с полученными значениями

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Наименование токсичного  вещества | ПДК, мг/м3 | Полученные значения, мг/м3 |
| Диоксид серы (SO2) | 0.5 | 0.195 |
| Оксид азота (NO) | 0.4 | 0.389 |
| Диоксид азота (NO2) | 0.085 | 0.055 |

После того, как провели сравнение видно, что полученные значения не превышают значений ПДК, а значит разрабатываемый прибор сможет их детектировать и распознавать в атмосфере.

## Расчёт телескопического узла по системе Мерсенна

В спектрометрах для дистанционного зондирования чаще всего имеются зеркальные афокальные телескопы для того, чтобы собирать световые пучки. Афокальная оптическая система – оптическая система, преобразующая параллельный световой пучок в параллельный, но с другим углом наклона оптической оси. Телескоп в спектрометрах работает в широком спектральном диапазоне и сочетает в себе функции приёма и передачи излучения. Он собран по схеме Мерсенна и имеет асферическое главное зеркало.

Отличительной чертой телескопа является то, что в нем фокусы главного и вторичного зеркал совмещены. Зеркала вогнутые параболические. При попадании пучка света на главное зеркало, он сходится к его фокусу, а потом перехватывается вторичным зеркалом, которое установлено за фокусом. Вторичное зеркало направляет пучок света в центральное отверстие в главном зеркале [30].

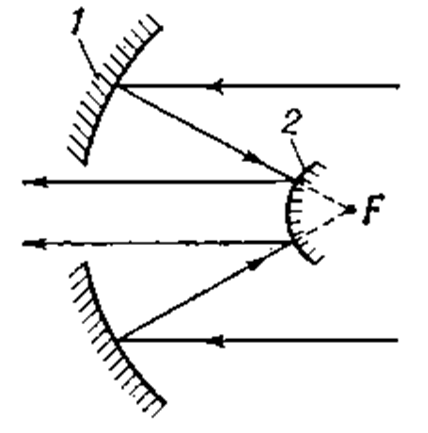


Рисунок - Система рефлектора Мерсенна:  
1 – главное зеркало; 2 – вторичное зеркало, F – фокус

В данной работе создаётся зеркальная система типа Мерсенна, где диаметр входного зрачка D равен 20 мм, диаметр выходного зрачка D' равен 100 мм, расстояние между зеркалами d ≤ 300 мм. Расчёты проводились в программе ZEMAX.

1. Габаритный расчёт

Увеличение системы определяется по формуле:

|  |  |
| --- | --- |
| , | (21) |

где D и D' диаметры входного и выходного зрачка соответственно, f'1 и f'2 фокусные расстояния.

Таким образом, фокусные расстояния зеркал связаны между собой зависимостью:

|  |  |
| --- | --- |
| , | (22) |

Система Мерсенна афокальная, следовательно, расстояние между зеркалами d выражается следующей формулой:

|  |  |
| --- | --- |
| , | (23) |

Из формулы (23) можно выразить второе уравнение, связывающее между собой фокусные расстояния зеркал:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (24) |

Для расчета примем расстояние d = –150 мм. Тогда:

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

Для нахождения фокусных расстояний решим систему уравнений:

|  |  |
| --- | --- |
| ⇒ ⇒ | (25) |

Отсюда находим фокусное расстояние вторичного зеркала:

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

Радиусы кривизны зеркал находятся по формулам:

Радиус кривизны вторичного зеркала R1:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (26) |

Радиус кривизны главного зеркала R2:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (27) |

Система Мерсенна имеет параболоидальные зеркала, вследствие чего коэффициенты деформации будут у обоих зеркал равны k = –1.

Таблица 7 - Конструктивные параметры системы

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Радиус кривизны R, мм | Расстояние d, мм | Материал | Коэффициент деформации **k** |
| 75 | -150 | Зеркало | -1 |
| 375 |  | Зеркало | -1 |

1. Принципиальная оптическая схема хода лучей

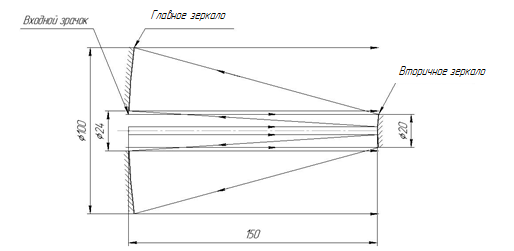


Рисунок - Принципиальная оптическая схема

Диаметр экранированной зоны главного зеркала выбран равным 24 мм из конструктивных соображений. Входной зрачок расположен в плоскости главного зеркала для размещения линзовой лазерной коллимирующей системы.

Корпус телескопического узла, состоящий из главного и вторичного зеркала, смоделирован в среде SolidWorks. Масса с учётом выбранных материалов составляет 1.35 кг.

## Разделение пучков на два канала

В разрабатываемой системе требуется, чтобы пучок, который принимается приёмным телескопом, делился на два канала, чтобы один из них шёл на FTIR, а второй на одноэлементный приемник второго канала, который служит приемником лидара. Деление пучков производится применением плоскопараллельной пластиной с покрытием, обеспечивающим заданное по своим характеристикам соотношение отраженного и проходящего потока излучения. Требуется обеспечить 95% отражение потока и 100% на просветление, при этом пластина наклонена по отношению к оптической оси на 45°. После отражения излучения от светоделительной пластины на приёмник лидара требуется установить линзу для того, чтобы излучение фокусировалось на приёмную площадку приёмника. Материал пластины выберем стекло марки К8.Одноэлементный приемник первого канала FTIR (пропускание излучения) HgCdTe c площадкой диаметром 1 мм. Одноэлементный приемник второго канала на основе InGaAs служит приемником лидара и имеет диаметр площадки 1 мм.

Из конструктивных соображений вынесем наклонную светоделительную пластину на расстояние 70 мм от центра главного зеркала. Расчет производится в программе Zemax. Минимальные габариты наклонной пластины составляют 29 х 36 мм. Толщина наклонной пластины выбрана 1/8 от максимальной длины оси эллипса и составляет d = 3 мм. Поперечное смещение оси вследствие влияния наклонной пластины составило Δ = +1.65 мм.

Для фокусировки излучения, приходящего после зеркальной системы, требуется ввести в ход лучей положительную линзу после светоделительной пластины, как в канале отраженного излучения, так и проходящего излучения. Длина волны излучения составляет λ = 1.5 мкм. Относительное отверстие общей системы выбрано произвольно и равно 1:2.0. Таким образом, дифракционный предел системы составит:

|  |  |
| --- | --- |
| Dairy = 2.44·λ·2.0 = 7.3 мкм | (28) |

Фокусное расстояние системы определяется по формуле:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (29) |

Приняв фокусное расстояние линзы равным 80 мм, получаем f' = 400 мм. Линзу канала для лидара необходимо разместить не слишком далеко, чтобы не увеличивать габариты всей системы, и не слишком близко, чтобы не допустить «врезания» элементов оправы пластины с элементами оправы линз. Оптимальным выбрано расстояние равное 30 мм.

Для устранения сферической аберрации одиночной линзы в монохроматическом пучке существуют менисковые системы с первой по ходу луча асферической поверхностью (эллипсоид вращения) и апланатической второй поверхностью – поверхностью, не преломляющей лучи после ее прохождения. Такое свойство позволяет полностью устранить сферическую аберрацию и создать идеальное дифракционное изображение пятна рассеяния на приемнике. В качестве материала линзы применена марка К8. Выполнив расчет в программе Zemax, получаем следующие конструктивные параметры системы:

|  |  |
| --- | --- |
| Эффективное фокусное расстояние системы, f': | 398.8 мм |
| Рабочее относительное отверстие, D/f': | 1:1.86 |
| Задний фокальный отрезок, s': | 70.31 мм |

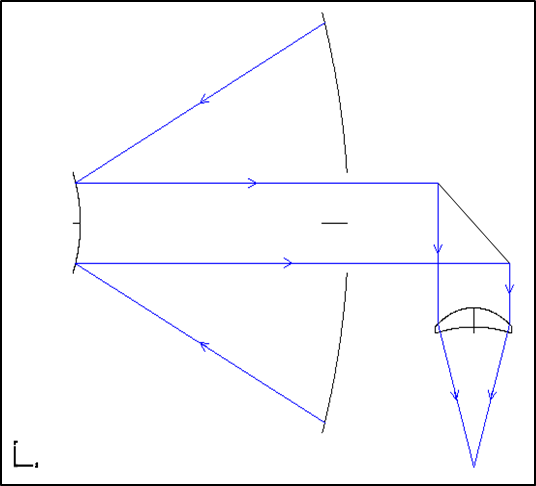


Рисунок - Ход лучей в оптической системе отражающее излучение

Таблица 9 - Конструктивные параметры системы в канале, отражающим излучение

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Радиус кривизны R, мм | Расстояние d, мм | Материал | Коэффициент деформации **k** | Световой диаметр, мм |
| 375 | -150 | Зеркало | -1 | 100 |
| 75 | 220 | Зеркало | -1 | 20 |
| ∞ | 30 | Зеркало |  | 29 х 36 |
| 27.04 | 9.6 | К8 | -0.444011 |
| 73.79 | 70.31 |  |  | 40 |
|  |  |  |  | 37.8 |

Так же было иллюстрирована принципиальная оптическая схема хода лучей в приборе, представленная на рисунке 15:

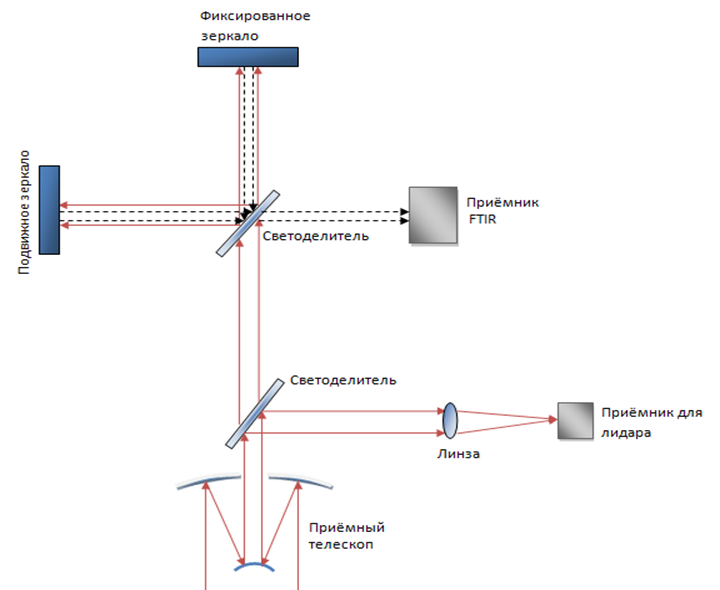


Рисунок - Принципиальная оптическая схема

В данной работе так же проводился расчёт аберрации оптической системы (Рисунок 16,17).

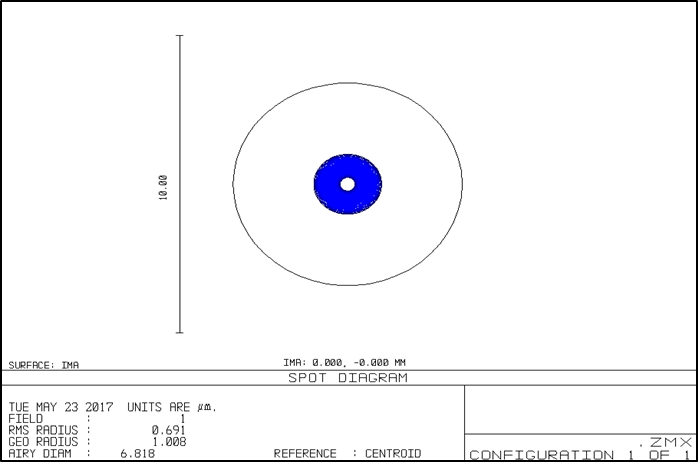


Рисунок - Диаграмма пятна рассеяния осевого пучка.   
Диаметр дифракционного пятна Эйри равен 6.8 мкм

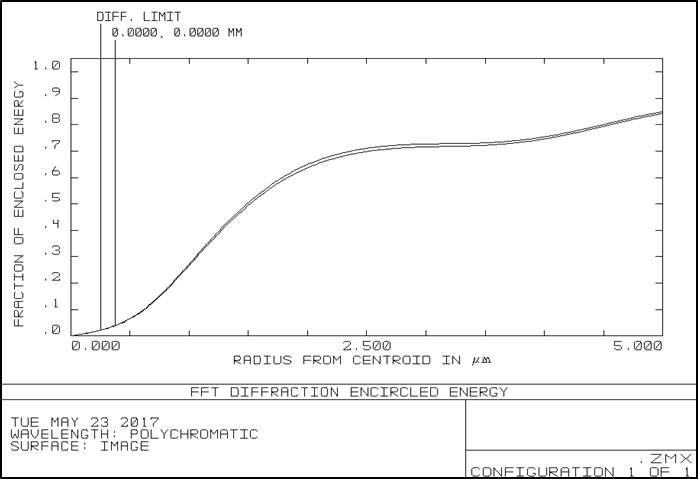


Рисунок - Концентрация энергии. 80% энергии содержится в пятне диаметром 9 мкм

## Компоновка устройств и визуализация модели

Основной элемент конструкции – корпус, на который будут крепиться все остальные компоненты.

Корпус состоит из основания, который соединён боковыми крышками уголками, в которые вкручиваются винты. К основанию корпуса крепятся светоделитель и приёмник для лидара, которые также закреплены в специальных корпусах. К передней крышке прикреплён волоконный лазер и выход для его излучения, так же на передней крышке располагается апертура приёмного телескопа. На задней крышке располагается подложка, на которой закреплён Фурье – спектрометр. На боковой крышке расположена камера и её объектив. Внешний и внутренний вид лидара представлен на рисунке 18 и 19 соответственно.



Рисунок - Внешний вид лидара

В корпусе приёмного телескопа расположены главное и вторичное зеркало, которые закреплены пружинными и резьбовыми кольцами. Приёмный телескоп в разрезе представлен на рисунке 20. Габаритные характеристики приёмного телескопа указаны на чертеже общего вида в Приложении А, в котором так же имеются чертежи рабочего вида зеркал.

После того, как приёмный телескоп принял излучение, оно идёт на светоделительную пластину. Светоделительная пластина закреплена в оправе с формой ласточкиного хвоста, с помощью фторопластовой призмы, которая будет вставляться с натягом между металлом и стеклом, для компенсации термических погрешностей.

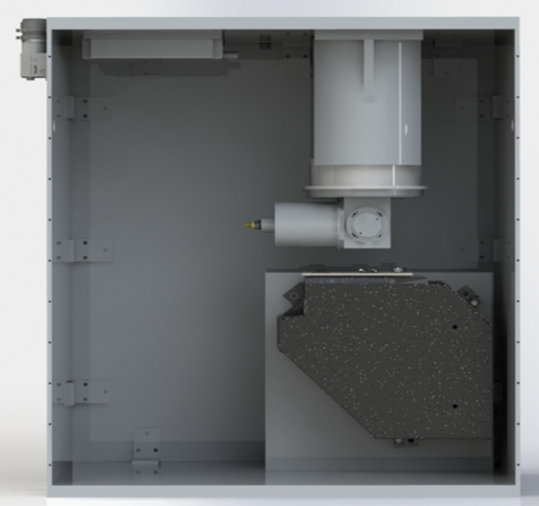


Рисунок - Внутренний вид лидара

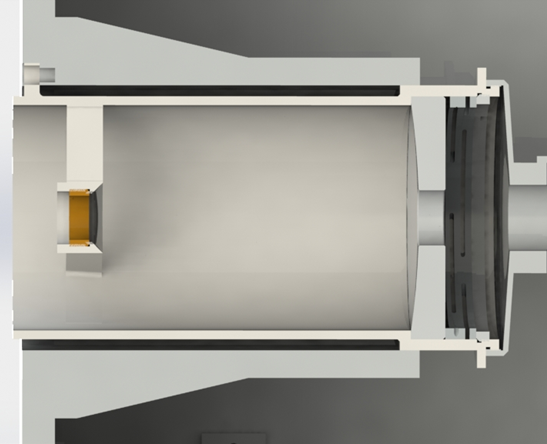


Рисунок - Приёмный телескоп в разрезе

После отражения излучения от светоделителя оно направляется на линзу и фокусируется для того, чтобы излучение попадало на фотоприёмную площадку. Линза, расположенная в корпусе, светоделитель и приёмник в разрезе представлены на рисунке 21.

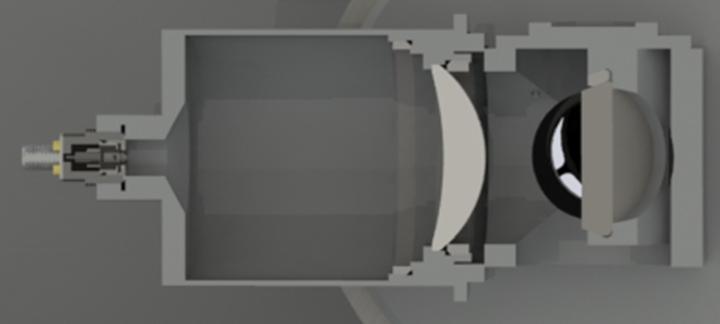
****

Рисунок - Светоделитель, линза и приёмник в разрезе

Габаритные характеристики лидара представлены на чертеже общего вида в Приложении А.

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе изучения методов дистанционного мониторинга концентрации выбросов оксидов азота и серы, содержащихся в атмосфере на территории морских портов, и проведённых вычислительных экспериментов сделаны выводы и получены следующие результаты:

1. Проведены теоретические исследования, доказана целесообразность использования дистанционного лазерного метода для текущего контроля оксидов азота и серы, содержащихся в составе отработавших газов судовых дизельных установок, и мониторинга загрязнений указанными выбросами окружающей суда атмосфере.
2. Рассмотрены методы дистанционного зондирования, системы мониторинга их физические основы, особенности и принципы действия. Был произведён обзор рынка пассивных ИК – Фурье спектрометров.
3. Был произведён расчёт лидарного уравнения с заданными характеристиками выбранных приборов, смоделировано загрязнённое облако в атмосфере, и выявлено, что система будет видеть данное облако на дистанции 3000 м, и также для разрабатываемой системы был выявлен порог чувствительности, который будет принимать сигналы с мощностями от 10-9 и выше. Установлено, что оптимальный режим работы системы обеспечивается с помощью импульсного эрбиевого волоконного лазера с длинной волны 1.5 мкм, которая является безопасная для глаз.
4. На основе исследований и вычислительного эксперимента определена эквивалентная шуму разность температур и по ней пороговые значения детектирования концентраций оксидов азота и серы, а также оптимальные режимы и параметры работы лазерных систем дистанционного замера концентрации указанных загрязняющих веществ.
5. Была произведена визуализация 3D модели разрабатываемого прибора в программе SolidWorks, сделана конструкторская документация.

# БИБЛИОГРАФИЯ

1. Туркин А.В., Шеманин В.Г., Туркин В.А. Лидары дифференциального поглощения и рассеяния для зондирования атмосферы // Сборник научных трудов. Вып. 13/ Отв. Ред. В.В. Демьянов. – Новороссийск: МГА им. адм. Ф.Ф. Ушакова, 2009. – С. 84 – 85;
2. Туркин В.А., Туркин А.А., Шеманин В.Г. Экологический мониторинг припортовых акваторий с использованием лазерной системы. – Транспортное образование и наука. Опыт, проблемы, перспективы // Труды Научно-практической конференции. – М: МИИТ, 2009. – С. 6 – 8;
3. Воронина Э.И., Сапожников Д.Ю., Шеманин В.Г. Система управления лидарной станцией мониторинга загрязнений атмосферы промышленного района // Безопасность жизнедеятельности. – 2003. - №9. – С. 34 – 37;
4. Парфёнов В.А. Лазерные методы в экологии [текст]: учебное пособие для вузов / В.А. Парфёнов, Спб: СПбГУ ИТМО, 2009. – 95 с.;
5. Ландсберг Г.С. Оптика. – М.:Наука, 1976. – С. 538 – 606, 711 – 768;
6. Сутырина, Е.Н. Дистанционное зондирование Земли / Е.Н. Сутырина. – Иркутск.: Изд-во ИГУ, 2013. – 165 с.;
7. Inaba H., Kobayasi T., Digest of Technical Papers // Int. Quant. Electron. Conf., Kyoto, Japan. – 1970. - No. 12-1;
8. Kobayasi T., Inaba H., Find Laser Beam Technology // 11th Symp. Electron.- 1971. -San Fransisco Press. - P.385;
9. Kobayasi T., Inaba H. // Appl. Phys. Lett. – 1970. – 17. – 139;
10. Gravel J.-F, Luo Q., Boudreau D., Tang X. P., and Chin S. L., Sensing of Halocarbons Using Femtosecond Laser-Induced Fluorescence // Analytical Chemistry. - 2004. - Vol. 76. - No. 16. - РР. 4799-4805;
11. Nakahara S., Ito K., Ito S., Fuke A., Komatsu S., Inaba H., Kobayasi T.// OptoElectron.- 1972.-Vol. 4. – P.169;
12. Thomas J. McGee, Richard A. Ferrare, David N. Whiteman, James J. Butler, John F. Burris and Melody A. Owens, Lidar measurements of stratospheric 60 ozone during the STOIC campaign // Journal of Geophys. Res -1995. - Vol. 100. - No 5.- PP. 9255-9262;
13. Leonard D. A., Laser Raman Gas Diagnostics // Opt. Quant. Electron.- 1975.- Vol.7. – P.197;
14. Fiocco G., Smullin L.D., Detection of Scattering Layers in the Upper Atmosphere (60-140 km) // Optical Radar. Nature. – 1963. – vol. 199.- P.1275- 1276;
15. R.M. Measures, M. Bristow: The Development of a Laser Fluorosensor for Remote Environmental Probing.Can. Aeron. Space J. 17 (1971) 421-422;
16. Привалов В., Шеманин В. Зондирование молекул йода самолётным флуоресцентным лидаром. – Фотоника, 2011, №1, стр 12-14;
17. Кондратьев К.Я. Атмосферный аэрозоль как климатообразующий компонент атмосферы. 1. Свойства аэрозоля различных типов. // Оптика атмосферы и океана. 2004. Т. 17. № 01. С. 5-24;
18. Коханенко Г., Макогон М., Флуоресцентно-аэрозольный лидар // «Фаран- М1» - Фотоника 2010, № 4;
19. Донченко В.К., Мельникова И.Н., Борейшо А.С., Морозов А.В. Использование мобильных лидарных комплексов для обратной задачи экологического мониторинга // Экология и космос. Сб. СПб: Петродворец, 2010. С. 101–110;
20. Ansmann A., Riebesell M., Wandinger U., Weitkamp C., Voss E., Lahmann W., Michaelis W. Combined Raman elastic-backscatter, and lidar ratio. Appl. Phys. B 55, 18, 1992;
21. Рябухо В.П., Лякин Д.В. Эффекты продольной пространственной когерентности света в интерференционном эксперименте // Оптика и спектроскопия. – 2005. – Т.98, В.2. – С.309-320;
22. Erik R. Deutsch, Petros Kotidis, Ninghui Zhu, Anish K. Goyal. – Active and passive infared spectroscopy for the detection of environmental threas, 2015 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.blockeng.com/technology/active.pdf, св. яз. англ. (дата обращения 17.05.2017);
23. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование / Р. Межерис. – М.: Мир, 1987. – 510 с.;
24. Ansmann A., Muller D. Lidar and atmospheric aerosol particles. – Springer Series in Optical Sciences, 2005 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.springerlink.com/content/j75258113x74r713/fulltext.pdf, св. яз. англ. (дата обращения 22.05.2017);
25. Андреас, Б., Рэинэр, Д., Роланд, Х. Дистанционное зондирование атмосферного загрязнения пассивной ИК – Фурье спектроскопии: перевод с англ. 1998. – 11 с. [Andreas Beil, Rainer Daum, Roland Harig. Remote sensing of atmospheric pollution by passive FTIR spectrometry; Technical University of Hamburg-Harburg. - Hamburg, Germany, 1998. – 11 с.;
26. Beil A., Daum R., Matz G., Harig R. Remote sensing of atmospheric pollution by passive FTIR spectrometry. In: Schafer K., ed. Spectroscopic Atmospheric Environmental Monitoring Techniques. Proceedings of SPIE, 1998, vol. 3493, pp. 32-43;
27. Дж. Ллойд. Системы тепловидения. Перевод с английского. Банд. техн. наук. Н. В. Ваcильченко. Под редакцией канд. техн. наук. А. И. Горячёва. – Москва.:Изд. Мир. 1978 г. – с. 162 – 164;
28. Сутырина, Е.Н. Дистанционное зондирование Земли / Е.Н. Сутырина. – Иркутск.: Изд-во ИГУ, 2013. – 165 с.;
29. Голубев И.Р. Окружающая среда и транспорт: учебн. пособие для вузов / И.Р. Голубев, Ю.В. Новиков. – М.: Транспорт, 1987. – 96 с.;
30. Сизых В.А. Судовые энергетические установки: Учебник. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1989. – 263 с.;
31. Михельсон Н. Н. «Оптические телескопы. Теория и конструкция». М., Наука. 1976 г.

# ПРИЛОЖЕНИЕ А. КОНСТРУКТОРСКАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ

В состав конструкторской документации входит сборочный чертёж приёмного телескопа, рабочие чертежи зеркал, схема деления, сборочный чертеж лидара.