





## Содержание

Введение	3
1 Загрязняющие вещества в атмосфере	4
1.1 Угарный газ	8
1.2 Оксиды азота	10
1.3 Оксиды серы	12
2 Виды газовой-аэрозольных датчиков и принципы их работы	15
2.1 Каталитический газовый сенсор	16
2.2 Термоэлектрический газовый сенсор	19
2.3 Теплопроводный газовый сенсор	19
2.4 Электрохимический газовый сенсор	21
2.5 Оптический газовый сенсор	24
2.6 Полупроводниковый газовый сенсор	25
2.7 Акустический газовый сенсор	27
2.8 Счетчики аэрозольных частиц	29
3 Аэромобильная платформа газовой-аэрозольного анализатора	30
3.1 Платформа Arduino	30
3.2 Беспилотные летательные аппараты	38
4 Результаты тестовых измерений загрязняющих веществ	42
4.1 Датчик угарного газа MQ-7	42
4.2 Результаты измерений профиля содержания угарного газа	43
4.3 Результаты измерений приземного содержания угарного газа	45
Заключение	47
Список использованной литературы	48

## Введение

На данный момент человечество переживает эпоху стремительного научно-технического прогресса, непосредственно затрагивающего все сферы его деятельности. Этот прогресс невозможен без развития энергетики, а значит и увеличения расхода топливных ресурсов, с сопутствующим ему росту выброса загрязняющих веществ в атмосферу, вдовесок к увеличивающейся с каждым годом доле автомобилистов в России. В связи с этими факторами встает вопрос о необходимости повсеместного мониторинга и контроля атмосферы, дабы контролировать степень загрязненности воздушной среды и вовремя реагировать на возникающие проблемы. Как одним из возможных путей разрешения данной ситуации мне видится использование в данной среде мультикоптеров, потенциал которых частично начал раскрываться лишь в последнее десятилетие. Ввиду своей возможности перемещения по воздуху и мобильности, на его основе можно создать летающий комплекс, который будет собирать необходимую метеоинформацию, регистрировать различного рода загрязнения атмосферы, а также вести фото- и видеосъемку над заданной территорией и на любой высоте в пределах его технических возможностей. Цель работы - разработка концепции аэромобильного газово-аэрозольного анализатора.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. осуществить обзор существующих малогабаритных средств контроля загрязнений атмосферы;
2. сформулировать основные подходы к созданию аэромобильного анализатора;
3. провести тестовые измерения газовых загрязнений атмосферы.

Работа состоит из четырех глав, введения, заключения и списка использованных источников

## 1. Загрязняющие вещества в атмосфере

В настоящее время нижняя часть атмосферы, известная как «воздух», состоит главным образом из азота, кислорода и других газов и частиц. Состав находится под влиянием эволюции вида человека, как с точки зрения роста численности населения, так и в промышленном, сельскохозяйственном и бытовом развитии. Потребление энергии и техническая эволюция являются одной из основных причин антропогенного загрязнения, что приводит к изменению качества воздуха, превышению установленных в законодательстве пределов, адаптированных и модифицированных в соответствии с уровнем знаний, на постоянной основе. Антропогенные источники загрязнения истощают свободную атмосферу и превышают естественную возможность экосистемы адаптироваться или покрывать изменения состава воздуха. Следует отметить, что все созданные человеком источники (промышленности, сельское хозяйство, транспорт, бытовые источники и т. д.) вносят вклад в уровень качества воздуха в дополнение к естественным источникам, существовавшим с момента создания Земли и находящимися в прямой зависимости от этого.

Население, достигшее в настоящее время отметки в 7.5 миллиардов человек, по прогнозам достигнет 8 миллиардов к 2020 году и будет стабилизироваться приблизительно к количеству 10 миллиардов к 2050 году [1]. 90% будущего роста произойдет в развивающихся странах, и большая часть из них будет сосредоточена в городских районах. По своему характеру источники загрязнения воздуха могут быть классифицированы, главным образом, как физические, химические и биологические источники, во-вторых, как природные и антропогенные источники.

Физическое загрязнение атмосферы является следствием ввода энергии, например, звуковой и тепловой. Наиболее значимыми физическими источниками загрязнения являются непосредственное тепловое загрязнение, природное или антропогенное. Местный климат изменяется за счет тепла,

производимого промышленностью, домашним хозяйством, сельским хозяйством и транспортом, в следствие чего воздух из нижней атмосферы будет иметь повышенную локальную температуру. Косвенное тепловое загрязнение является следствием парникового эффекта и имеет место в тропосфере и связано с химическим антропогенным загрязнением и его эволюцией в отношении парниковых газов.

Химическое загрязнение атмосферы является следствием поступления химических соединений поверх естественных компонентов воздуха и имеет естественное и искусственное происхождение. Однако природные источники химического загрязнения, такие как извержение вулканов, естественное разложение органических веществ или пожар (естественного происхождения), не представляют серьезной проблемы, поскольку они являются частью равновесия естественной среды. Напротив же, антропогенное химическое вызывает серьезную озабоченность, поскольку его источники растут по количеству и концентрации с ростом мирового населения и постоянным увеличением спроса на энергию. Антропогенное химическое загрязнение не имеет границ и независимо от места, в котором случился выброс загрязняющих веществ в атмосферу, так как априори повоздействует на глобальную окружающую среду. Наиболее значимыми источниками являются сжигание ископаемого топлива для производства энергии (тепла и электроэнергии), крупные промышленные процессы (такие как металлургическая или строительная промышленность) и транспортировки. Антропогенные источники химического загрязнения классифицируются на две основные группы: стационарные и мобильные [2]. Четыре основные группы газообразных загрязнителей воздуха по историческому значению, концентрации и общему воздействию на растения и животных (включая людей) представляют собой диоксид серы ( $\text{SO}_2$ ), оксиды азота ( $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ), диоксид углерода ( $\text{CO}_2$ ) и озон ( $\text{O}_3$ ). Диоксид серы и оксид азота ( $\text{NO}$ ) являются первичными загрязнителями

- они испускаются непосредственно из источников. Наиболее важные группы антропогенных источников загрязнения воздуха определяются промышленной обработкой, жилыми системами отопления, транспортными (наземными, морскими и воздушными) и сельскохозяйственными системами.

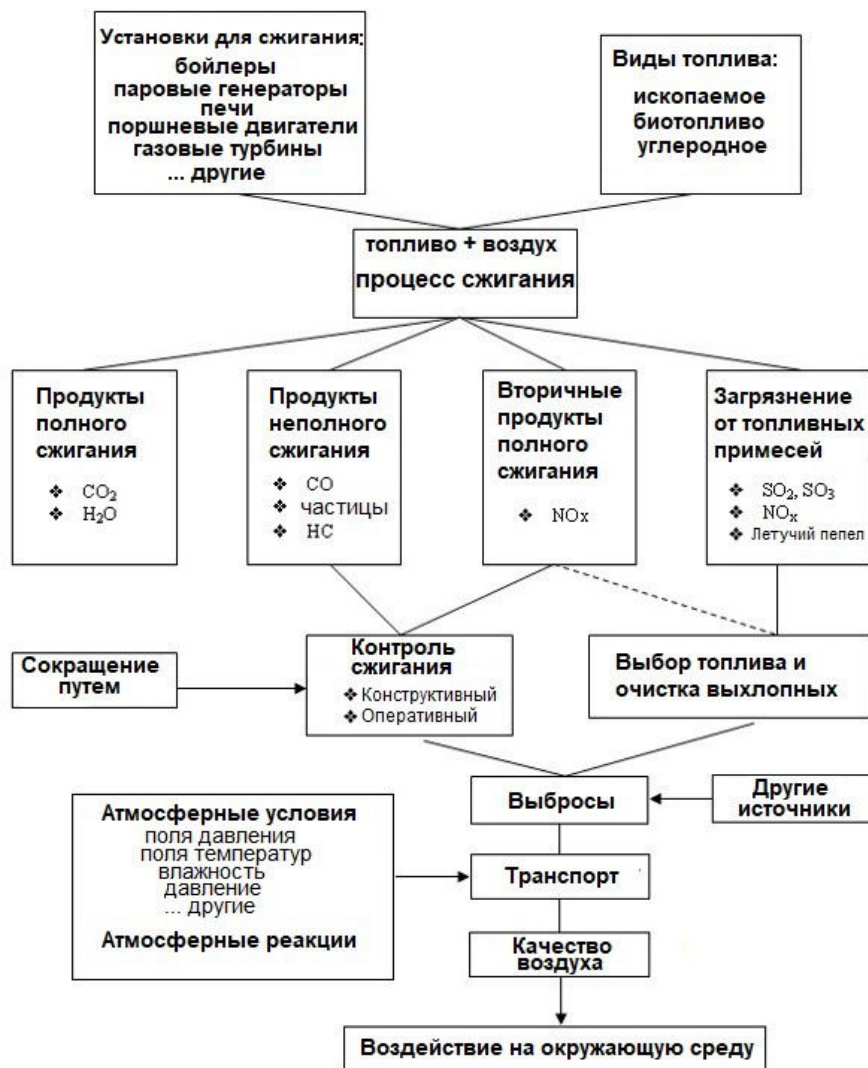
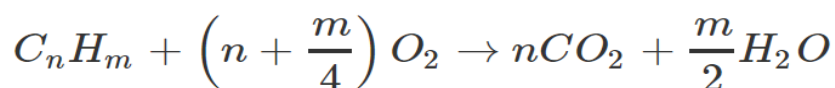


Рисунок 1.1 Зависимость качества воздуха от топлива и вида сжигания [3]

Большинство загрязняющих веществ являются прямым результатом процесса сжигания на крупных электростанциях и поршневых двигателях, поэтому первые шаги по уменьшению концентрации загрязнителей из атмосферы являются контроль и сокращение выбросов из этих источников. В идеальном случае процесса горения выхлопные газы образуются только из CO2

и H<sub>2</sub>O. Для достижения полного сгорания необходимо, чтобы соотношение воздух-топливо (различное для каждого типа камеры сгорания) было постоянным во всей камере сгорания, но это невозможно из-за ограничений, вызванных конструкцией камеры сгорания. На рисунке 1.1 дается краткое и упрощенное соотношение между топливом, сжиганием, продуктами сгорания (загрязнителями) и качеством воздуха.

Ископаемые виды топлива (твердые, жидкие или газообразные) в основном образованы углеродом и водородом в различных соотношениях. Во время сгорания этого топлива углерод и водород реагируют с кислородом, при сопутствующем образованием двуокиси углерода и воды. Из-за неполного сгорания или примесей, вошедших в состав топлива, к примеру таких как азот, сера, органических соединений, тяжелых металлов и других соединений, кроме CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>O, будут образовываться другие химические соединения, которые опасны как для человека, так и для окружающей среды. Приведенное уравнение показывает продукты полного сгорания идеального топлива, образованного только из углерода и водорода:



С экологической точки зрения мы можем различать несколько типов загрязнителей воздуха, в зависимости от того, как они влияют на экосистему. Загрязнители, которые имеют непосредственное влияние на здоровье человека:

- оксиды азота (NO<sub>x</sub>), окись углерода (CO), оксиды серы (SO<sub>2</sub>) или летучий органический углерод (VOC);
- загрязнители, воздействующие на растительность (косвенно на человека): оксиды азота (NO<sub>x</sub>), оксиды серы (SO<sub>2</sub>) и химические соединения хлора и водорода;
- загрязнители, которые образуют кислоты, такие как (NO<sub>x</sub>) и оксиды



серы (SO<sub>2</sub>), особенно когда они находятся в высоких концентрациях и в то же время во влажной атмосфере;

- устойчивые загрязнители с длительным жизненным циклом и накопленные в почве, которые путем передачи через биологическую цепь растение-животное-человек или длительной аккумуляции в организме будут иметь серьезные последствия для здоровья человека;
- загрязнителей, имеющих прямое влияние на климат, таких как углекислый газ (CO<sub>2</sub>) и метан (CH<sub>4</sub>), оказывающих серьезное воздействие на проблемы глобального потепления.

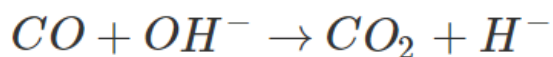
Подробнее рассмотрим газы, представляющие наибольшую угрозу для здоровья человека.

### 1.1 Угарный газ

Оксид углерода - это непахучий, бесцветный и токсичный газ. Поскольку его невозможно увидеть, ощутить на вкус или почувствовать запах токсичных паров, СО может убить вас, прежде чем вы осознаете, что находитесь в его окружении. При более низких уровнях воздействия СО оказывает слабый эффект, который часто принимают за грипп. Его симптомы включают головные боли, головокружение, дезориентацию, тошноту и усталость. Воздействие воздействия СО может значительно варьироваться от человека к человеку в зависимости от возраста, общего состояния здоровья, концентрации и продолжительности воздействия. Угарный газ в основном производится в качестве промежуточного продукта процессов горения в поршневых двигателях и котлах. Окисление СО в СО<sub>2</sub> требует температуры минимум 990 К и достаточного стационарного времени в камере сгорания. Если температура горения недостаточно высока или равномерна внутри камеры сгорания, в момент выброса выхлопных газов, некоторая часть СО может не окисляться. Зависимость между некоторыми загрязняющими веществами, содержанием

кислорода в топливной смеси и избытком воздуха показана на рисунке 1.2.

Окись углерода окисляется в атмосфере до  $CO_2$  при реакции с  $OH$ -радикалами:



В присутствии фотонов световой энергии происходит реакция образования еще одного опасного для человека химического вещества — озона.



Влияние углекислого газа на здоровье человека обусловлено тем, что  $CO$  попадает в кровоток через легкие и прикрепляется к гемоглобину ( $Hb$ ), кислородному носителю тела, образуя карбоксигемоглобин ( $COHb$ ), тем самым снижая доставку кислорода ( $O_2$ ) до органов и тканей организма. Высокие концентрации  $COHb$  ядовиты. Эффекты центральной нервной системы (ЦНС) у лиц, страдающих острым отравлением  $CO$ , охватывают широкий диапазон, в зависимости от тяжести воздействия: головная боль, головокружение, слабость, тошнота, рвота, дезориентация, спутанность сознания, обморок и кома. При более низких концентрациях эффекты ЦНС включают в себя снижение зрительного восприятия, ловкости рук, обучения, ходовых качеств и уровня внимания. Окись углерода ( $CO$ ) может быть причиной более половины смертельных отравлений, о которых сообщалось во многих странах: смертельные случаи также значительно недоучитываются или ошибочно диагностируются медицинскими специалистами. Таким образом, точное количество людей, которые страдали от интоксикации угарным газом, неизвестно. В заключение, отравление  $CO$  происходит часто, предполагает осложнения и часто игнорируется, что влечет серьезные последствия, в том числе немедленную смерть.

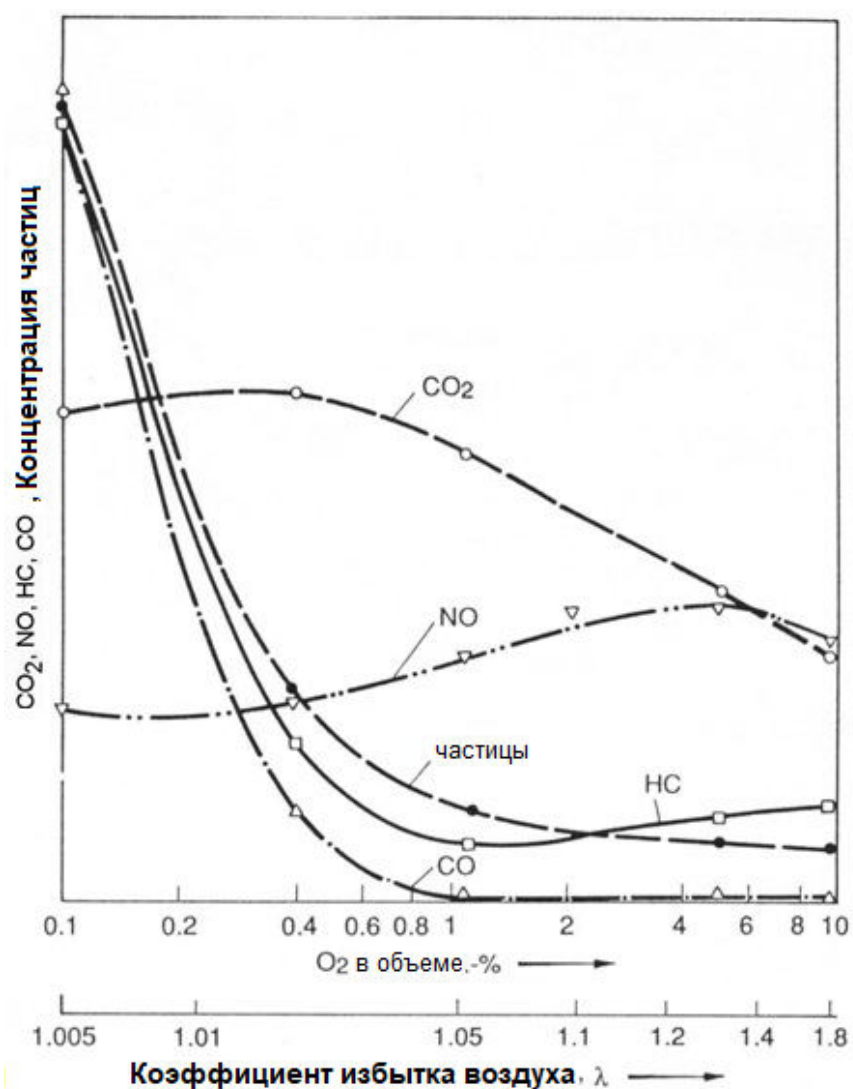


Рисунок 1.2 Зависимость продуктов сгорания от топливного состава [3]

### 1.2 Оксиды азота

Концентрация закиси азота в атмосфере неуклонно растет с доиндустриальных времен, от ~ 280 до ~ 320 ppbv сегодня. Оценочные выбросы в атмосферу составляют 13.8 Tg (тетраграммы) азота в год, причем ~ 70% вырабатывается процессами нитрификации и денитрификации в нетронутых земных условиях и в мировом океане. Около 3 Tg азота в год, или ~ 8%, связано с сельскохозяйственной обработкой почвы, удобрениями и отходами животных. NO<sub>x</sub> образуется при процессе горения в сжигательных

установках при высоких температурах путем окисления содержащегося в топливе азота и воздуха для горения. На первой стадии образуется только NO, тогда как NO<sub>2</sub>, в основном, образуется после сгорания при процессе выхлопа в атмосфере и большем количестве O<sub>2</sub>. Основными антропогенными источниками оксидов азота являются автомобильный транспорт и общественный электро- и теплоэнергетический сектор.

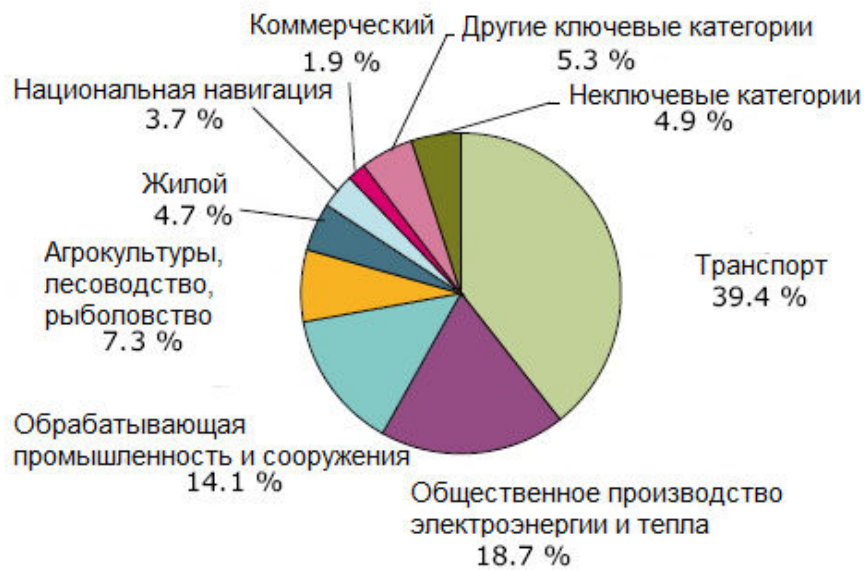


Рисунок 1.3 Источники выбросов оксидов азота (Европа, 2006 г.) [4]

Повышенный атмосферный уровень NO<sub>2</sub> вызывает две основные проблемы окружающей среды: истощение O<sub>3</sub> в стратосфере и глобальное потепление, вызванное его тепловой поглощаемостью. Существуют три механизма образования оксида азота: термический механизм, быстрый механизм и образование NO<sub>x</sub> из топливного азота.

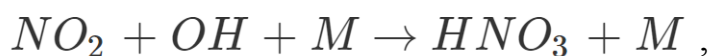
Тепловой механизм образования оксида азота при горении был впервые изучен Зельдовичем. Тепловой механизм возникает в камере сгорания в областях с более высокой концентрацией кислорода или в выхлопных газах, когда азот реагирует со свободными атомами кислорода. При сжигании в парогенераторах крупных электростанций с установкой, где зола выводится в

сухом состоянии, вклад теплового механизма NO<sub>x</sub> в общее образование NO<sub>x</sub> составляет до 20%. Для установок, где зола откачивается в жидком состоянии, тепловой выброс NO<sub>x</sub> составляет до 50%.

В областях, где сгорание происходит с низким содержанием кислорода, оксид азота может быть образован реакциями между молекулярным азотом N<sub>2</sub> и радикалами, такими как CH и CN. Это явление впервые было обнаружено Фенимором. Большинство ученых согласны с тем, что быстрым механизмом образования NO можно пренебречь, поскольку атомный азот и CN-радикалы могут образовываться только в областях с очень низким соотношением воздух-топливо.

Механизм азотного топлива также основан на горении, но является более сложным, быстрым и частично неизвестным. Известно, что формируются первые радикалы CN и их эволюция в присутствии кислорода приводит к образованию NO. Решающими факторами в механизме азотного топлива являются содержание азота в топливе, концентрация кислорода в пламени горения, время реакции и температура пламени.

Важной является реакция окисления NO<sub>2</sub> в азотную кислоту HNO<sub>3</sub> в газовой фазе, поскольку она является основным источником кислотных дождей, благодаря ее диффузии в капельках воды.



где M — пассивный участник реакции.

#### 1.4 Оксиды серы

Все ископаемые виды топлива содержат серу, большая часть которой выделяется в виде диоксида серы во время сгорания. Почти весь антропогенный вклад серы связан с сжиганием ископаемого топлива. Различные виды топлива предлагают широкий диапазон содержания серы:

- нефть и ее побочные продукты содержат от 0.1% серы (парафин) и 3% (мазут) в виде сульфидов и тиолов. Бензин содержит незначительную серу в соотношении с общей массой выбросов, но при этом может возникнуть проблема запаха от конверсии в сероводород ( $H_2S$ ) на каталитических нейтрализаторах.
- уголь содержит 0,1-4% серы, главным образом в виде хлопьев железного пирита ( $FeS_2$ ). Среднее содержание серы в европейских резервуарах составляет 1.7%.
- природный газ (главным образом метан,  $CH_4$ ) может содержать до 40%  $H_2S$ , при добыче его из скважины. Сера очень эффективно извлекается на химическом заводе перед распределением, поэтому природный газ фактически не содержит серы.

По оценкам, глобальные выбросы двуокиси серы увеличились с 4 млн. тонн (с содержанием серы 2 млн. Тонн) в 1860 году, до 150 млн. тонн в 1990 году. Выбросы из США и Европы неуклонно возрастали до 1970-х годов, прежде чем они попали под контроль. Выбросы серы из более быстро растущего азиатского региона продолжали расти, в основном из-за сжигания угля. Выбросы из Китая теперь сопоставимы с выбросами из США, а в 1990 году выбросы из Китая, США и России составили более половины общего объема [5].

Доля естественных источников выброса оксидов серы в атмосферу в настоящее время сильно уступает человеческой, которая, главным образом, состоит из сжигания ископаемого топлива. Поскольку большая часть диметилсульфида поступает из океанов в южном полушарии, а большая часть человеческого  $SO_2$  из выбросов органического топлива в северном полушарии, мы также имеем географический раскол.

Антропогенный  $SO_2$  практически весь образуется при сжигании ископаемых видов топлива с соответствующим содержанием серы. Наиболее

важным является уголь, поскольку содержание серы в жидком и газообразном топливе может быть легко удалено перед сгоранием. Во время неполного сгорания с отсутствием кислорода при высоких температурах могут образовываться неразложимая сера и сероводород ( $H_2S$ ). Также водорода может возникать в процессе сгорания низкокачественных углей, таких как лигнит, или в выхлопных газах поршневых двигателей после каталитического восстановления, если двигатель работает при высоких нагрузках и низком соотношении воздух-топливо.

Во время сгорания  $SO_2$  может быть окислен до  $SO_3$ , который при содержании воды в дымовых газах образует серную кислоту  $H_2SO_4$ . Конверсия  $SO_2$  в  $SO_3$  увеличивается в присутствии ванадия оксидов железа при температурах свыше  $800\text{ }^\circ\text{C}$ . Выброшенный в атмосферу  $SO_2$  реагирует в пропорции 1-2%/час с кислородом и под действием ультрафиолетового излучения образует  $SO_3$ . Рисунок 4 представляет собой иллюстрированный вид некоторых атмосферных реакций для  $SO_2$  и исторических изменений выбросов  $SO_2$  в воздух.



Рисунок 1.4 Атмосферные реакции и изменение объёма выбросов  $SO_2$  со временем. [4]

На основании всего изложенного выше можно сделать вывод, что контроль содержания загрязняющих веществ в атмосфере является важной и неотъемлемой частью восстановления экологического баланса и поддержания нынешнего.

## 2. Виды газово-аэрозольных датчиков и принципы их работы

Газовые датчики в первую очередь относятся к химическим датчикам. Химический датчик содержит преобразователь и активный слой для конвертирования химической информации в другую электронную форму, такую как: изменение частоты, тока или напряжения. Окружающий воздух может содержать различную концентрацию газов, которые могут быть опасны для здоровья, поэтому очень важно контролировать наличие и концентрацию газов предоставляющих ту или иную угрозу. В принципе, традиционные методы обнаружения на основе систем, издающих звуковой сигнал для уведомления, в случае утечки вредного или ядовитого газа, не очень надежны, поскольку необходимо получение точных измерений концентрации данного газа в режиме реального времени. На данный момент существуют различные технологии для обнаружения газов, в том числе: полупроводниковые, каталитические, электрохимические, оптические и акустические датчики газов. Эксплуатационные характеристики каждого датчика основаны на нескольких свойствах, включая чувствительность, избирательность, ограничение обнаружения, время отклика и время восстановления. Чувствительность (S) датчика определяется как  $\Delta f / \Delta c$ , где  $\Delta c$  - изменение анализируемой концентрации. S выражается в Гц / млрд (Hz/ppm) или Гц / об.%. Селективность относится к характеристикам, которые определяют, может ли сенсор избирательно реагировать на аналит или группу аналитов. Предел обнаружения – самая низкая концентрация аналита, которая может быть



обнаружена датчиком в заданных условиях. Время отклика - это время, в течение которого датчик реагирует на шаг изменения концентрации. Время восстановления – это время, необходимое для возврата сигнала к его начальному значению. Факторы, которые делают датчик более привлекательными для использования в среде мониторинга атмосферы, включают в себя небольшой размер, низкую мощность потребления и беспроводную связь.

Рассмотрим подробнее различные типы датчиков и принцип их работы.

## 2.1 Каталитический газовый сенсор

Каталитические датчики используются уже почти столетие для обнаружения горючих газов. Первый датчик каталитического сжигания был открыт Джонсоном в 1923 году и использовался для обнаружения метана в шахтах. Большинство оксидов металлов и их соединений обладают каталитическим свойством. Горючие газовые смеси не горят до тех пор, пока они не достигнут определенной температуры воспламенения, но в присутствии определенного химического процесса газ начнет зажигаться даже при более низких значениях температуры. Этот процесс известен как каталитическое сжигание. Каталитические датчики газа делятся на два типа: тип пеллестора и термоэлектрический тип. Самый ранний прототип представлял из себя платиновую проволоку, используемую для создания эффективного нагрева и сильного сигнала, но, несмотря на отличные свойства платины, он является слабым катализатором для сжигания углеводородных газов. Температура, необходимая для обнаружения углеводородов, составляет от 900 до 1000 °С, но при этой температуре платина начинает испаряться и, как таковое, сопротивление платиновой проволоки увеличивается. Другой проблемой платины является то, что при температуре свыше 1000 °С платина становится

мягкой. Это можно устранить с помощью предварительного покрытия проволоки оксидами более стойких металлов или же полной заменой платины на сплав палладия, платины и тория. Рисунок 2.1 показывает каталитический датчик с покрытием оксидом металла. Покрытие делает датчик более прочным, стабильным и устойчивым к ударам и вибрациям.

В последнее время использование микросхем в каталитических датчиках обрело доминирующий характер, так как использование целой проволоки влечет за собой высокое потребление мощности. Этот тип датчиков обычно содержит каталитическую поверхность, покрытую конфоркой с небольшим платиновым резистором, который нагревает катализатор до очень высокой температуры, при которой могут воспламениться любые воспламеняющиеся газовые молекулы. Концентрации газа определяется путем контроля сопротивления платины, изменяющегося в результате повышения температуры. Эта конструкция была разработана Лей Шу (Lei Xu) и представляет собой двухлучевую микросхему, разработанную с использованием технологии MEMS (micro-electro-mechanical systems).

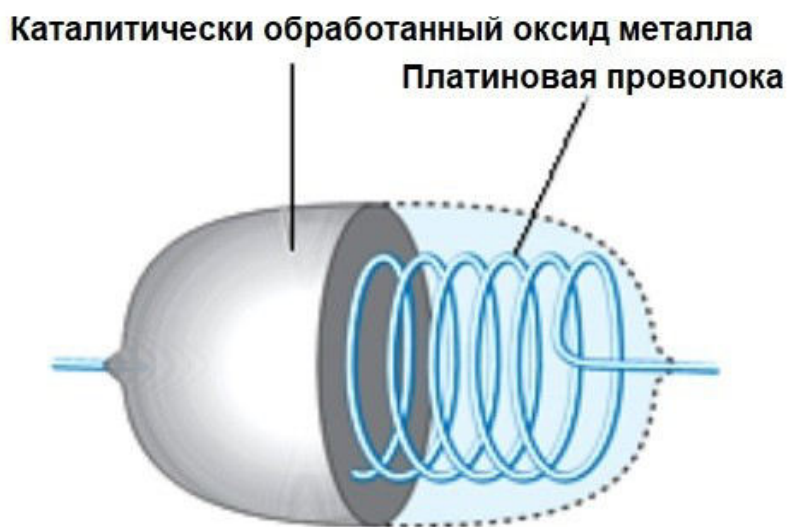


Рисунок 2.1 Каталитический газовый сенсор на основе платиновой проволоки и металлоксидного покрытия [6]

Каталитический датчик газа типа пеллистор состоит из двух платиновых катушек, которые имеют две функции: они одновременно служат как нагреватель, так и термометр сопротивления. Он также состоит из активного и неактивного шариков. Активный шарик активируется катализатором из металла, такого как платина или палладий. Неактивный шарик не имеет катализатора, но обычно выступает в качестве компенсирующего элемента. Использование напряжения питания схемы нагревает катушки, так что температура бортов достигает диапазона от 300 до 500 °С (в зависимости от измеряемого газа), что заставляет газ загораться и повышать температуру катушки детектора.

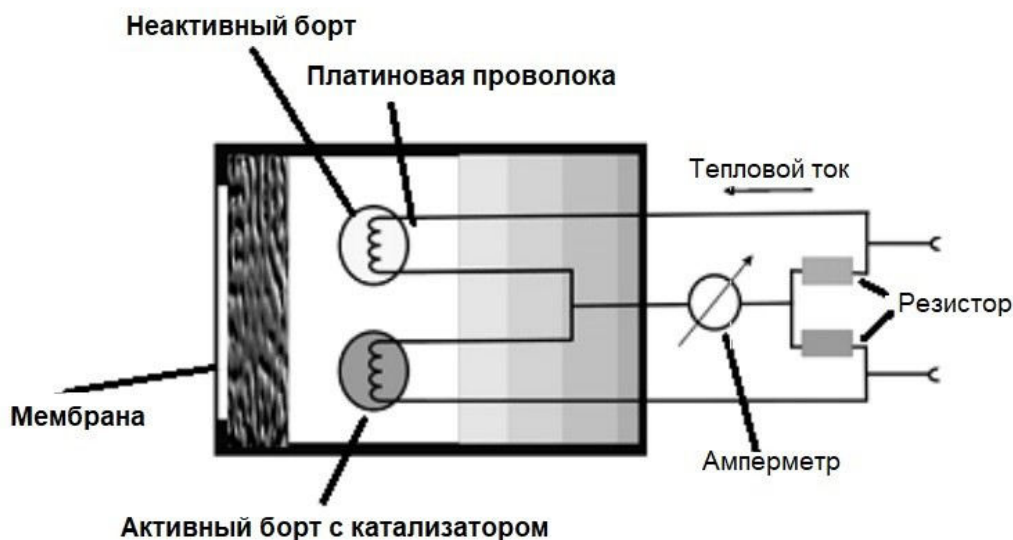


Рисунок 2.2 Каталитический газовый сенсор пеллисторного типа [6]

Это повышение температуры увеличивает сопротивление катушки и вызывает дисбаланс напряжения моста Уитстона, который составляет сигнал датчика. Пеллисторная технология стала свидетелем значительного развития с использованием для их изготовления техники микроэлектрохимических систем (MEMS) благодаря преимуществам интеграции, миниатюризации и снижения энергопотребления.

## 2.2 Термоэлектрический газовый сенсор

Самый ранний термоэлектрический датчик был разработан МакАлером в 1985 году для обнаружения горючего газа, такого как газообразный водород. Обнаружение водорода с помощью термоэлектрического датчика возможно путем создания электрического сигнала основанного на катализируемой реакции экзотермического окисления водорода. Термоэлектрические газовые сенсоры работают по принципу эффекта Зеебека. Эффект Зеебека возникает в результате разницы температур между двумя точками проводника или полупроводникового материала, что генерирует разность напряжений между ними. Термоэлектрические датчики изготовлены с использованием технологий поверхностной микрообработки. Принцип измерения термоэлектрических датчиков газа основан на адсорции газа. Для реализации этого принципа используются чувствительные термопары с парами висмута и хрома. Термоэлементы использовали для создания электрического потенциала, который пропорционален разности температур между горячим, под которым расположена каталитическая пленка, и холодным соединениями без необходимости потребления энергии.

## 2.3 Теплопроводный газовый сенсор

Измерения теплопроводности для газового анализа использовались на протяжении многих десятилетий. Обычно они использовались для обнаружения газов большей чем у воздуха теплопроводностью, таких как водород и метан, в то время как газы близкие в этом плане к воздуху не могут быть обнаружены, к примеру аммиак и монооксид углерода. Газы с теплопроводностью меньшей чем у воздуха, такие как бутан или CO<sub>2</sub>, трудно обнаружить с помощью этого метода из-за интерференции. Принцип работы

основан на измерении потерь тепла от более горячего тела к холодному элементу за счет теплопроводности. Первый тип газового датчика теплопроводности называется пеллисторным и состоит из двух инертных резистивных шариков с имплантированными в них терморезисторами. Чувствительный резистор обычно расположен в газовой камере, которая содержит эталонный газ. Два шарика соединены посредством схемы моста Уитстона, подобно каталитическому газовому сенсору. Принцип механизма обнаружения таков: когда резистор подвергается воздействию измеряемой газовой смеси, теряется тепло, которого либо больше, либо меньше, в зависимости от теплопроводности конкретного газа в составе смеси по отношению к эталонному газу. Это приводит к увеличению или уменьшению температуры шарика, а также изменению его сопротивления, которое измеряется как дисбаланс в мосту Уитстона. Второй тип датчика не требует использования камеры с эталонным газом. Он состоит из горячего и холодного элемента, которые имеют известную и постоянную разность температур. Тепло передается от горячего элемента к холодному элементу посредством теплопроводности исследуемого газа.

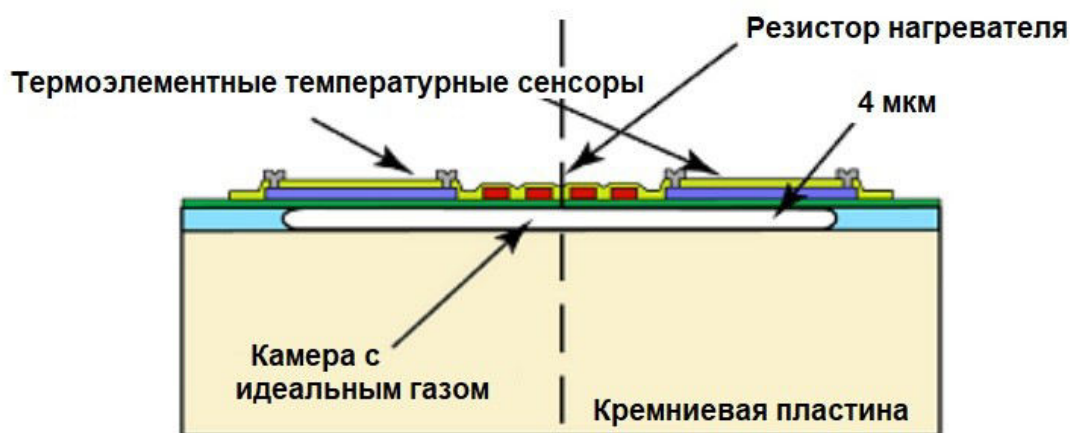


Рисунок 2.3 Микротеплопроводный газовый сенсор [6]

## 2.4 Электрохимический газовый сенсор

Электрохимические датчики работают на принципе взаимодействия измеряемого газа, рассеянного через пористую мембрану, с электродом, что создает электрический сигнал, пропорциональный концентрации газа. Типичный электрохимический газовый датчик состоит из чувствительного или рабочего электрода и противоэлектрода, которые разделены тонким слоем электролита. Перед тем, как газ контактирует с датчиком, он проходит через тонкое отверстие капиллярного типа, а затем диффундирует через гидрофобный барьер, прежде чем, наконец, достигает поверхности электрода. Функция этой мембраны заключается в предотвращении утечки жидкого электролита и генерировании достаточного электрического сигнала на чувствительном электроде. Он также включает в себя из сравнительный электрод, функция которого заключается в поддержании стабильного и постоянного потенциала на чувствительном электроде из-за непрерывных электрохимических реакций, протекающих на поверхности электрода. Электрохимическая реакция с целевым газом создает поток тока между чувствительным и противоэлектродными электродами. Электролит отвечает за перенос ионных зарядов через электрод. Самые ранние упоминания об электрохимических элементах были у Кохляуша в 1885 году и Хабера в начале 1900-х годов.

Электрохимический датчик можно использовать для измерения окиси углерода путем химической реакции следующим образом:



Как показано в этом уравнении, реакция окисления происходит на чувствительном электроде, CO<sub>2</sub> рассеивается в воздухе, и положительно заряженные ионы мигрируют в электролит.

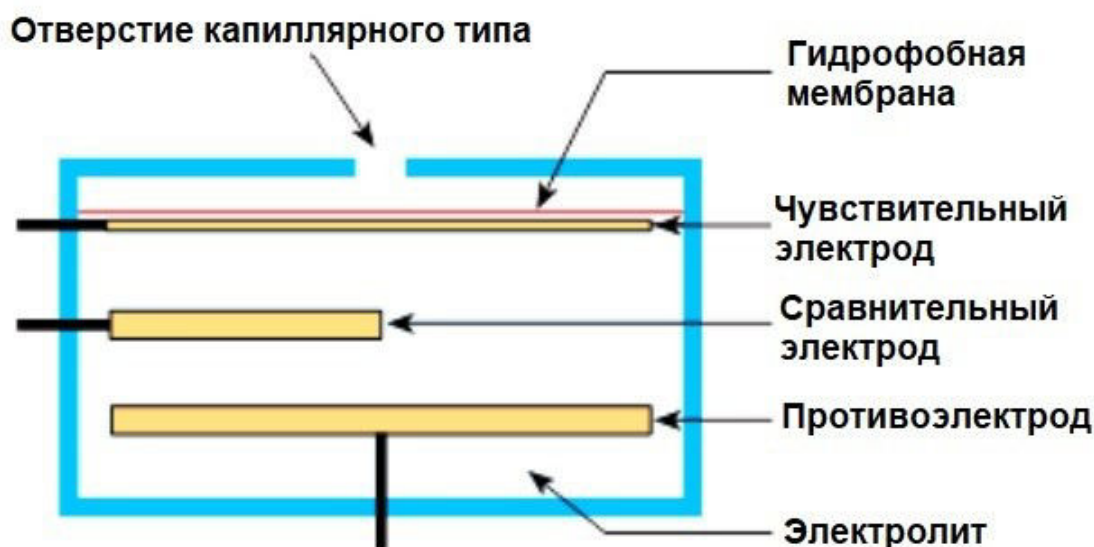
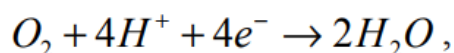


Рисунок 2.4 Электрохимический газовый сенсор [6]

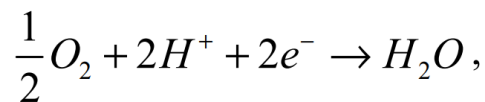


Реакция окисления уравнивается соответствующей реакцией восстановления на противозлектроде, как показано в предыдущем уравнении.



На одном электроде вода потребляется, когда генерируются электроны, а на другом электроде создается вода, когда электроны потребляются. Выброс монооксида углерода диффундирует в воздухе, а положительно заряженные ионы водорода перемещаются вниз к электролиту. Аналогичная для водорода электрохимическая реакция, выраженная в уравнении выше, – водородный газ диффундирует и окисляется на чувствительном электроде. Эта реакция

вызывает изменение потенциала чувствительного электрода и, следовательно, происходит уменьшение количества кислорода, как показано в уравнении ниже.



Результатом потока электронов от анода к катоду является электрический ток, величина которого пропорциональна концентрации газа водорода, подчиняющейся закону Фарадея. Собственно, точное значение концентрации водорода позволяет иметь представление о концентрации CO в исходном уравнении.

Электрохимические датчики делятся на три типа: амперометрический, потенциометрический и кондуктометрический. Амперометрические датчики работают при постоянном приложенном напряжении, сигнал датчика – ток ограниченной диффузии. Он состоит из двух электродов, рабочего электрода и противоэлектрода, а также сравнительного, который погружен в раствор электролита и потенциостата для поддержания постоянного напряжения (см рис. 2.4). Амперометрические датчики обычно создаются с использованием двухэлектродной конфигурации, но из-за пределов концентрации газа-реагента они строятся с использованием трехэлектродной схемы. В трех конфигурациях электродов ток на чувствительном электроде может быть измерен при постоянном потенциале, который дает подлинный термодинамический потенциал для всех реакций. Однако ток, создаваемый в результате присутствия газа на чувствительном или рабочем электроде, измеряется как сигнал датчика, который затем может быть измерен как при фиксированном, так и в переменном потенциале электрода. Амперометрические датчики могут быть использованы для обнаружения различных газов, нужно лишь надлежащим образом изменить тип электролита.

Потенциометрические датчики газа состоят из твердого электролита,



проводящего кислородный ион, и двух электродов, которые расположены с двух сторон электролита. Один из них является эталонным электродом, который находится в контакте с известным парциальным давлением кислорода, а другой – рабочим электродом, который находится в контакте с неизвестным парциальным давлением кислорода, которое необходимо измерить. Когда электроды находятся в контакте с двумя различными парциальными давлениями кислорода и изолированы друг от друга, датчиком создается ЭДС, величина которой пропорциональна концентрации измеряемого газа. Электроды обычно изготавливают из палладия, платины, золота или серебра. Также для обнаружения газов разных типов используются различные электролиты или комбинация двух материалов.

## 2.5 Оптический газовый сенсор

Этот тип датчиков использует оптическое поглощение/эмиссионное рассеяние газа на определенных оптических длинах волн. Оптический газовый датчик состоит из светоизлучающего элемента, элемента фотодетектирования, чувствительного к газу элемента, чувствительного к газу элемента газа и фильтра для сбора флюоресценции или фосфоресценции. Большинство оптических датчиков обычно основаны на тонких пленках палладия или хемохромных оксидов, покрытых по длине оптического волокна. Этот тип волоконно-оптических датчиков известен как оптоиды. Одними из наиболее распространенных оптических датчиков газа являются инфракрасные сенсоры. Инфракрасные датчики состоят из детектора, который преобразует энергию электромагнитного излучения в электрические сигналы, и инфракрасного источника, который может быть обычной лампой накаливания или нагретой проволочной нитью. Детекторы делятся на различные типы, а именно: термоэлектрический, термисторный болометр, пироэлектрический и детектор

фотонов. Другим компонентом датчика является оптическое волокно, которое может быть двух типов: дисперсионное и недисперсионное. Недисперсионные типы используют дискретные оптические полосовые фильтры и в основном используются для приложений газовых датчиков, в то время как дисперсионные типы используют оптическое устройство, такое как решетка или призма. Инфракрасные датчики газа используются для обнаружения различных газов, в их числе: метан, этан, пропан, бутан, бензолтолуол, ксилол и другие спирты, такие как метанол, этанол и т. д.

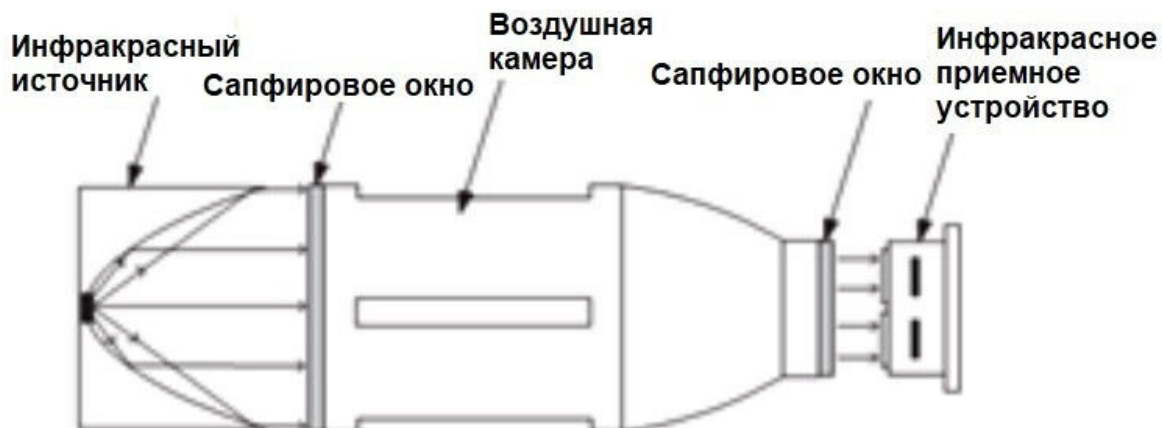


Рисунок 2.5 Оптический газовый сенсор [6]

## 2.6 Полупроводниковый газовый сенсор

Датчики полупроводниковых газов - это устройства, состоящие из нагретых оксидов металлов, которые используются для измерения концентрации газа путем измерения электрического сопротивления устройства. Они работают по принципу обратимого процесса адсорбции газа на поверхности нагретого оксида, обычно оксидов олова, осажденных на кремниевом срезе методом химического осаждения из паровой фазы.

Поглощение газообразного образца на поверхности оксида с последующим каталитическим окислением приводит к изменению электрического сопротивления оксидного материала, который связан с концентрацией газа образца, контролируемого счетчиком, как показано на рис. 2.6.

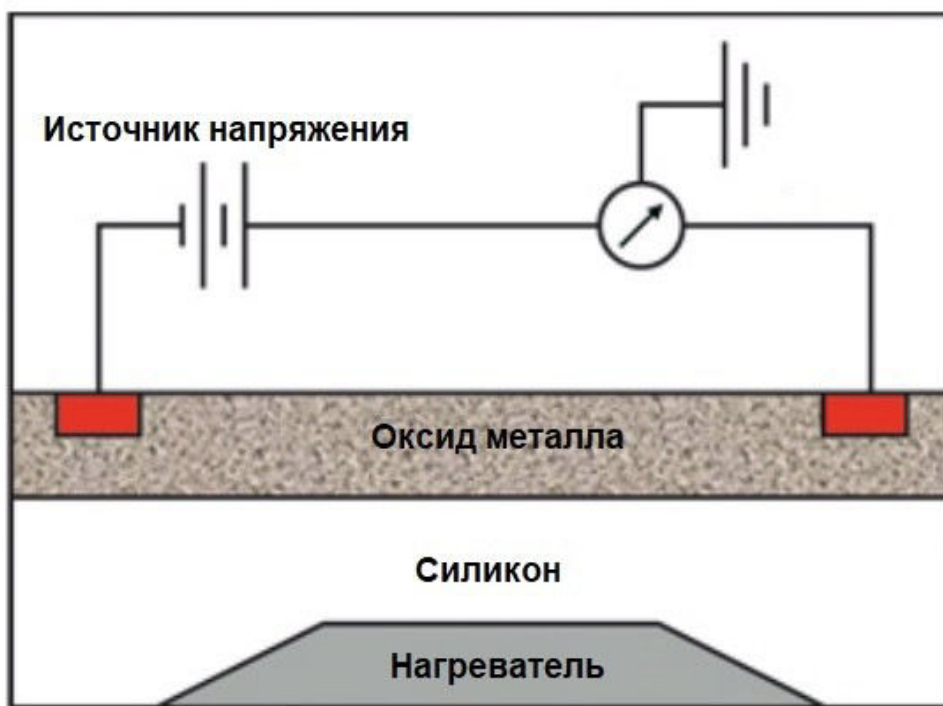


Рисунок 2.6 Полупроводниковый газовый сенсор [6]

Нагреватель в основании используется для нагрева датчика до постоянной температуры около 200-250 °С, способствующего ускорению реакции. Полупроводник n-типа подходит для обнаружения редуцирующих газов из-за большого изменения проводимости, вызванного введением электронов. Аналогично, полупроводник p-типа подходит для обнаружения окисляющих газов. Оксиды, обычно используемые для n-типа, представляют собой: SnO<sub>2</sub>, ZnO, In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> или WO<sub>3</sub>. С их помощью можно обнаружить водород, кислород, спирт и вредные газы, таких как угарный газ.

## 2.7 Акустический газовый сенсор

Механизм обнаружения акустических датчиков представляет собой механическую или акустическую волну. Поскольку акустическая волна распространяется по или на поверхности материала, любые изменения характеристик пути распространения повлияют на скорость и/или амплитуду волны. Изменения скорости могут контролироваться путем измерения частоты или фазовых характеристик датчика, а затем могут быть сопоставлены с соответствующей измеряемой физической величиной. Первый датчик акустического газа был обнаружен Кигом в 1964 году и был основан на измерении объемных акустических волн (BAW – bulk acoustic waves) в пьезоэлектрическом кварцевом резонаторе, который чувствителен к изменениям массы. После интенсивных исследований в середине 1960-х годов были разработаны химические датчики для промышленных атмосферных загрязнителей. Поскольку использовались пьезоэлектрические кварцевые резонаторы, эти типы датчиков имели название кварцевых микровесов (QCM). Существуют различные типы акустических волновых датчиков, основанных на типе распространения волн. Принцип действия акустического химического датчика описан следующим образом: когда к вибрирующей поверхности преобразователя вводится рецепторная пленка, активируемая электронным устройством, характеристики рецепторной пленки, такие как ее масса и толщина, изменяются при воздействии с аналитом. Это изменение напрямую влияет на частоту, амплитуду и фазу вибрации. Сдвиг напрямую пропорционален концентрации аналита. Как уже упоминалось ранее, характеристики любого датчика определяются некоторыми факторами, включая чувствительность, время отклика, селективность, малый размер/вес и низкое энергопотребление. Тем не менее, акустические волновые датчики также обладают присущими характеристиками и использовались в газовых датчиках

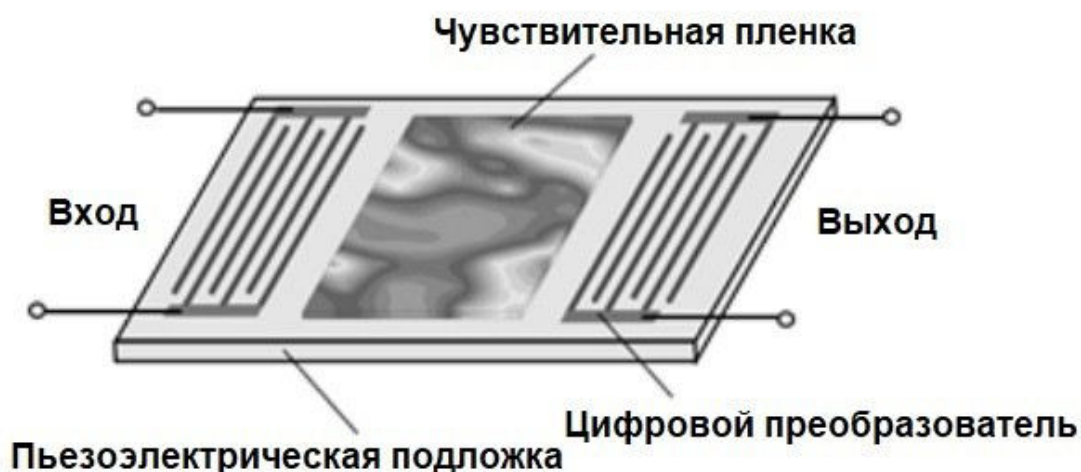


Рисунок 2.7 Описание газового сенсора на основе поверхностных атмосферных волн [6]

с 1964 года, что ставит их на один уровень по сравнению с газочувствительными аналогами. Также преимуществом использования технологии поверхностных акустических волн заключается в том, что измерение концентрации может осуществляться беспроводным способом, что делает возможным реальный онлайн-мониторинг газов и исключает использование проводных кабелей. Это свойство делает его наиоптимальнейшим кандидатом для обнаружения газа и дает ему превосходство над другими методами измерения газа.

Существующее разнообразие методов и средств получения информации о содержании того или иного вредного газа позволяет точно оценить масштаб угрозы. Также, на основании своевременно полученных данных, можно подготовить и применить восстановительные меры, если угроза критическая, либо предупреждающие, если нынешняя обстановка в перспективе может перерасти в неблагоприятную.

## 2.8. Счетчики аэрозольных частиц

Аэрозоль представляет собой коллоид мелких твердых частиц или капель жидкости в воздухе или другом газе. Они являются важными участниками формирования облачных капель и кристаллов льда, выступая в качестве коллектора молекул водяного пара на начальных этапах развития облаков. Обилие и свойства частиц влияют на яркость, толщину и, возможно, время жизни облаков и, в конечном счете, осадки и земной цикл воды. При значительных поверхностных концентрациях они являются загрязняющими веществами, снижая видимость и предоставляя риск для здоровья подвергающихся воздействию. Аэрозольные частицы происходят из огромного количества источников, таких как: лесные пожары, вулканы, открытые почвы и пустынные пески, гребни крупных волн, естественная биологическая активность, сжигание сельскохозяйственных культур, производство цемента и сжигание древесины, навоза и ископаемого топлива. Примерами природных аэрозолей являются туман, лесные экссудаты и гейзерный пар, искусственных – дымка, пыль, загрязняющие частицы воздуха и смог. Жидкие или твердые частицы аэрозоля имеют диаметр  $\leq 1$  мкм. Концентрация числа частиц и размер являются двумя ключевыми параметрами, которые используются для характеристики воздействия аэрозолей. Датчики аэрозолей, которые имеют небольшой вес и объем, подходящий для мониторинга атмосферы с помощью БПЛА, основаны на методе диффузионной зарядки, согласно которому средний заряд частиц примерно соответствует их диаметрам в определенном диапазоне размеров. Сенсор состоит из трех секций, то есть зарядки, осаждения и детектирования. Предел измерений сенсоров такого типа  $\sim 10^6$  / см<sup>3</sup> для концентрации и 10-300 нм для усредненного размера частиц.

### 3. Средства сбора и передачи данных в пространстве

3.1 Arduino - это платформа с открытым исходным кодом, используемая для создания проектов в области электроники. Arduino состоит из физической программируемой печатной платы и части программного обеспечения или интегрированной среды разработки (IDE), которая устанавливается на компьютере и используется для написания и загрузки компьютерного кода на физическую плату. В конструкции платы Arduino используются различные микропроцессоры и контроллеры. Платы оснащены наборами цифровых и аналоговых входов и выходов контактов, которые могут быть сопряжены с различными платами расширения (шилдами) и другими цепями. Платы имеют интерфейсы последовательной связи, включая Universal Serial Bus (USB) на некоторых моделях, которые также используются для загрузки программ с персональных компьютеров. Микроконтроллеры обычно программируются с использованием диалекта функций из языков программирования C и C++. В дополнение к использованию традиционных инструментов компилирования, проект Arduino предоставляет интегрированную среду разработки (IDE).

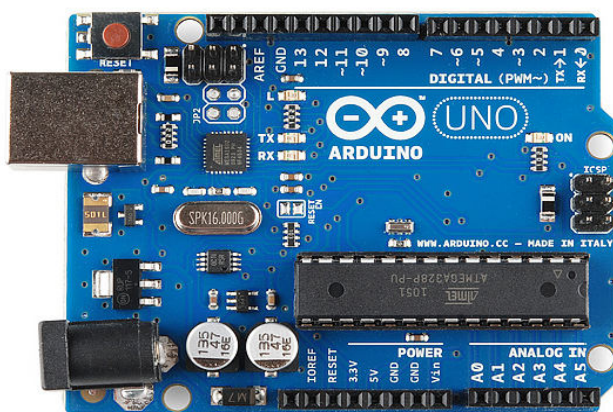


Рисунок 3.1 Программируемая плата Arduino Uno [7]

Микроконтроллеры Arduino предварительно запрограммированы с загрузчиком, который упрощает запись на встроенную флеш-память. По

умолчанию загрузчик Aduino UNO (рисунок 3.1) является загрузчиком optiboot. Программный код загружается через последовательное соединение с персональным компьютером. Некоторые последовательные платы Arduino содержат схему переключения уровня для преобразования между логическими уровнями RS-232 и сигналами уровня транзисторной транзисторной логики.

Текущие платы Arduino запрограммированы через универсальную последовательную шину (USB), реализованную с использованием микросхем USB-последовательного адаптера, таких как FTDI FT232. Некоторые платы, такие как платы более поздней модели Uno, заменяют чип FTDI отдельным чипом AVR, содержащим прошивку USB-to-serial, которая перепрограммируется через собственный заголовок ICSP. Другие варианты, такие как Arduino Mini и неофициальный Boarduino, используют съемную плату адаптера USB-to-serial или кабель, Bluetooth или другие методы, когда используются с традиционными инструментами микроконтроллера, а не с Arduino IDE, стандартным AVR-системным программированием (ISP).

Существует много разновидностей плат Arduino, которые могут использоваться для разных целей. Некоторые платы немного отличаются от приведенной ниже (рисунок 3.2), но большинство Arduino имеют одинаковый набор компонентов.

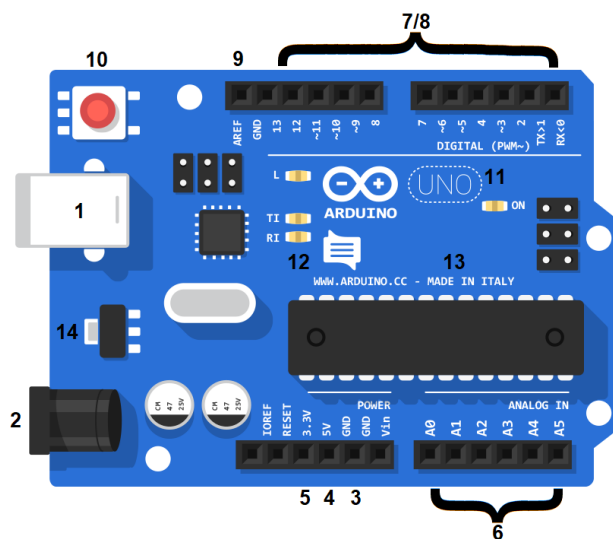


Рисунок 3.2 Расположение компонентов на плате Arduino Uno [7]



Каждой плате Arduino нужен способ подключения к источнику питания. Arduino UNO может питаться от USB-кабеля, идущего от компьютера, или от настенного источника питания. На рисунке выше USB-соединение обозначено (1), а гнездо ствола обозначено (2). Рекомендуемое напряжение для большинства моделей Arduino составляет от 6 до 12 вольт, использование источников с напряжением свыше 20 вольт приводит к порче платы.

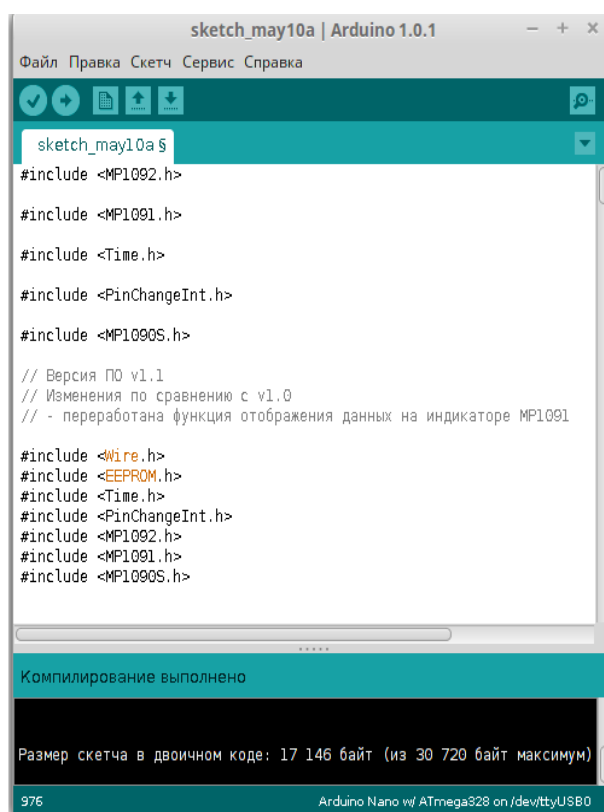
Разъемы на Arduino - это места соединения проводов для построения схемы. Обычно они имеют черные пластиковые «гнезда», которые позволяют просто подключить провод прямо к плате. Arduino имеет несколько разных типов контактов, каждый из которых помечен на схеме и используется для разных функций.

1. GND (3): Сокращение для «Ground». На Arduino имеется несколько контактов GND, любой из которых можно использовать для заземления вашей схемы;
2. 5V (4) и 3,3 В (5): пятивольтовый разъем питает 5 вольт мощности, а 3,3-вольтовый источник питания - 3,3 вольта. Большинство простых компонентов, используемых с Arduino, хорошо работают с 5 или 3,3 вольта;
3. Аналоговые разъемы (6): область под меткой «Analog In» (от A0 до A5 на UNO) - это аналоговые контакты. Эти контакты могут считывать сигнал с аналогового датчика (например, датчиков вредных газов) и преобразовывать его в цифровое значение, которое можно считать и обработать;
4. Цифровой разъем (7): На аналоговых контактах расположены цифровые (от 0 до 13 на UNO). Эти контакты могут использоваться как для цифрового входа, так и для цифрового выхода (например, для питания светодиода);
5. PWM (8): Наличие тильды перед цифровыми выводами (3, 5, 6, 9, 10 и 11

в UNO) означает, что они действуют как обычные цифровые разъемы, но также могут использоваться для чего-то с технологией широтно-импульсной модуляции (Pulse-Width Modulation);

6. AREF (9): стойки для аналоговой ссылки. Большую часть времени эти разъемы в покое. Они иногда используются для установки внешнего опорного напряжения (от 0 до 5 вольт) в качестве верхнего предела для аналоговых входных контактов.

У платы Arduino есть кнопка сброса (10). Нажатие на нее временно подключит контакт сброса к земле и перезапустит любой код (рисунок 3.3), загруженный на Arduino. Код может перезаписываться неограниченное количество раз.



```
sketch_may10a | Arduino 1.0.1
Файл  Правка  Скетч  Сервис  Справка
sketch_may10a $
#include <MP1092.h>
#include <MP1091.h>
#include <Time.h>
#include <PinChangeInt.h>
#include <MP1090S.h>
// Версия ПО v1.1
// Изменения по сравнению с v1.0
// - переработана функция отображения данных на индикаторе MP1091
#include <Wire.h>
#include <EEPROM.h>
#include <Time.h>
#include <PinChangeInt.h>
#include <MP1092.h>
#include <MP1091.h>
#include <MP1090S.h>
*****
Компилирование выполнено
Размер скетча в двоичном коде: 17 146 байт (из 30 720 байт максимум)
976 Arduino Nano w/ ATmega328 on /dev/ttyUSB0
```

Рисунок 3.3 Пример кода (скетча) Arduino [7]

Справа от слова «UNO» на плате располагается крошечный светодиод рядом со словом «ON» (11). Этот светодиод должен загореться всякий раз, когда вы подключаете Arduino к источнику питания. TX является индикатором

передачи, RX – для приема. В Arduino UNO два места появления TX и RX: один раз цифровыми выводами 0 и 1, а во второй раз рядом с светодиодами индикатора TX и RX (12). Эти светодиоды дают визуальные показания, когда Arduino будет получать или передавать данные (например, при загрузке новой программы на плату). Черная деталь со всеми металлическими ножками - это IC, или Integrated Circuit (13). Основная ИС на Arduino немного отличается в зависимости от типа платы, но обычно она от компании ATMEЛ линейки Atmega. Прежде чем загружать новую программу из программного обеспечения Arduino необходимо уточнить тип IC (вместе с видом платы). Регулятор напряжения (14) контролирует количество напряжения, которое подается на плату Arduino. Он способен отключить дополнительное напряжение, которое может повредить схему, однако он имеет свои предел (~20 вольт). С помощью некоторого простого кода Arduino может управлять и взаимодействовать с широким спектром датчиков - приборами, которые могут измерять свет, температуру, степень гибкости, давление, близость, ускорение, концентрации газов, радиоактивность, влажность, барометрическое давление и т. д.

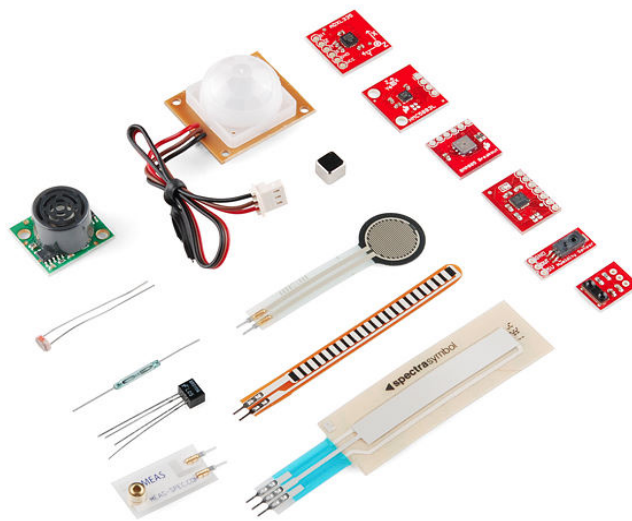


Рисунок 3.4 Виды датчиков взаимодействующих с Arduino [8]

Кроме того, существуют устройства, значительно расширяющие потенциал исходной платы — щиты (Arduino shields). Среди их возможностей: управление моторами, подключение к Интернету, предоставление сотовой или другой беспроводной связи, управление ЖК-экраном и многое другое.

GPRS Shield — один из самых простых способов взаимодействовать со своим устройством в пределах доступности сотовой связи (рисунок 3.5).



Рисунок 3.5 Arduino GPRS Shield [7]

С этой платой расширения плата Arduino получает возможности мобильного телефона. На практике вы можете использовать их для того, чтобы:

1. отправлять через SMS команды на устройство;
2. запрашивать состояние или получать уведомления от него через SMS;
3. звонить на устройство и воплощать на нём IVR-сценарии;
4. принимать звонки с устройства, чтобы послушать, что происходит вокруг;
5. выходить в интернет, опрашивать веб-сервисы, протоколировать данные.

Плата расширения Arduino WiFi позволяет контроллерам Arduino

осуществлять сетевое соединение с использованием беспроводной сети формата 802.11. Плата основана на базе чипа беспроводной сети HDG104 802.11b/g. Микроконтроллер Atmega 32UC3 обеспечивает поддержку сетевого стека (IP) для протокола TCP и UDP. Физически плата расширения WiFi, как и большинство шилдов, подключается к плате контроллера Arduino через контактные площадки, расположенные по краям платы.

Плата WiFi (рисунок 3.6) имеет слот для карт micro-SD, который можно использовать для хранения и передачи файлов по сети. Чтобы получить доступ к данным на карте, необходимо использовать библиотеку библиотеки SD Library. SS (выбор подчиненного устройства) для слота SD - это порт ввода/вывода 4. Контроллер Arduino подключается к процессору карты расширения WiFi и встроенной SD-карте через шину SPI на разъеме ICSP. Используются следующие выходы: 11, 12 и 13 в UNO и выходы 50, 51 и 52 на Mega. На обеих платах выход 10 используется для выбора HDG104 и выхода 4 для SD-карты. Эти входы / выходы не могут использоваться для других целей. Порт 7 используется для установления связи между картой WiFi и Arduino и не может использоваться для других целей.

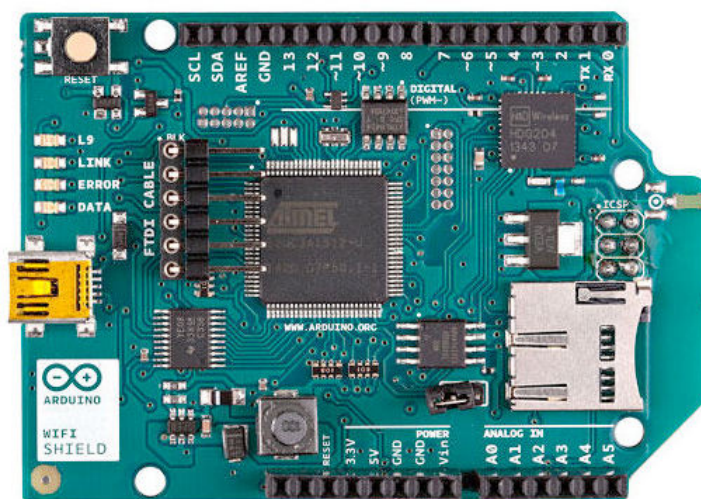


Рисунок 3.6 Arduino Wi-Fi Shield [7]

Плата расширения WiFi может использоваться как в открытых беспроводных сетях, так и в сетях с использованием WPA2 Personal шифрования или WEP. Для успешного соединения точка доступа должна анонсировать SSID. Также на плате есть 4 светодиода: желтый (L9) подключен к выходу 9, зеленый (LINK) отображает статус соединения с сетью, красный (ERROR) загорается при ошибке соединения, синий (DATA) показывает процесс приема/передачи данных по сети.

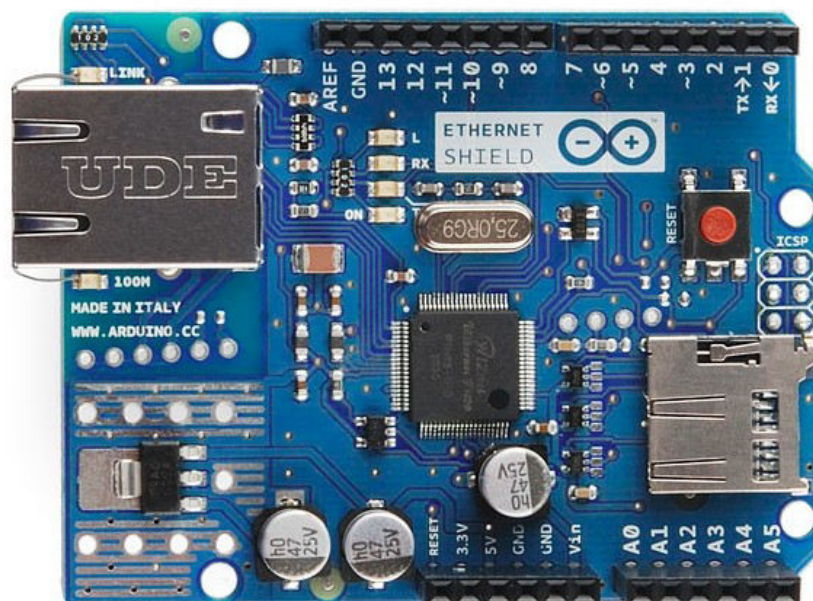


Рисунок 3.7 Arduino Ethernet Shield [7]

Ethernet Shield (рисунок 3.7) позволяет плате Arduino выступить в роли полноценного сетевого устройства: иметь сообщение с аналогичными устройствами, компьютерами, принтерами, сервисами в интернете и другими сетевыми ресурсами. Ethernet Shield работает с библиотекой Arduino Ethernet, которая по умолчанию интегрирована в IDE Arduino. На плате Ethernet есть слот для установки карты micro SD, с помощью которой можно хранить большие объемы информации и загружать ее на веб-сайт прямо из Arduino. Кроме того существует возможность запитывать Arduino через Ethernet соединение. Для этого необходимо использовать модуль Power over Ethernet



(PoE), место для которого находится на шилде.

Технические характеристики платы Ethernet:

1. Рабочее питание - 5 В
2. Ethernet-контроллер: W5100 с буфером 16 килобайт
3. Скорость соединения: 10/100 МБ

Ethernet Shield используется для создания проектов основанных на технологии интернета вещей (IoT).

3.2 Мультикоптеры относятся к классу воздушных транспортных средств, известных как беспилотные летательные аппараты (БПЛА). Как следует из названия, это судно, поднятое вращающимися лопастями, зависящее от четного числа быстро вращающихся роторов, придающих тягу. Каждый ротор производит как тягу, так и крутящий момент вокруг своего центра вращения, а также силу сопротивления, противоположную направлению полета транспортного средства. Если все роторы вращаются с одинаковой угловой скоростью, направление вращения отлично от направления вращения соседних роторов и совпадает с направлением ротора с другого конца рамы, чистый аэродинамический крутящий момент и, следовательно, угловое ускорение вокруг оси рыскания равно нулю, что означает, что нет необходимости для хвостового ротора, как на обычных вертолетах. Волна индуцируется несогласованностью баланса в аэродинамических крутящих моментах (то есть путем смещения кумулятивных команд тяги между встречными вращающимися лопастными парами). Не так много параметров, которыми следует руководствоваться при сборе мультикоптера с оптимальной конфигурацией для максимального времени полета. Среди этих характеристик: размер и количество пропеллеров, ёмкость и напряжение батареи, вес аппарата, количество и диаметр лопастей. Все эти параметры имеют прямое влияние на расчет времени полета мультикоптера.

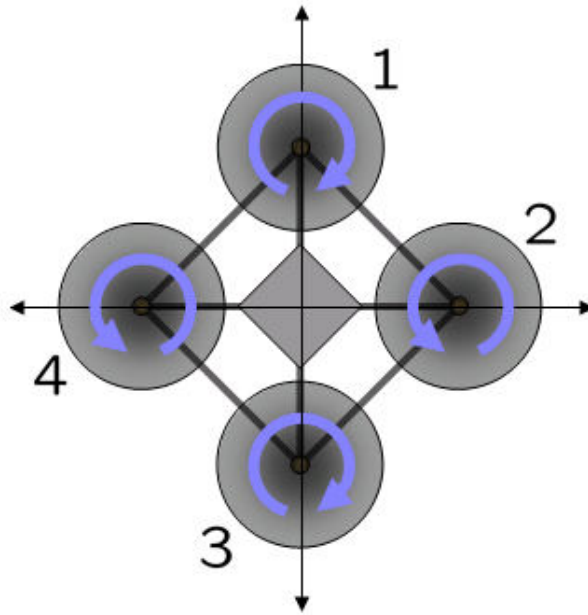


Рисунок 3.8 Направление вращения роторов квадрокоптера [9]

Для сравнительной оценки качества конфигурации можно использовать простую формулу:

$$H = \frac{MAH \cdot S \cdot D}{P} \sqrt{\frac{N}{P}}$$

где

- $N$  - вертолётное число. С помощью него можно оценить потенциал конфигурации, когда как фактическое время полёта зависит от согласованности и качества их компонентов.
- $MAH$  - ёмкость аккумуляторной батареи в  $mA \cdot ч$ ;
- $S$  – количество последовательно соединенных блоков аккумулятора;
- $D$  – диаметр пропеллера в дюймах;
- $N$  – число пропеллеров (моторов);
- $P$  – полётный вес аппарата в граммах.



Эффективность мультикоптера оценивается отношением фактического времени полёта (зависания) к вычисленной величине  $H$ , характеризующей летный потенциал. Чем больше величина этого отношения, тем выше эффективность.

$$EH = \frac{T_{\text{факт}}}{H}$$

Еще одним плюсом эксплуатации мультикоптеров для мониторинга атмосферы, помимо прямого размещения датчиков и передачи информации с них, является возможность размещения аппаратуры для фото- и видеосъемки наблюдаемой области, что позволяет визуально определить активность загрязнения различными источниками в городе: плотность пламени труб в промзонах, скопления автомобилей, естественные выбросы (горение торфяников терриконов, и т.д). В таблице 1 приведено сравнение параметров и расчеты эффективности для квадрокоптеров разных фирм-производителей и предназначенных для разных целей.

Описанные методы получения информации (мониторинг атмосферы с помощью БПЛА) и способы передачи (Arduino и платы расширения) позволяют иметь представление об качестве воздуха в области наблюдения, строить профили распределения регистрируемого газа-загрязнителя, а также прогнозировать дальнейшее движение воздушных масс с поллютантами, с учетом метеорологических параметров.

Таблица 1 Сравнение летных характеристик некоторых БПЛА типа  
квадрокоптер

	DJ Inspire 1	Phantom 3	Phantom 2	Blade MCX-2	Phantom2 Vision+
Исходные данные					
Диаметр пропеллера (дюймы)	13	9,4	9,4	7,32	9,4
Количество пропеллеров	4	4	4	4	4
Полётная масса (г)	2935	1280	1000	31	1242
Ёмкость батареи (мА·ч)	4500	4480	5200	1500	5200
Количество блоков	6	4	3	1	3
Расчёты					
Вертолётное число Н	4,41	7,36	9,27	9	6,7
Фактическое время полёта (мин)	18	23	25	8	18
Эффективность	4,08	3,16	2,7	0,89	2,69
Относительная эффективность	50,6%	38,8%	33,5%	11%	33,3%

## 4. Результаты тестовых измерений загрязняющих веществ

### 4.1 Датчик угарного газа MQ-7

MQ7 - это простой в использовании датчик угарного газа, подходящий для измерения концентрации CO в воздухе. Чувствительным элементом является тонкопленочный слой SnO<sub>2</sub>. Диоксид олова имеет более низкую проводимость в чистом воздухе. В качестве метода обнаружения используется цикл высокой и низкой температуры (попеременная подача 5 и 1.5 вольта). Чем больше концентрация угарного газа, тем выше проводимость сенсора (рисунок 4.1). При высокой температуре (нагретой 5 вольтами) он очищается от других газов, адсорбированных при низкой температуре.

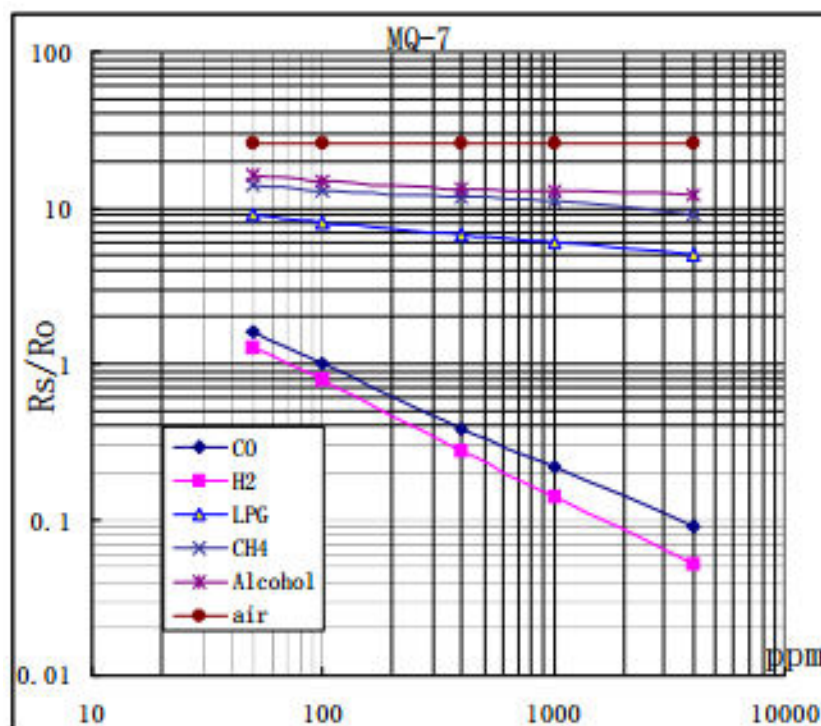


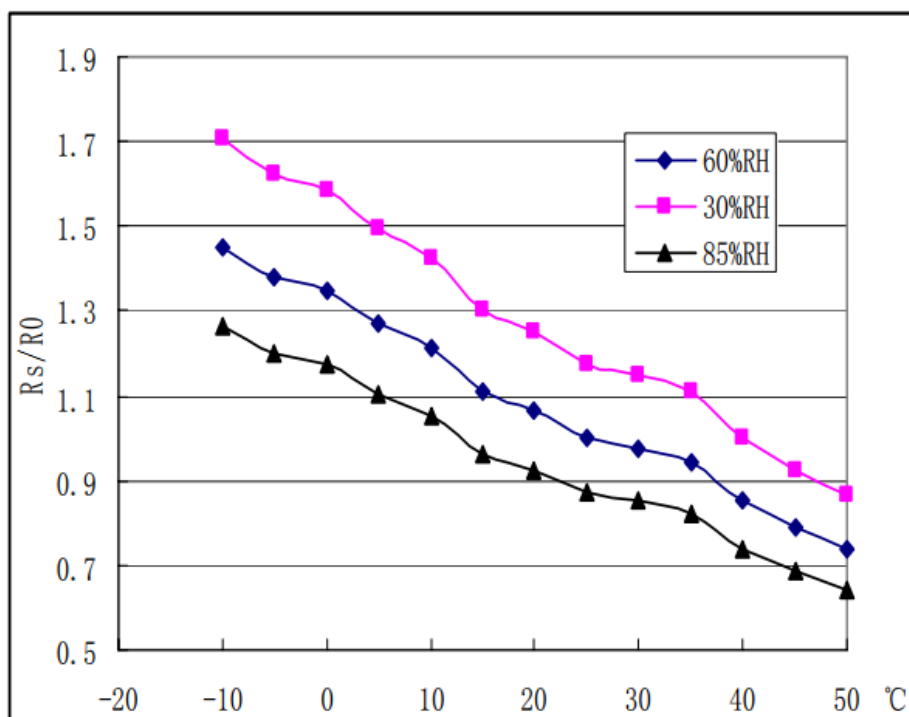
Рисунок 4.1 Зависимость сопротивления датчика от концентрации CO [10]

Характеристики датчика:

- напряжение питания нагревателя: 5 В;
- напряжение питания датчика: 3.3-5 В;
- потребляемый ток: 150 мА;

- габариты: 25.4-25.4 мм;
- вес: 5 г;
- диапазон измерений: 20-2000 ppm;

На рисунке 4.2 представлено влияние различной температуры и влажности на сопротивление датчика. Чувствительность сенсора снижается под влиянием коррозивных газов (таких как  $H_2S$ ,  $SOX$ ,  $Cl_2$ ,  $HCl$  и т.д), щелочи, щелочных солей, галогенных загрязнителей, воздействия паров воды, обледенения, превышения подаваемого напряжения. Абсолютно непригодным для измерений датчик становится от воздействия жидкой воды, длительной эксплуатации, вибрации, тряски, долгой работой с высокими концентрациями



CO.

Рисунок 4.2 Влияние температуры и влажности на сопротивление датчика [10]

#### 4.2 Результаты измерений профиля содержания угарного газа

В качестве примера работы я с помощью платы Arduino nano и датчика

MQ-7 (пример в рабочем состоянии на рисунке 4.3) произвел измерения концентрации монооксида углерода на уровне пяти этажей своего общежития. По полученным результатам (рисунок 4.4) можно сделать вывод о том, что самое резкое изменение уровня CO происходит на уровне 4-6 метров, что объясняется особенностью угарного газа. Поскольку по своим физико-химическим свойствам угарный газ тяжелее других компонентов выхлопных газов, он имеет тенденцию стелиться вдоль поверхности при определенных метеопараметрах, которые были соблюдены в день измерений (относительная среднесуточная влажность воздуха 09.06.2017 составила 90%).

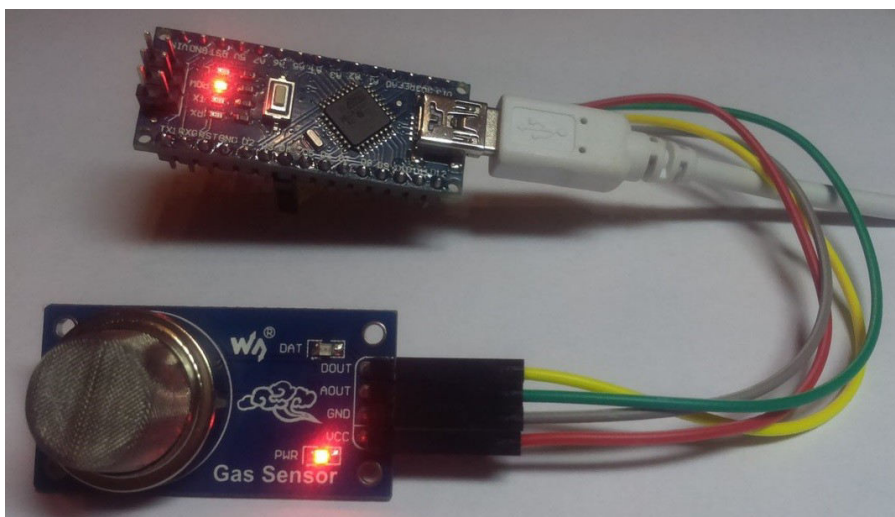


Рисунок 4.3 Датчик MQ-7 и Arduino Nano

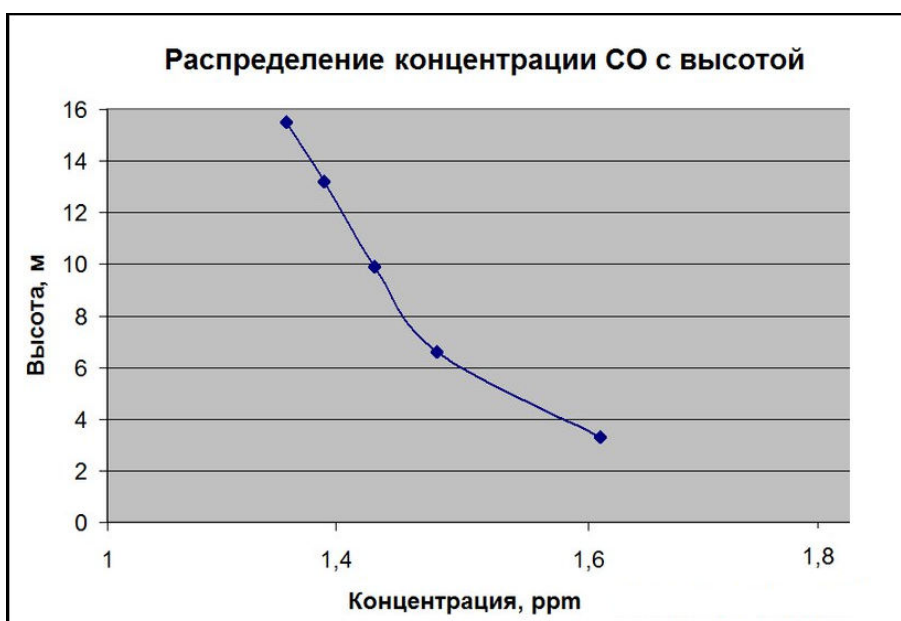


Рисунок 4.4 Влияние температуры и влажности на сопротивление датчика

#### 4.3 Результаты измерений приземного содержания угарного газа

При помощи того же датчика я измерил зависимость уровня загрязнения воздуха угарным газом от близости к источнику загрязняющих веществ. В данном случае в качестве источника атмосферных поллютантов рассматривался Малоохтинский проспект. Самым дальним пунктом наблюдений был выбран парк им. Терешковой (150 метров от проспекта), самым ближним (7 метров) – тротуар непосредственно у проспекта. На полученном графике (рисунок 4.5) наблюдается логичная закономерность: чем ближе к источнику загрязнений, тем выше концентрация загрязняющих веществ, в данном случае CO.

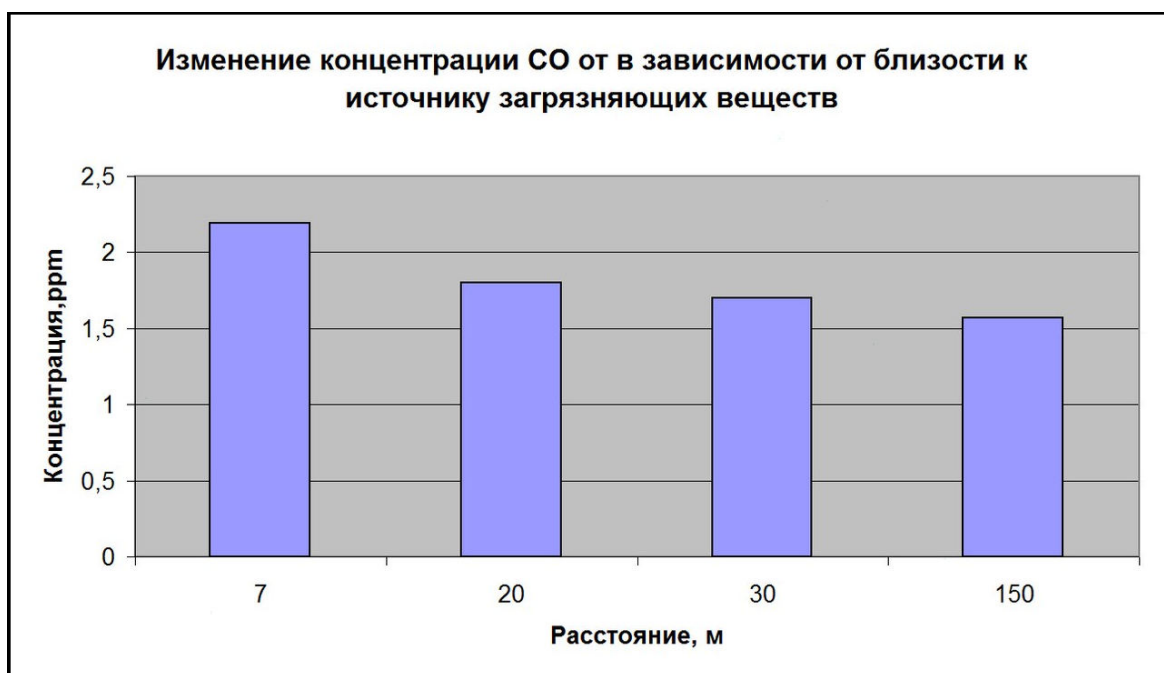


Рисунок 4.5 Влияние температуры и влажности на сопротивление датчика

В таблице 2 представлен сравнительный анализ для датчиков угарного газа разных фирм производителей.

Таблица 2 Сравнительный анализ датчиков монооксида углерода

Датчик	Тип	Точность, ppm	Инерция, с	Масса, г
MQ-7	Электрохимический	1.5	75	5
CO-B4	Электрохимический	0.004	15	13
а3со	Электрохимический	0.1	40	22
CO sensor	Электрохимический	1	60	10
CO-MF-200	Электрохимический	0.15	25	5.4

На основании произведенных измерений можно сделать вывод, что даже относительно дешевый датчик можно использовать в целях грубой регистрации превышения уровня ПДК, однако, в связи с низкой точностью и высокой инерцией, данный сенсор не подходит для мониторинга качества воздуха.

Заключение

## Заключение

На основании моих исследований и проделанной работы, можно сделать вывод о том, что:

- существующий перечень датчиков охватывает весь спектр загрязняющих веществ;
- возможно использование аэромобильной платформы для размещения газовых сенсоров;
- время полета платформы достаточно для мониторинга качества воздуха в пределах приземного слоя атмосферы.

Из этого следует, что предложенный мной вариант по мониторингу атмосферы и контролю качества воздуха релевантный и практичный. Дальнейшие исследования будут направлены на создание прототипа аэромобильного газово-аэрозольного анализатора для целей оперативного мониторинга качества воздуха.



## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Сайт Conserve energy future – URL: <http://www.conserve-energy-future.com/causes-effects-solutions-of-air-pollution.php> – загл. с экрана. – яз. - англ.
2. Francisc Popescu и Ioana Ionel *Air Quality [images]/ Francisc Popescu, Ioana Ionel and Ashok Kumar, 2010*
3. Сайт окружающей среды – URL: <http://www.okruzhayushchaya-sreda.ru/vidy-zagryazneny-okruzhayushchei-sredy.shtml> – загл. с экрана. – яз. - рус.
4. Сайт Explain that stuff — URL: <http://www.explainthatstuff.com/air-pollution-introduction.html> – загл. с экрана. – яз. - англ.
5. Сайт Intechopen – URL: <https://www.intechopen.com/books/air-quality/anthropogenic-air-pollution-sources> – загл. с экрана. – яз. - англ.
6. Zaiki Awang *Gas Sensors: A Review [images]/ Zainab Yunusa, Mohd. Nizar Hamidon, Ahsanul Kaiser, Zaiki Awang – Journal Sensors and Transducers, 2014. С. 61-75*
7. Сайт компании Arduino – URL: <https://www.arduino.cc/en/Reference/Libraries> – загл. с экрана. – яз. - англ.
8. Сайт компании поддержки проектов Beeva.com – URL: <https://www.beeva.com/beeva-view/tecnologia/introduccion-al-internet-de-las-cosas-y-machine-to-machine/> – загл. с экрана. – яз. - исп.
9. Сайт университета Корнелл — URL: [https://people.ece.cornell.edu/land/courses/ece4760/FinalProjects/s2012/yk579\\_jl2782\\_tnn7/yk579\\_jl2782\\_tnn7/highlvl.html](https://people.ece.cornell.edu/land/courses/ece4760/FinalProjects/s2012/yk579_jl2782_tnn7/yk579_jl2782_tnn7/highlvl.html) – загл. с экрана. – яз. - англ.
10. Сайт технической спецификации датчика MQ-7 – URL: <http://www.karlssonrobotics.com/datasheets/Sensors/Biometric/MQ-7.pdf> – загл. с экрана. – яз. - англ.