



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра экспериментальной физики атмосферы

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
БАКАЛАВРА

На тему Разработка перспективного образца метеорологического
зонда

Исполнитель Качнов Ярослав Викторович

Руководитель кандидат физико-математических наук, доцент

Чукин Владимир Владимирович

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой

(подпись)

доктор физико-математических наук, профессор

Кузнецов Анатолий Дмитриевич

«02» июня 2017 г.

Санкт-Петербург 2017



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра экспериментальной физики атмосферы

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
БАКАЛАВРА

На тему Разработка перспективного образца метеорологического
зонда

Исполнитель Качнов Ярослав Викторович

Руководитель кандидат физико-математических наук, доцент
Чукин Владимир Владимирович

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой

(подпись)

доктор физико-математических наук, профессор

Кузнецов Анатолий Дмитриевич

« ___ » _____ 20__ г.

Санкт-Петербург 2017

Содержание

Введение	3
1 Методы зондирования атмосферы	4
1.1 Метод радиозондирования атмосферы	4
1.1.1 Система радиозондирования атмосферы «Метеорит - МАРЗ»	5
1.1.2 Система радиозондирования атмосферы «АВК-1 («Титан») - МРЗ»	5
1.1.3 Система радиозондирования атмосферы «МАРЛ-А - МРЗ-ЗАТ»	6
1.1.4 Сравнительный анализ систем радиозондирования	6
1.2 Лазерное зондирование атмосферы	9
1.3 Зондирование атмосферы с космических систем	9
1.4 Методы атмосферного радиопросвечивания	10
1.5 Метод зондирования с помощью микроволнового радиометра	11
2 Метеорологический зонд на основе микроконтроллерного устройства	13
2.1 Технология Arduino	13
2.2 Микроконтроллер ESP-8266EX	14
2.3 Платформа Wemos D1 mini	15
2.4 Плата расширения DHT Pro Shield	17
2.5 Плата расширения Micro SD Card Shield	17
2.6 Датчик давления BME280	19
2.7 Датчик аэрозолей DSM501a	19
2.8 Корпус метеорологического зонда	21
2.9 Конструкция метеорологического зонда	21
2.10 Программное обеспечение	23
3 Анализ результатов измерений	26
3.1 Результаты лабораторных испытаний	26
3.2 Результаты полевых испытаний	27
Заключение	31
Список использованных источников	32
Приложение А	33
Приложение Б	40
Приложение В	42

Введение

В приземном слое атмосферы наблюдаются вертикальные градиенты температуры и влажности в сотни раз большие, чем в вышележащей свободной атмосфере. Следовательно, приземный слой требует более детального мониторинга с высоким пространственно - временным разрешением.

Целью дипломной работы является разработка многоканального метеорологического зонда и программного обеспечения для него. Разрабатываемый метеорологический зонд будет измерять основные параметры атмосферы такие как: давление, температура и влажность воздуха. Чтобы достичь поставленной цели нужно решить следующие задачи:

- ознакомиться с существующими методами зондирования атмосферы;
- сконструировать прототип метеорологического зонда для измерения атмосферного давления, температуры и влажности воздуха;
- создать алгоритм и программные средства для обработки данных измерений метеозондом;
- проанализировать полученные данные измерений.

Работа изложена на 45 страницах и состоит из введения, трех глав, заключения и трех приложений.

В первой главе рассматриваются различные методы зондирования атмосферы.

Во второй главе рассматривается микроконтроллерное устройство, платы расширения к нему, датчики давления, температуры и влажности воздуха. Описывается конструкция метеорологического зонда и программное обеспечение для него.

В третьей главе приводятся результаты проведенных измерений и их анализ.

1 Методы зондирования атмосферы

1.1 Метод радиозондирования атмосферы

Обычно радиозондированием называют дистанционное измерение основных метеорологических параметров атмосферы измерительными преобразователями. Важнейшим моментом является то, что при осуществлении радиозондирования атмосферы нужно измерять не только метеорологические параметры, а также координаты измерительного прибора при проведении измерений. Измерение метеорологических параметров и передача результатов выполняется специальным устройством, называемым радиозондом. Прием результатов измерений и определение положения радиозонда в пространстве обычно производится радиолокационной станцией.

Таким образом, радиозондирование совершается при помощи определенных систем, осуществляющих измерение, сбор, преобразование, передачу данных зондирования, их прием, обработку и анализ, а также выдачу собранной метеорологической информации.

Разные страны мира используют различные системы радиозондирования атмосферы, которые отличаются друг от друга по назначению, по принципу действия, по способу применения, по конструкции и еще по некоторым параметрам.

Основоположником метода радиозондирования атмосферы и создателем первого в мире радиозонда является профессор А.П. Молчанов. Прибор был создан в Павловской обсерватории и был проведен первый испытательный запуск 30 января 1930 г. С некоторым запозданием в ряде других стран к 1937 г. были образованы первые сети радиозондирования, которые производили измерения с помощью своих национальных радиозондов [1].

Все радиозонды можно разделить по назначению, выделяют серийные радиозонды, которые используются для систематического зондирования на сети радиозондирующих станций, и радиозонды специального назначения, которые применяются с некоторой периодичностью для нестандартных измерений в атмосфере. К первому виду относятся практически все радиозонды комплексного зондирования атмосферы. Ко второму виду можно отнести: измеряющие потоки лучистой энергии, измеряющие концентрацию озона и некоторых других малых

газовых компонентов, эталонные и радиометрические радиозонды. Так же можно разделить радиозонды еще и по способу измерения. Например, нисходящие, восходящие и уравновешенные радиозонды, которые используются для измерения на определенном уровне.

Все современные радиозонды являются многоканальными измерительными системами, которые используют различные первичные измерительные преобразователи для проведения измерений метеорологических параметров. Сами радиозонды представляют собой составную часть сложнейших радиотелеметрических комплексов. Радиозонды осуществляют прием измеряемой информации с помощью специальных технических средств, разнообразность которых достаточно велика.

Далее детально рассмотрим системы радиозондирования, используемые в России.

1.1.1 Система радиозондирования атмосферы «Метеорит - МАРЗ»

Система радиозондирования «Метеорит - МАРЗ» относится к отечественным системам зондирования атмосферы. В ее состав входит наземная импульсная радиолокационная станция «Метеорит» и радиозонд МАРЗ [1].

В процессе проведения зондирования атмосферы измеряются температура, относительная влажность воздуха и координаты точки измерения. Измерение координат определяет такие характеристики как скорость и направление ветра.

Система радиозондирования «Метеорит - МАРЗ» имеет ряд версий и типов; на данный момент используют радиолокационную станцию типа «Метеорит-2» и радиозонд МАРЗ-2-2 [1].

Радиолокационная станция «Метеорит-2» используется для радиозондирования атмосферы с 1971 г., а радиозонд МАРЗ-2-2 - с середины восьмидесятых годов [1].

1.1.2 Система радиозондирования атмосферы «АВК-1 («Титан») - МРЗ»

Сейчас самой распространенной на отечественной сети станций зондирования атмосферы является система АВК-1 («Титан») - специализированный информационно-вычислительный комплекс, который состоит из наземной радиоло-

кационной импульсной станции со специальным компьютерным устройством и радиозонд типа МРЗ-ЗА [1].

По принципу действия эта система схожа с системой «Метеорит - МАРЗ», но более модернизированная. Радиолокационная станция реализована на более современной элементной базе и оборудована компьютерным устройством, производящее зондирование атмосферы с полностью автоматизированным приемом и обработкой измерений, а также передачу всех измеренных метеорологических параметров потребителю в качестве специальных телеграмм. Вдобавок, компьютерное устройство осуществляет такие важные функции, как тестовый и функциональный контроль рабочей системы радиолокационной станции.

1.1.3 Система радиозондирования атмосферы «МАРЛ-А - МРЗ-ЗАТ»

Система представляет собой малогабаритный аэрологический радиолокатор МАРЛ-А и радиозонд МРЗ-ЗАТ [2]. Данная система была создана для замены устаревшей техники и переоснащения действующей сети инновационными средствами радиозондирования, соответствующими мировым стандартам. В этой системе используется рабочий диапазон радиочастот, утвержденный Международным союзом электросвязи в целях проведения радиозондирования и одобренный Министерством Российской Федерации по связи и информатизации. Это дает возможность при необходимости использовать радиозонды зарубежного производства.

Сравним технические характеристики этих трех систем для удобства восприятия, в виде таблицы.

1.1.4 Сравнительный анализ систем радиозондирования

Данные таблиц [1.1] и [1.2], построенных на основании технических паспортов данных приборов, позволяют сделать вывод, что более современной и практичной является система радиозондирования «МАРЛ-А - МРЗ-ЗАТ». Кроме данных приборов существуют и другие приборы, которые существенно отличаются по методам измерений от приведенных выше.

Таблица 1.1 — Технические характеристики радиолокационных станций [1][2]

Характеристики	Вид радиолокационной станции		
	Метеорит	АВК-1	МАРЛ-А
диапазон частот электромагнитной энергии, излучаемой передатчиками	1780 МГц	1780 МГц	1680 МГц
импульсная мощность передатчиков	200 кВт	10 кВт	0,115 кВт
длительность излучаемых импульсов запроса	1,5 мкс	1,1 мкс	1,1 мкс
ширина диаграммы направленности антенны	5 град	6 град	6 град
дальность автоматического сопровождения радиозонда с регистрацией данных	250 км	300 км	200 км
средняя ошибка определения угловых координат радиозонда	7,2 град	7,2 град	0,1 град
срединная ошибка измерения дальности	40 м	30 м	30 м
потребляемая мощность при напряжении питания 220 В	10 кВт	8 кВт	0,2 кВт

Таблица 1.2 — Технические характеристики радиозондов [1][2]

Характеристики	Вид радиозонда		
	МАРЗ	МРЗ	МРЗ-ЗАТ
диапазон измерения температуры воздуха,	(-80...+50) С	(-80...+50) С	(-80...+50) С
диапазон измерения относительной влажности воздуха	15... 98) %	(15... 100) %	(15... 100) %
несущая частота	1782 МГц	1782 МГц	1680 МГц
частота следования импульсов ГОИ с	800 кГц	800 или 600 кГц	800 или 600 кГц
потребляемые токи радиозондом	(20...50) мА	(20...50) мА	(20...50) мА
время непрерывной работы зонда	не менее 2 ч	не менее 2 ч	не менее 2 ч
масса	0,43 кг	0,36 кг	0,36 кг

1.2 Лазерное зондирование атмосферы

В последнее время для целей зондирования атмосферы все чаще применяются метеорологические лидары, которые являются оптическими квантовыми локаторами.

Метеорологические лидары дают возможность измерять не только основные метеорологические параметры атмосферы, но и такие параметры как: пространственно-временные вариации аэрозоля в приземном слое воздуха, характеристики облаков и туманов, параметры атмосферной турбулентности и дают возможность проводить зондирование атмосферы с целью изучения атмосферного аэрозоля и исследовать газовые компоненты.

За основу метеорологических лидаров взят оптический квантовый генератор, который называется лазером. Главными достоинствами лазера являются: высокая когерентность и монохроматичность излучения, незначительная геометрическая расходимость луча, возможность создания по требованию крайне высокой спектральной плотности потока излучения.

Из-за необходимости проведения измерений в различных рабочих активных средах оптические квантовые генераторы делятся на газовые, жидкостные, твердотельные и полупроводниковые. Также лазеры делятся по источнику питания, бывают оптические, электрические, искровые и химические [1].

1.3 Зондирование атмосферы с космических систем

Методы дистанционного зондирования окружающей среды с космических систем дают возможность собирать количественную информацию о метеорологических параметрах атмосферы и подстилающей поверхности основанного на измерении характеристик поля электромагнитного излучения как генерируемого самой системой атмосфера - подстилающая поверхность (пассивные дистанционные методы), так и образованного вследствие взаимодействия этой системы с излучением, генерируемым активным (радиолокационные станции, лазеры) источником (активные дистанционные методы) [1].

При применении космических систем пассивное дистанционное зондирование, в основном, реализуется в виде следующих спектральных измерений:

- прозрачности атмосферы по естественным или искусственным источникам электромагнитного излучения;
- собственного теплового излучения системой атмосфера - подстилающая поверхность;
- отраженного и рассеянного солнечного излучения системой атмосфера - подстилающая поверхность [1].

Из существующих современных программ и методов для восстановления вертикальных профилей широко используется комплекс инструментов зондирования атмосферы Advanced TIROS Operational Vertical Sounder (ATOVS).

Обработка информации по данным ATOVS производится с использованием программного продукта International ATOVS Processing Package (IAPP), разработанный для восстановления температуры и влажности, определения общего содержания озона и других параметров, как в безоблачную погоду, так и в облачную [3]. Процедура получения исходных данных и восстановления атмосферного параметра температуры состоит из 3 этапов: приём телеметрических данных, предварительная обработка данных, восстановление параметров температуры.

Алгоритм восстановления параметра делится еще на 3 этапа: определение наличия облачности, восстановление вертикального профиля температуры в первом приближении регрессионным методом, расчёт вертикального профиля нелинейным методом.

1.4 Методы атмосферного радиопросвечивания

Атмосферное радиопросвечивание основано на обнаружении изменения радиосигнала при его прохождении через атмосферу планеты, то есть при просвете атмосферы. Когда электромагнитное излучение проходит через атмосферу, оно преломляется. Величина преломления зависит от градиента рефракции нормального к траектории, который, в свою очередь, зависит от градиента плотности. Эффект наиболее выражен, когда излучение проходит по траектории распространения радиоволны через атмосферу. На радиочастотах величина изгиба не может быть измерена напрямую. Вместо этого изгиб может быть рассчитан с использованием доплеровского сдвига сигнала с учетом геометрии излучателя и приемника. Величина изгиба может быть связана с показателем преломления преобразовани-

ем Абеля по формуле, связывающей угол изгиба с рефракцией. В случае нижней части атмосферы могут быть получены данные о температуре, давлении и содержании водяного пара в атмосфере, что позволяет использовать данные радиопросвечивания в метеорологии [4].

ГНСС радиопросвечивание - это тип радиопросвечивания, использующий радиосигналы глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС). Это сравнительно новый метод (впервые примененный в 1995 году) для проведения атмосферных измерений [4]. Он используется в качестве инструмента прогнозирования погоды и может также использоваться для мониторинга изменений климата. В этом методе используется низкоорбитальный спутник, получающий сигнал от навигационного спутника. Сигнал должен пройти через атмосферу и преломиться по пути. Величина преломления зависит от температуры воздуха и концентрации водяного пара в атмосфере.

ГНСС-радиопросвечивание означает практически мгновенное описание состояния атмосферы [4]. Относительное положение между навигационным спутником и низкоорбитальным спутником изменяется со временем, что позволяет осуществлять вертикальное сканирование последовательных слоев атмосферы.

1.5 Метод зондирования с помощью микроволнового радиометра

Микроволновый радиометр предназначен для осуществления дистанционного зондирования атмосферы и представляет собой высокочувствительный радиоприемник микроволнового диапазона (частоты от 1 до 1000 ГГц). Сейчас, микроволновые радиометры используются во многих областях деятельности человека.

Вещества в твердом, жидком и газообразном состоянии излучают и поглощают электромагнитные волны в широком диапазоне. Полное излучение, принимаемое радиометром, выражают при помощи эффективной яркостной температуры.

Вычисление таких атмосферных параметров как температура и влажность при помощи микроволновых радиометров - сложная задача, чтобы решить ее были разработаны математические алгоритмы расчета (например, регрессионный алгоритм) [5].

Однако, существует целый ряд нерешенных проблем, которые будут рассмотрены в данной работе. Например, для решения задач прогноза погоды необходимо построение вертикальных профилей атмосферных параметров с помощью зондов. Так как пространственное разрешение космических методов недостаточно велико, а лидары из-за своей стоимости нельзя установить на каждой станции сети. Соответственно, появляется острая нужда в дешевых методах зондирования атмосферы. Главный недостаток существующих атмосферных зондов, которые должны запускаться два раза в сутки, – это невозможность их повторного использования. Что, в свою очередь, делает стоимость измерений очень дорогой, не говоря уже о цене самой радиолокационной станции.

2 Метеорологический зонд на основе микроконтроллерного устройства

2.1 Технология Arduino

Arduino – электронная платформа с открытым исходным кодом, основанная на простом в использовании аппаратном и программном обеспечении [6]. Платы Arduino могут считывать входные данные: свет, падающий на датчик, нажатие кнопки или сообщение в Твиттере, и превращать их в выходной сигнал: запуск двигателя, включение светодиода или публикация чего-либо в Интернете. Чтобы плата Arduino начала выполнять какие-либо действия, необходимо отправить набор инструкций микроконтроллеру, расположенному на плате Arduino. Для этого используется язык программирования Arduino (на основе C/C++) и среда разработки Arduino IDE, интерфейс которой можно увидеть на рисунке 2.1. На рисунке 2.2 изображена одна из разновидностей плат Arduino.

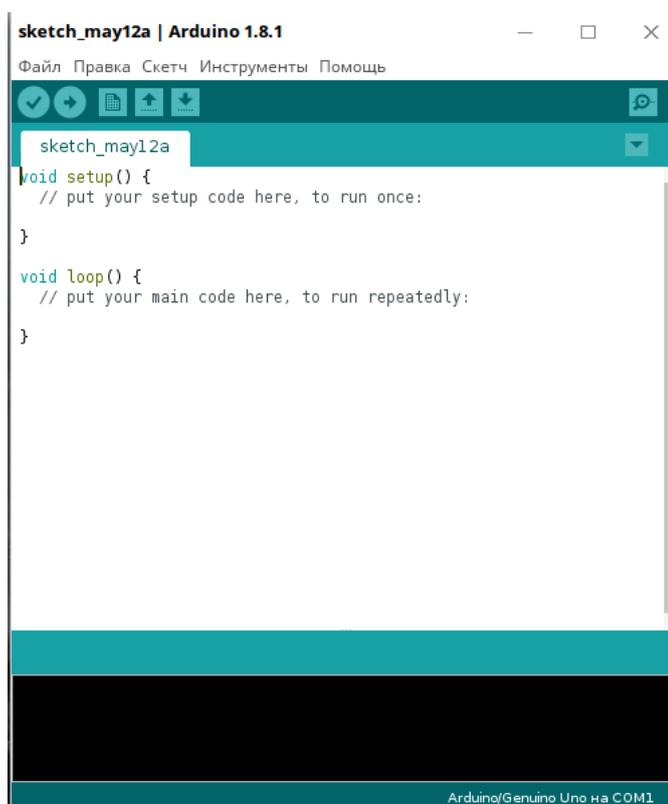


Рисунок 2.1 — Интерфейс среды разработки Arduino IDE

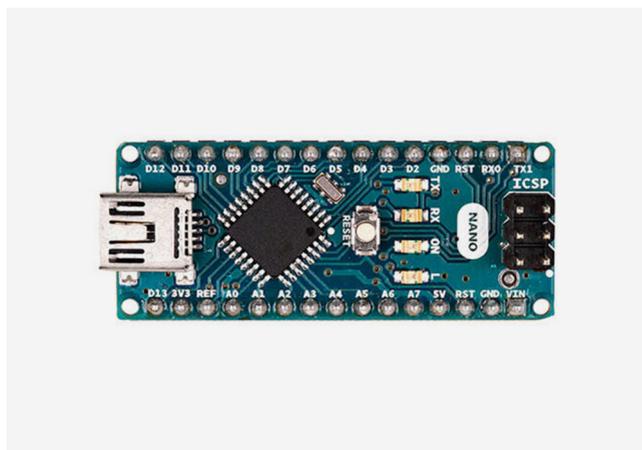


Рисунок 2.2 — Внешний вид платформы Arduino Nano

Существует множество других микроконтроллеров и микроконтроллерных платформ. STM32, Parallax Basic Stamp, NetMedia's BX-24, Phidgets, Handyboard MIT и многие другие предлагают аналогичную функциональность.

2.2 Микроконтроллер ESP-8266EX

ESP8266EX обеспечивает высоко интегрированное решение СНК (система на кристалле), которое удовлетворяет постоянным требованиям пользователей к эффективному использованию энергии, компактному дизайну и надежной работе в индустрии Интернета вещей (IoT). Обладая полными и автономными возможностями сети Wi-Fi, ESP8266EX может быть, как автономным приложением, так и вспомогательным приложением для хост-контроллера. Когда ESP8266EX выполняет приложение, оно быстро загружается из флэш-памяти. Встроенный кэш повышенной скорости помогает повысить производительность системы и оптимизировать системную память. Кроме того, ESP8266EX можно применять к любой конструкции микроконтроллера в качестве адаптера Wi-Fi через интерфейсы SPI/SDIO или I2C/UART. Компактная конструкция минимизирует размер печатной платы и требует минимальных внешних схем. Помимо функций Wi-Fi, ESP8266EX также включает расширенную версию 32-разрядного процессора Tensilica L106 и встроенного SRAM. Он может быть связан с внешними датчиками и другими устройствами через универсальный интерфейс ввода/вывода (GPIO). Пакет разработки программного обеспечения (SDK) предоставляет при-

меры кодов для различных приложений. На рисунке 2.3 изображена блок-схема микроконтроллера [7].

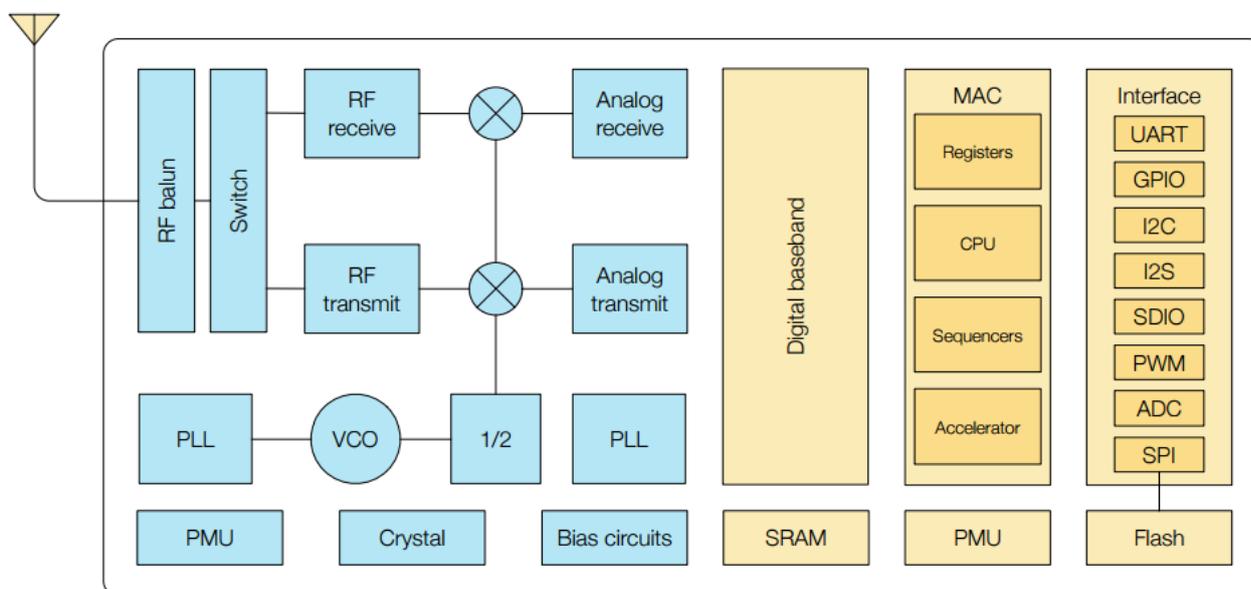


Рисунок 2.3 — Блок-схема микроконтроллера ESP8266EX

2.3 Платформа Wemos D1 mini

Платформа Wemos D1 mini, рассматриваемая в моей работе, основана на микроконтроллере ESP-8266EX. Микроконтроллер имеет около 50 кБ памяти ОЗУ и 4 МБ флэш-памяти для хранения скетча. Из-за небольшого размера, она очень удобна для использования в лабораторных устройствах. Связь с компьютером и питание платы осуществляется посредством подключения платы через кабель Micro USB. Платформа содержит 11 цифровых входов/выходов, 1 аналоговый вход, разъем Micro USB, встроенную керамическую антенну, коннектор для подключения внешней Wi-Fi антенны и кнопку RESET - перезагрузка. Также платформа Wemos D1 mini совместима со средой разработки Arduino IDE. На рисунке 2.4 изображен внешний вид платформы Wemos D1 mini [8].

Чтобы конструкция была более компактной, я использовал двойную плату расширения для платформы Wemos D1 mini, которая изображена на рисунке 2.5.



Рисунок 2.4 — Внешний вид платформы Wemos D1 mini

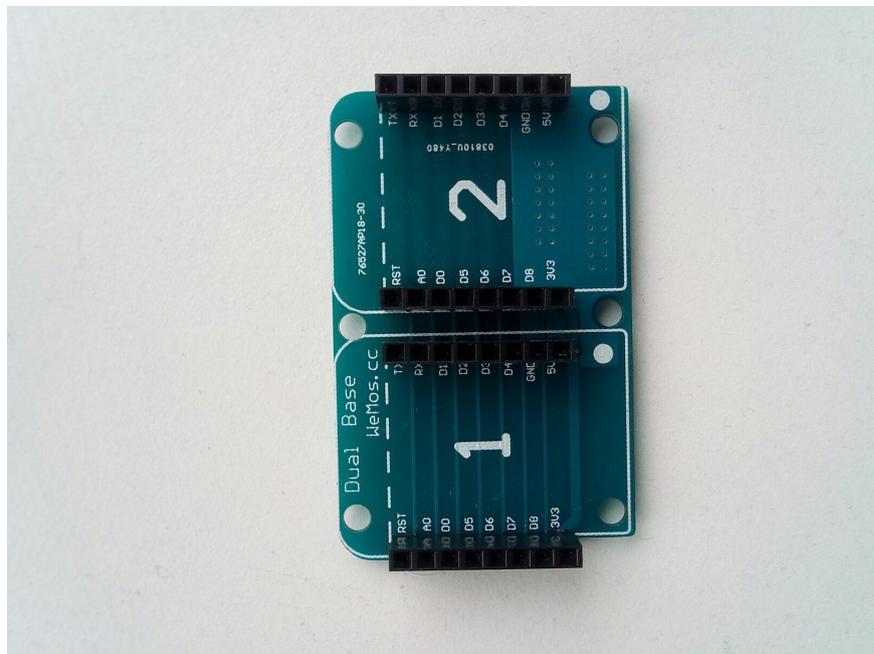


Рисунок 2.5 — Внешний вид двойной платы расширения

2.4 Плата расширения DHT Pro Shield

Плата DHT Pro Shield основана на датчике DHT22 (AM2302). Платы расширения используются для более удобного соединения с платформой Wemos D1 mini. Поэтому в данной работе используется именно эта готовая плата. Технические характеристики датчика DHT22 представлены в таблице [2.1](#). На рисунке [2.6](#) изображен внешний вид датчика DHT22 на плате расширения.

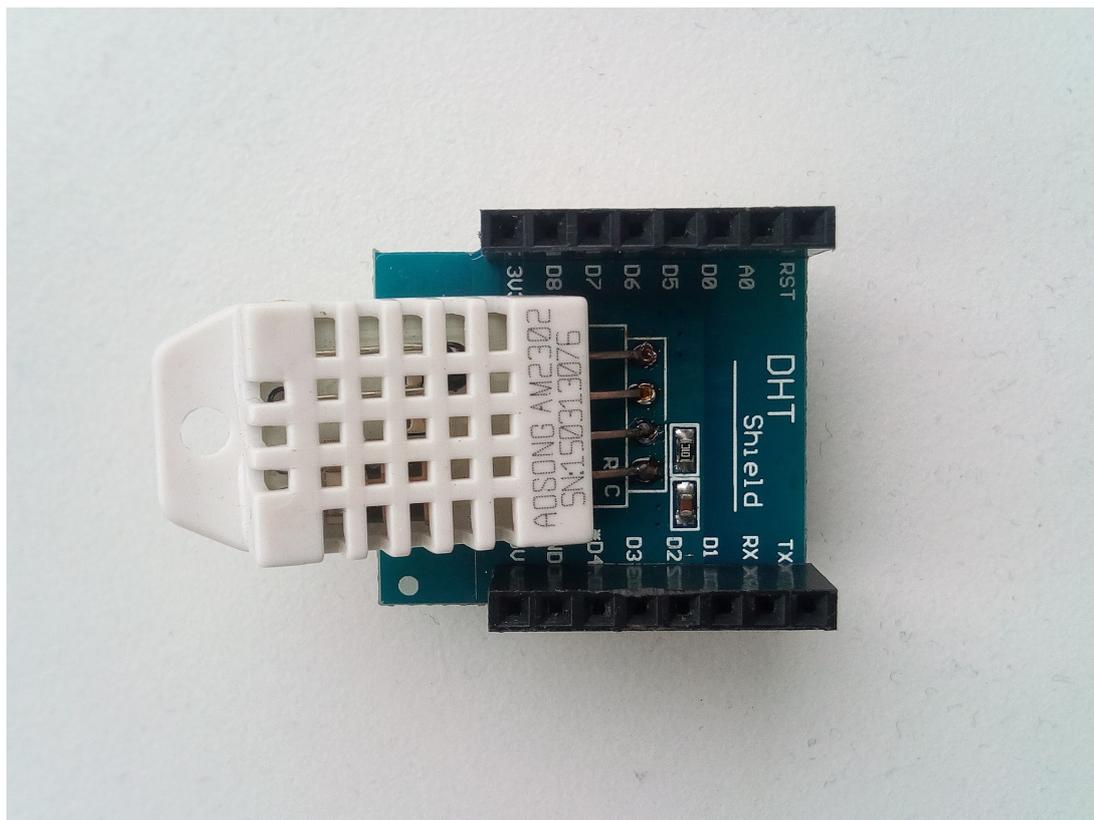


Рисунок 2.6 — Внешний вид платы расширения DHT Pro Shield

2.5 Плата расширения Micro SD Card Shield

Чтобы результаты измерений сохранялись в удобном для нас формате, я использовал специальную плату расширения Micro SD Card Shield. С данной платой расширения использовалась карта памяти microSD с объемом памяти 1 гигабайт. Для наших целей объема этой карты памяти более чем достаточно. Данные измерений записываются на карту памяти в текстовый файл. На рисунке [2.7](#) изображен внешний вид платы расширения. На рисунке [2.8](#) изображен формат сохраненного файла.

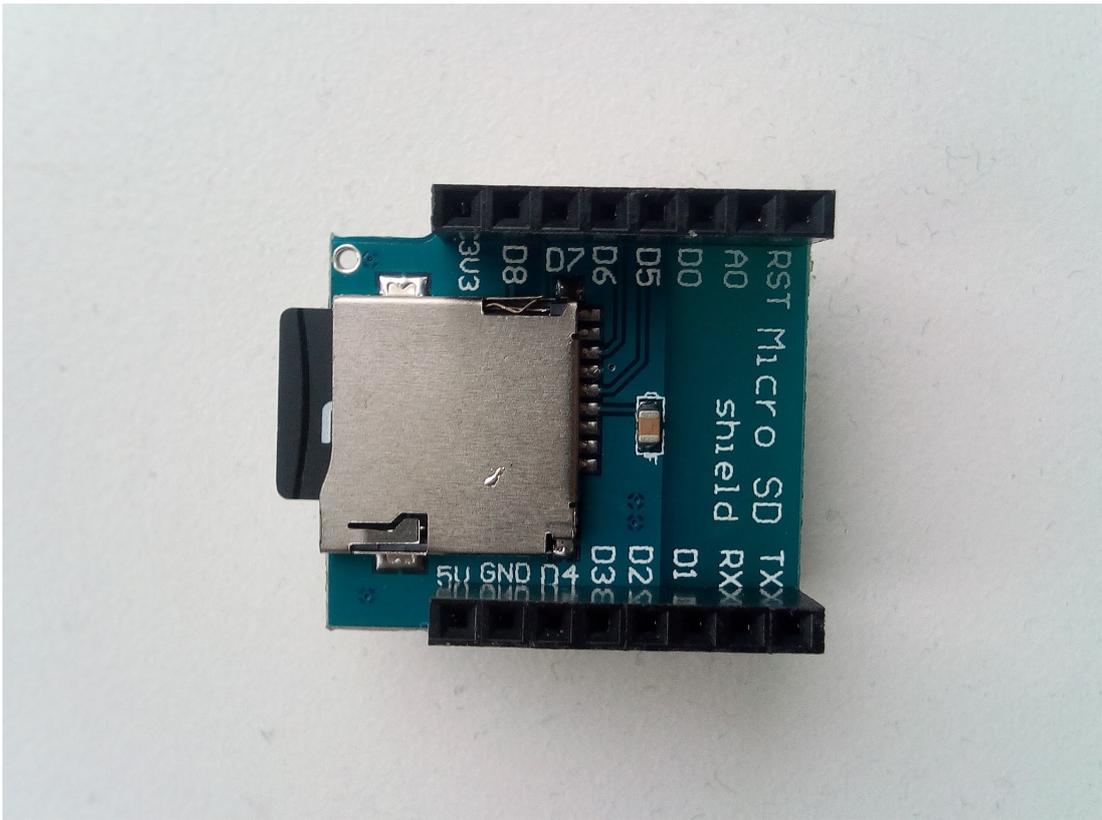


Рисунок 2.7 — Внешний вид платы расширения Micro SD Card Shield

2017-2-22 14:43:06	286.45	99684	34.42	285.85	31.50
2017-2-22 14:43:09	286.49	99685	34.44	285.15	34.70
2017-2-22 14:43:11	286.51	99684	34.46	285.15	34.70
2017-2-22 14:43:14	286.50	99677	34.48	285.05	34.80
2017-2-22 14:43:17	286.54	99680	34.93	285.05	34.80
2017-2-22 14:43:20	286.60	99687	35.23	285.05	35.00
2017-2-22 14:43:23	286.65	99685	35.49	285.05	35.40
2017-2-22 14:43:25	286.68	99684	35.67	285.05	35.70
2017-2-22 14:43:28	286.76	99686	35.76	285.15	35.80
2017-2-22 14:43:31	286.81	99687	35.76	285.15	36.10
2017-2-22 14:43:34	286.87	99685	35.78	285.15	36.20
2017-2-22 14:43:37	286.92	99679	35.78	285.15	36.30
2017-2-22 14:43:39	287.00	99680	35.79	285.15	36.40
2017-2-22 14:43:42	287.07	99682	35.76	285.25	36.50
2017-2-22 14:43:45	287.13	99678	35.71	285.25	36.50
2017-2-22 14:43:48	287.18	99680	35.64	285.35	36.50
2017-2-22 14:43:51	287.25	99680	35.59	285.35	36.40
2017-2-22 14:43:53	287.31	99680	35.54	285.45	36.40
2017-2-22 14:43:56	287.38	99681	35.50	285.45	36.40
2017-2-22 14:43:59	287.46	99680	35.44	285.55	36.30

Рисунок 2.8 — Формат сохраненного файла на карте памяти

2.6 Датчик давления BME280

Датчик давления BME280 также может измерять температуру и влажность. Но в данной работе он используется только для измерения давления, так как датчик температуры и влажности DHT22 более точный. Технические характеристики датчика BME280 представлены в таблице [2.2](#). На рисунке [2.9](#) изображен датчик давления BME280.

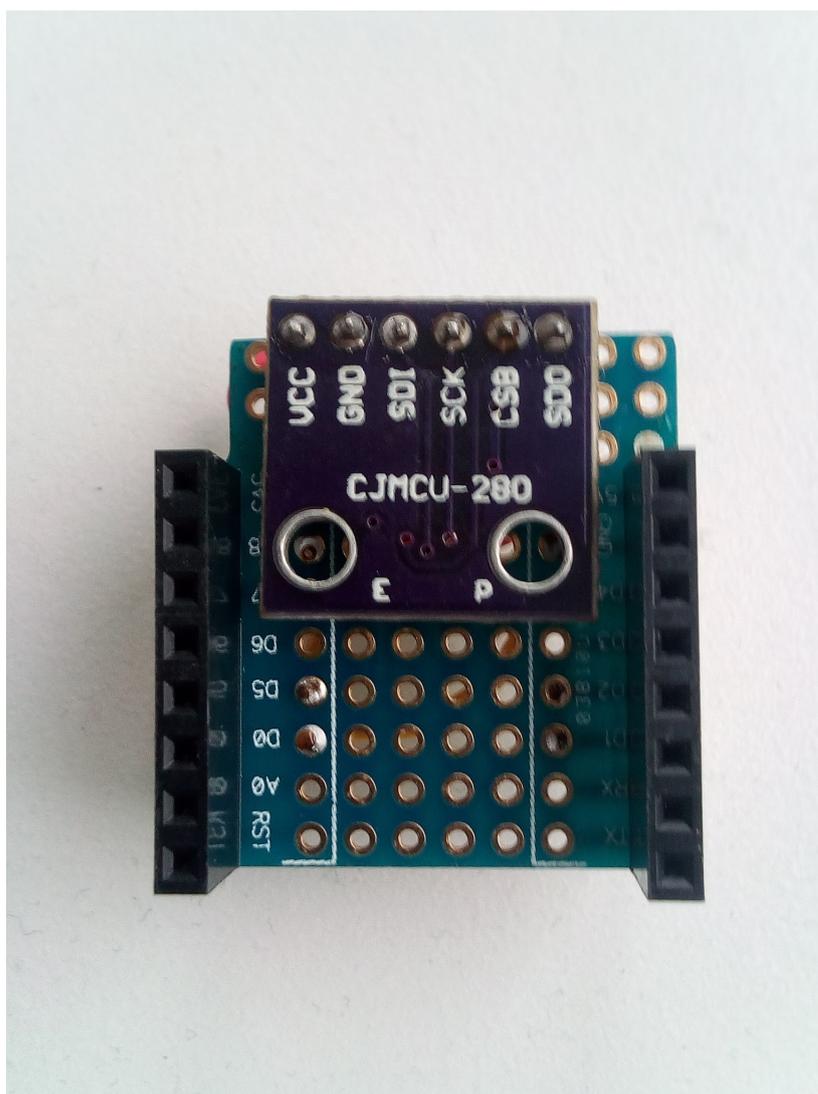


Рисунок 2.9 — Внешний вид датчика давления BME280

2.7 Датчик аэрозолей DSM501a

Датчик аэрозолей измеряет количество частиц размером больше 1 микрометра. Есть возможность одновременно измерять частицы размером больше 1

Таблица 2.1 — Технические характеристики датчика DHT22 (AM2302) [9]

Параметр	Значение
Питание, В	3.3...6
Выходной сигнал	Цифровой
Чувствительный элемент	Полимерный конденсатор
Рабочий диапазон	Влажность 0...100%; Температура -40...+80С
Точность	Влажность $\pm 2\%$; Температура $< \pm 0.5С$
Чувствительность	Влажность 0.1%; Температура 0.1С
Период измерений, сек	Минимум 2
Размеры, мм	14*18*5.5

Таблица 2.2 — Технические характеристики датчика давления BME280 [10]

Параметр	Значение
Питание, В	1.7...3.6
Потребляемый ток в режиме ожидания, мкА	0.1
Интерфейсы	I2C и SPI
Рабочий диапазон, ГПа	300...1100
Точность, ГПа	± 1.0
Размеры, мм	2.5*2.5*0.93

микрометра и больше 2.5 микрон, что очень удобно. Технические характеристики датчика приведены в таблице [2.3](#). На рисунке [2.10](#) изображен датчик аэрозолей DSM501a.

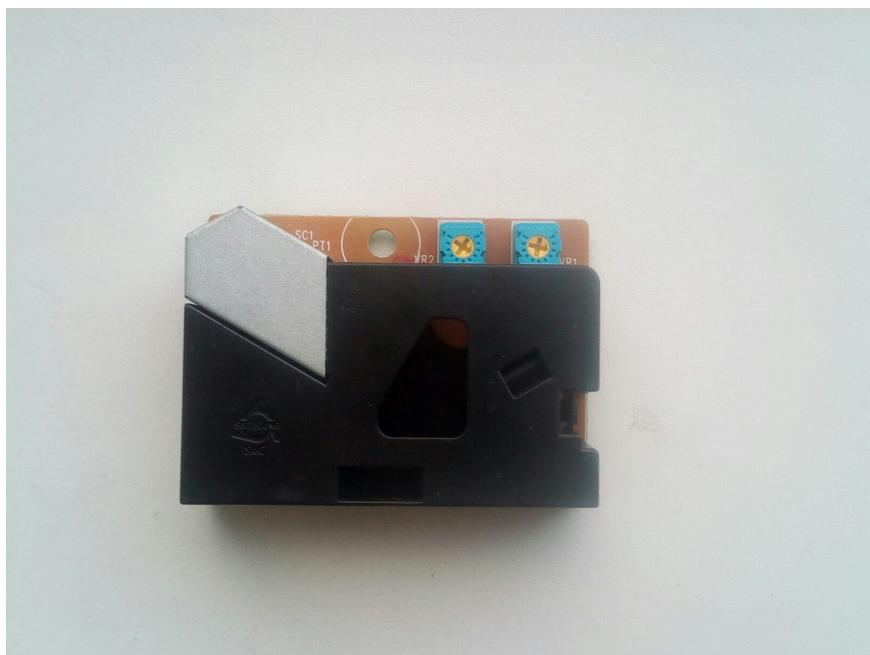


Рисунок 2.10 — Внешний вид датчика аэрозолей DSM501a

2.8 Корпус метеорологического зонда

Для того, чтобы микроконтроллер и все датчики были защищены от солнечной радиации, использовался пластиковый корпус белого цвета с вентиляцией в верхней части корпуса. Он имеет небольшие размеры: 135 мм в длину, 90 мм в ширину и 45 мм в высоту. Внутреннее строение корпуса подходит под установку микроконтроллера и всех датчиков. На рисунках [2.11](#) и [2.12](#) изображены внешний вид корпуса и его схема с размерами.

2.9 Конструкция метеорологического зонда

Метеорологический зонд, основанный на микроконтроллере очень дешевый и компактный. Все части используемые для сборки зонда можно найти и заказать в интернете. Разрабатываемый прибор состоит из всех выше описанных частей, таких как:



Рисунок 2.11 — Внешний вид корпуса

- корпус белого цвета, защищающий микроконтроллер и все датчики от солнечной радиации;
- платформа Wemos D1 mini на основе микроконтроллера ESP-8266EX, которая является очень компактной, надежной, производительной и эффективной к использованию питания;
- двойная плата расширения, позволяющая расширить потенциал платформы Wemos D1 mini;
- плата расширения DHT Pro Shield, которая представляет собой удобный модуль с датчиком температуры и влажности DHT22;
- плата расширения Micro SD Card Shield, которая позволяет сохранять данные измерений на карту памяти;
- датчик давления BME280, который также может измерять температуру и влажность воздуха;
- датчик аэрозолей DSM501a, измеряющий частицы с размерами более 1 мкм.

Принцип действия разработанного устройства таков: микроконтроллер по Wi-Fi подключается к точке доступа с интернетом, чтобы настроить точное время. Датчики измеряют температуру, влажность и давление в цифровом виде, которые

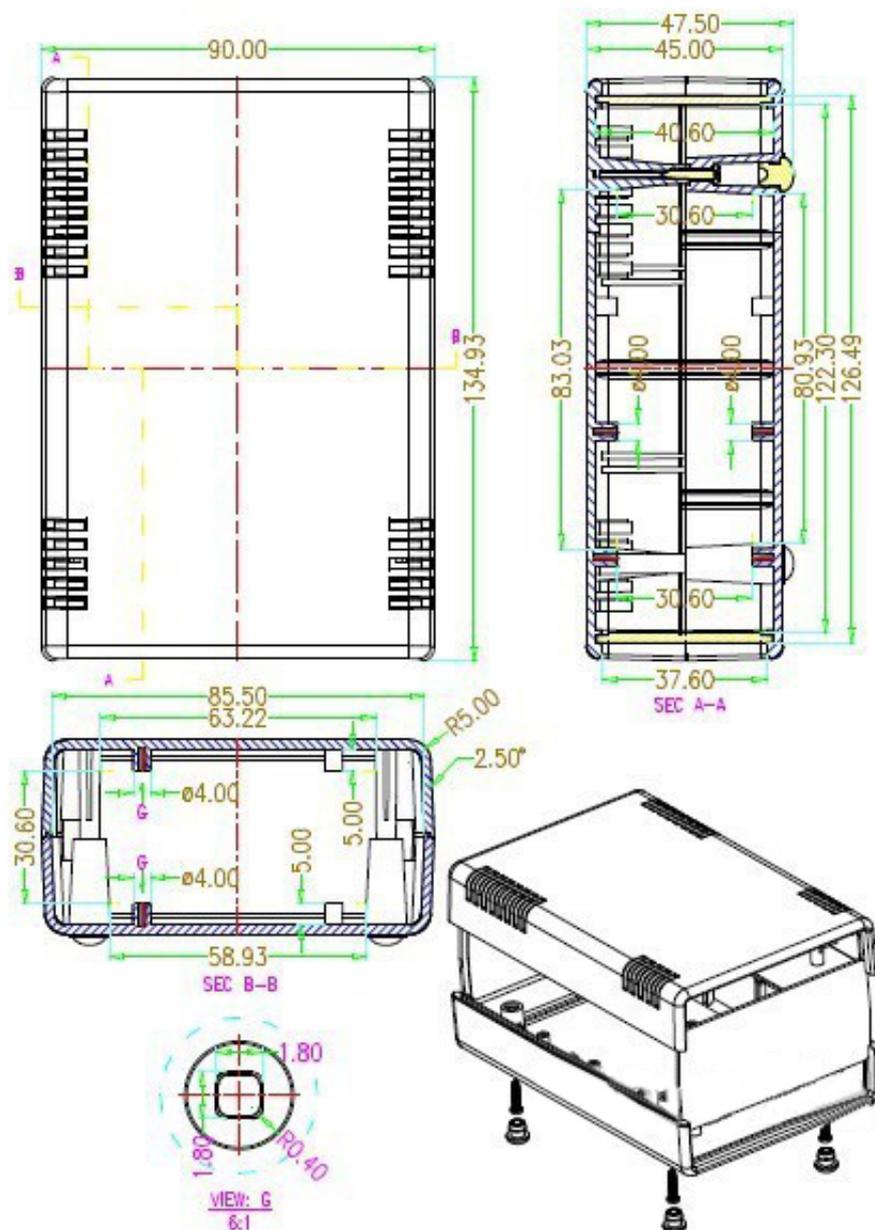


Рисунок 2.12 — Схема корпуса с размерами

микроконтроллер ESP-8266EX преобразует в реальные значения. Затем в удобном для нас виде преобразованные значения сохараются на установленную карту памяти. Питание подается от беспилотного летательного аппарата.

Схема метеорологического зонда изображена на рисунке [2.13](#).

2.10 Программное обеспечение

Для написания программного обеспечения воспользуемся средой разработки Arduino IDE. С помощью встроенного текстового редактора можно написать

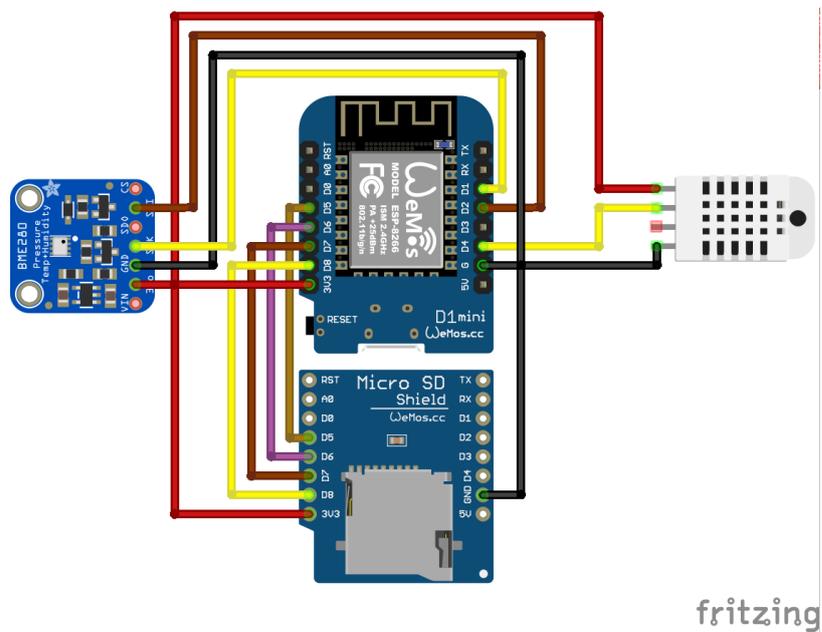


Рисунок 2.13 — Схема метеорологического зонда

скетч, затем скомпилировать и загрузить его в микроконтроллер. В приложении А представлен код программного обеспечения.

В итоге был сконструирован метеозонд, который можно использовать многократно. А также создано программное обеспечение для него.

Таблица 2.3 — Технические характеристики датчика аэрозолей DSM501a [11]

Параметр	Значение
Питание, В	5
Потребляемый ток, мА	90
Рабочий диапазон температуры, С	-10...+65
Рабочий диапазон влажности, %	95 или меньше
Диапазон концентрации, мг/м ³	0...1.4
Выходной сигнал	ШИМ (Широтно-импульсная модуляция)
Размеры, мм	59*45*20 мм

3 Анализ результатов измерений

3.1 Результаты лабораторных испытаний

В первую очередь была определена тепловая инерция датчика температуры DHT22. В лабораторных условиях были осуществлены измерения путем предварительного охлаждения датчика и последующего размещения в комнатных условиях. Обработка результатов измерений осуществлялась с использованием скриптов на языке программирования Python и заключалась в расчете времени тепловой инерции датчика температуры и визуализации результатов измерений, которые представлены на рисунке [3.1](#). Скрипт для обработки результатов измерений представлен в приложении Б.

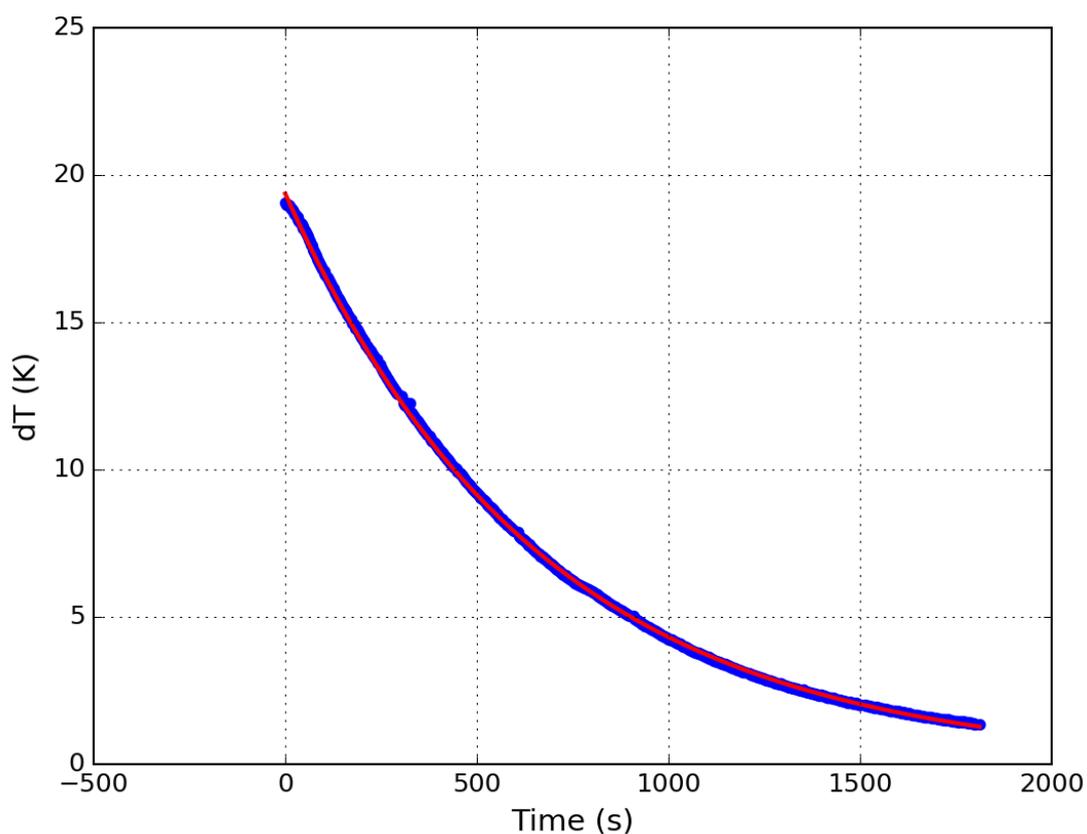


Рисунок 3.1 — График результатов измерений

Тепловая инерция датчика температуры оказалась равной около 670 секунд (более 11 минут). Это время сопоставимо со всем временем нахождения беспилотного летательного аппарата в полете (20 минут). Чтобы уменьшить теп-

ловую инерцию датчика температуры, была сделана аспирация воздуха в корпусе метеозонда. На рисунках [3.2](#) и [3.3](#) изображена конструкция метеозонда после модификации.



Рисунок 3.2 — Вид спереди

После модификации конструкции, было проделано тоже самое, что описывалось в начале раздела. Визуализация результатов измерений представлены на рисунке [3.4](#).

Тепловая инерция датчика температуры уменьшилась примерно в четыре раза и стала равной 144 секунды. На быстро поднимающемся беспилотном летательном аппарате это много (задержка более двух минут). Решение этой проблемы такое, измерение будет проводится на отдельных уровнях, где аппарат будет зависать на время измерений.

3.2 Результаты полевых испытаний

Перед запуском БПЛА метеозонд крепится к нижней части БПЛА и подключается к бортовой электрической сети БПЛА. При включении метеорологи-



Рисунок 3.3 — Вид сзади

ческого зонда измерения всех метеопараметров начинают автоматически записываться на SD-карту с интервалом в 2 с. Затем, БПЛА вместе с зондом поднимется вертикально вверх до 200 м и опускается обратно на земной поверхности. После приземления, метеозонд снимается с БПЛА, а БПЛА разбирается. Для обработки полученных данных разработано специализированное программное обеспечение, которое представлено в приложении В. На рисунке [3.5](#) изображен график результатов измерений вертикального профиля влажности воздуха. Максимальная высота, на которую поднимался БПЛА составила 210 м.

В результате, были проведены лабораторные испытания, которые показали, что следует модифицировать корпус метеозонда. Была встроена система аспирации в корпус для уменьшения тепловой инерции датчика температуры. Тепловая инерция датчика температуры уменьшилась в четыре раза и составила 144 секунды. При проведении полевых испытаний метеозонд измерил вертикальный профиль влажности воздуха до высоты 210 метров.

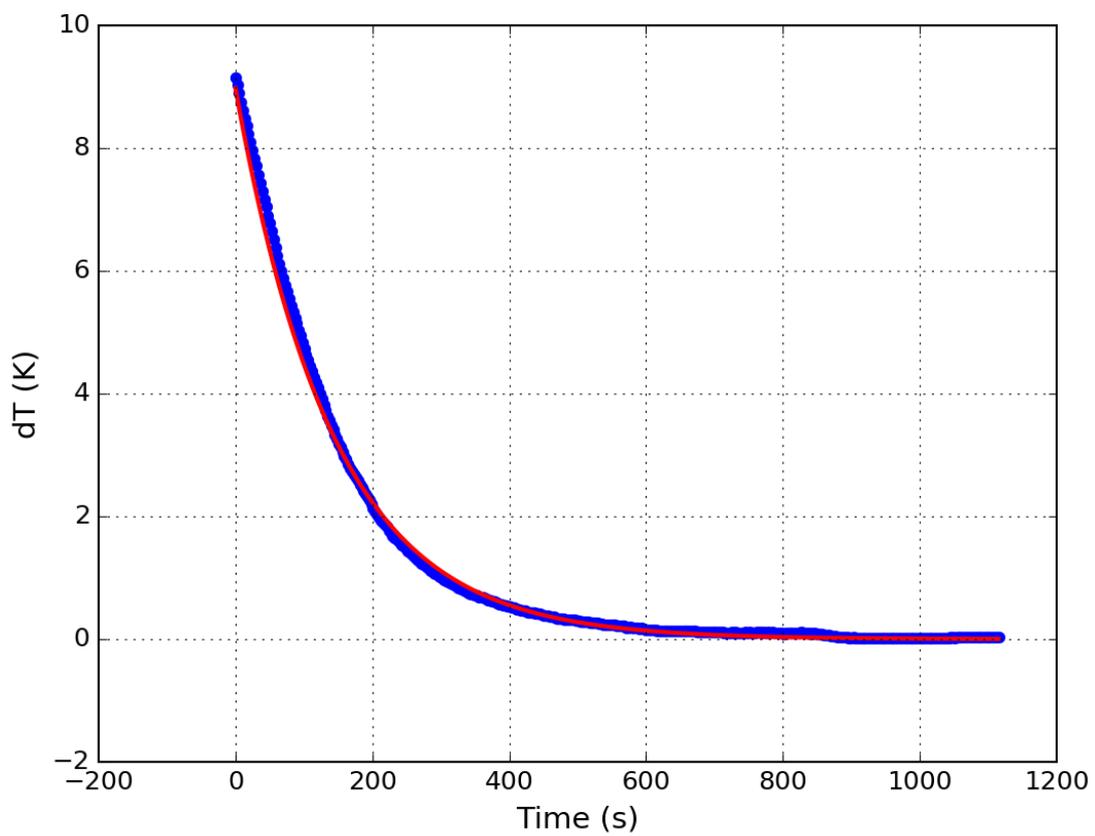


Рисунок 3.4 — График результатов измерений

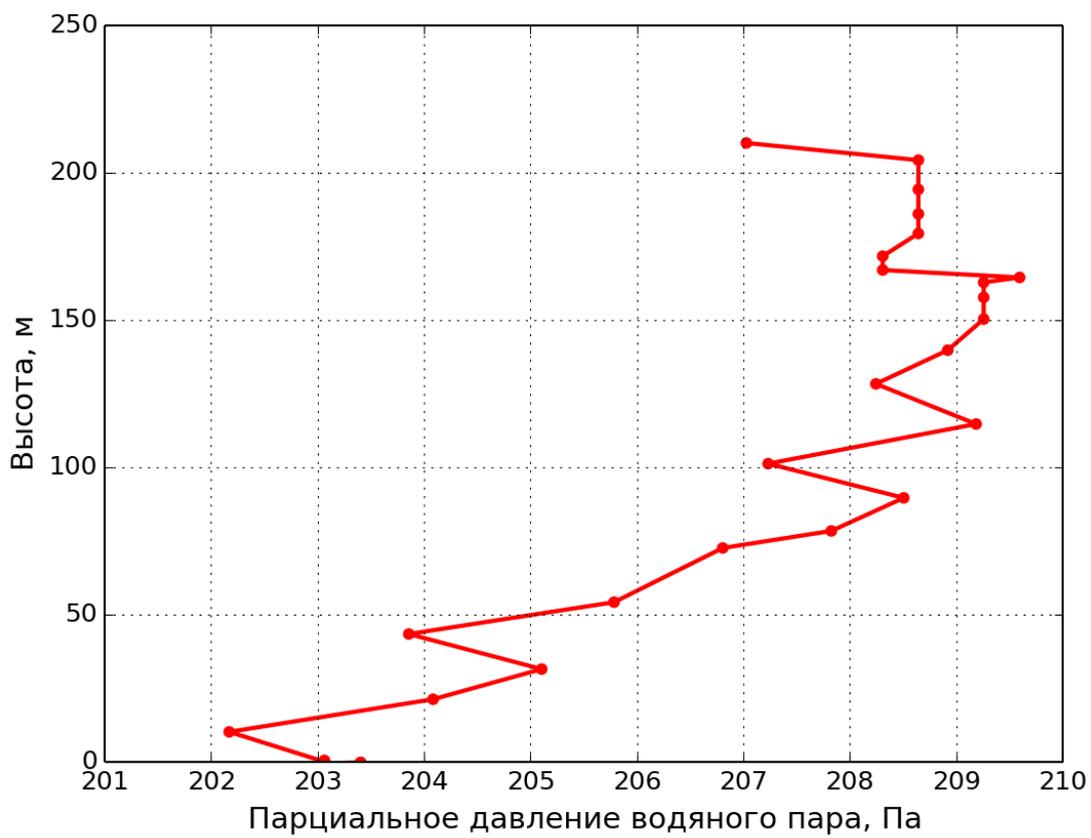


Рисунок 3.5 — График результатов измерений вертикального профиля влажности воздуха

Заключение

В ходе проделанной работы получены следующие результаты:

- рассмотрены различные методы зондирования атмосферы;
- создан метеорологический зонд на основе микроконтроллера ESP-8266EX и датчиков атмосферного давления (BME280), температуры и влажности воздуха (DHT22);
- создана система аспирации в корпусе метеозонда;
- разработано и протестировано программное обеспечение для метеозонда;
- Осуществлены лабораторные и натурные измерения;
- создан алгоритм и программное обеспечение для обработки полученных данных измерений;
- проанализированы полученные данные.

В ходе написания бакалаврской квалификационной работы все поставленные задачи были выполнены. Разработан метеорологический зонд и программное обеспечение для него. Проведенные эксперименты показали принципиальную возможность осуществления измерения метеопараметров приземного слоя атмосферы с борта беспилотного летательного аппарата.

Следует отметить, что созданный метеорологический зонд имеет стоимость ниже одноразовых метеозондов и при этом многократен в использовании.

Список использованных источников

- 1 Киселев В.Н. Методы зондирования окружающей среды (атмосферы) [Текст] / В.Н. Киселев, А.Д. Кузнецов. - СПб.:РГГМУ, 2004. - 429 с.
- 2 РД Временные методические указания по производству радиозондирования атмосферы системой МАРЛ-А - МРЗ-ЗАТ. - М: 2002. - 31 с.
- 3 International ATOVS Processing Package. - URL: <http://cimss.ssec.wisc.edu/opsats/polar/iapp/IAPP.html> (дата обращения: 07.05.2017)
- 4 Wikipedia. - URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Radiococcultation>(дата обращения : 07.05.2017)
- 5 Пичугин М.К. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса [Текст] / В.Н. Киселев, А.Д. Кузнецов. - 2012. Т.9. № 4. С. 186 - 193
- 6 Arduino. - URL: <https://www.arduino.cc/> (дата обращения: 29.05.2017)
- 7 Espressif. - URL: <https://espressif.com/en/products/hardware/esp8266ex/overview> (дата обращения: 29.05.2017)
- 8 Wemos. - URL: https://wiki.wemos.cc/products:d1:d1_mini (дата обращения: 29.05.2017)
- 9 Liu T. Digital-output relative humidity temperature sensor/module DHT22. - Aosong Electronics Co.,Ltd.
- 10 BME280 Combined humidity and pressure sensor. - Bosch Sensortec.
- 11 DSM501 Dust Sensor Module . - Samyoung Co., Ltd.

Приложение А

Код программного обеспечения для метеорологического зонда

```
// Подключаем библиотеки
#include "DHT.h"
#include <Wire.h>
#include <SPI.h>
#include <SD.h>
#include <Adafruit_Sensor.h>
#include <Adafruit_BME280.h>
#include <ESP8266WiFi.h>
#include <WiFiUdp.h>
#include <TimeLib.h>

// Определяем давление на уровне моря
#define SEALEVELPRESSURE_HPA (1013.25)

// Определяем цифровой канал для датчика DHT22
#define DHTPIN D4

// Определяем тип датчика температуры и влажности
#define DHTTYPE DHT22

DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);
Adafruit_BME280 bme;
const int chipSelect = D8;
File myFile;

// Логин и пароль сети
const char* ssid = "Pocmeteo";
const char* password = "*****";

static const char ntpServerName[] = "us.pool.ntp.org";
```

```

const int timeZone = 3;      // Central European Time

WiFiClient client;
WiFiUDP Udp;
unsigned int localPort = 8888;

time_t getNtpTime();
void digitalClockDisplay();
void printDigits(int digits);
void sendNTPpacket(IPAddress &address);

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  WiFi.begin(ssid, password);

  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
    delay(500);
    Serial.print(".");
  }

  Serial.println("");
  Serial.println("WiFi connected");

  dht.begin();

  Udp.begin(localPort);
  setSyncProvider(getNtpTime);
  setSyncInterval(300);

  if (!bme.begin()) {
    Serial.println("Не получается найти BME!");
    while (1) {}
  }
}

```

```

if (!SD.begin(chipSelect)) {
    Serial.println("Ошибка инициализации SD карты!");
    return;
}

}

void loop() {
    delay(2500);

    float h = dht.readHumidity();

    float t = dht.readTemperature() + 273.15;

    float bmet = bme.readTemperature() + 273.15;

    int bmeP = bme.readPressure();

    float bmeH = bme.readHumidity();

    if (isnan(h) || isnan(t)) {
        Serial.println("Ошибка чтения из DHT!");
        return;
    }

    String firstTime = "";
    firstTime += year();
    firstTime += "-";
    firstTime += month();
    firstTime += "-";
    firstTime += day();
    firstTime += " ";
}

```

```

firstTime += hour();
firstTime += ":";
if (minute() < 10) {
    firstTime += "0";
}
firstTime += minute();
firstTime += ":";
if (second() < 10) {
    firstTime += "0";
}
firstTime += second();

String file_name = String(month());
file_name += day();
file_name += ".txt";

myFile = SD.open( file_name , FILE_WRITE );

if (myFile) {
    myFile.print(firstTime);
    myFile.print("\t");
    myFile.print(bmet);
    myFile.print("\t");
    myFile.print(bmep);
    myFile.print("\t");
    myFile.print(bmeh);
    myFile.print("\t");
    myFile.print(t);
    myFile.print("\t");
    myFile.print(h);
    myFile.print("\n");
    myFile.close();
} else {

```

```
    Serial.println("Ошибка открытия файла!");  
}
```

```
Serial.print("Влажность DHT22: ");  
Serial.print(h);  
Serial.println(" %");  
Serial.print("Температура DHT22: ");  
Serial.print(t);  
Serial.println(" *C");  
Serial.print("Давление BME280: ");  
Serial.print(bmer);  
Serial.println(" Па");  
Serial.print("Температура по BME280: ");  
Serial.print(bmet);  
Serial.println(" *C");  
Serial.print("Влажность BME280: ");  
Serial.print(bmeh);  
Serial.println(" %");  
Serial.println(file_name);  
Serial.println();
```

```
}
```

```
/*----- NTP code -----*/
```

```
const int NTP_PACKET_SIZE = 48; // NTP time is in the first 48 bytes of me  
byte packetBuffer[NTP_PACKET_SIZE]; //buffer to hold incoming & outgoing p
```

```
time_t getNtpTime()
```

```
{
```

```
    IPAddress ntpServerIP; // NTP server's ip address
```

```
    while (Udp.parsePacket() > 0) ; // discard any previously received packe
```

```
    Serial.println("Transmit NTP Request");
```

```
    // get a random server from the pool
```

```

WiFi.hostByName(ntpServerName, ntpServerIP);
Serial.print(ntpServerName);
Serial.print(": ");
Serial.println(ntpServerIP);
sendNTPpacket(ntpServerIP);
uint32_t beginWait = millis();
while (millis() - beginWait < 1500) {
    int size = Udp.parsePacket();
    if (size >= NTP_PACKET_SIZE) {
        Serial.println("Receive NTP Response");
        Udp.read(packetBuffer, NTP_PACKET_SIZE); // read packet into the bu
        unsigned long secsSince1900;
        // convert four bytes starting at location 40 to a long integer
        secsSince1900 = (unsigned long)packetBuffer[40] << 24;
        secsSince1900 |= (unsigned long)packetBuffer[41] << 16;
        secsSince1900 |= (unsigned long)packetBuffer[42] << 8;
        secsSince1900 |= (unsigned long)packetBuffer[43];
        return secsSince1900 - 2208988800UL + timeZone * SECS_PER_HOUR;
    }
}
Serial.println("No NTP Response :-(");
return 0; // return 0 if unable to get the time
}

// send an NTP request to the time server at the given address
void sendNTPpacket(IPAddress &address)
{
    // set all bytes in the buffer to 0
    memset(packetBuffer, 0, NTP_PACKET_SIZE);
    // Initialize values needed to form NTP request
    // (see URL above for details on the packets)
    packetBuffer[0] = 0b11100011; // LI, Version, Mode
    packetBuffer[1] = 0; // Stratum, or type of clock

```

```
packetBuffer[2] = 6;    // Polling Interval
packetBuffer[3] = 0xEC; // Peer Clock Precision
// 8 bytes of zero for Root Delay & Root Dispersion
packetBuffer[12] = 49;
packetBuffer[13] = 0x4E;
packetBuffer[14] = 49;
packetBuffer[15] = 52;
// all NTP fields have been given values, now
// you can send a packet requesting a timestamp:
Udp.beginPacket(address, 123); //NTP requests are to port 123
Udp.write(packetBuffer, NTP_PACKET_SIZE);
Udp.endPacket();
}
```

Приложение Б

Скрипт для обработки результатов измерений

```
#!/usr/bin/env python
# coding: utf8

from __future__ import unicode_literals
from numpy import *
from datetime import *
from matplotlib.pyplot import *

# Создаем пустые списки
time      = []
dT        = []
deftime   = []
lndT      = []
T          = []
dT2       = []

# Открываем файл
fd = open("63.TXT", "r")

# Загружаем данные построчно
for line in fd:
    # Разбиваем строку на отдельные слова по символу табуляции
    data = line.split("\t")
    # Если в строке не шесть слов, то переходим к следующей строке
    if len(data)!=6:
        continue
    # Добавляем время
    time.append( datetime.strptime(data[0], "%Y-%m-%d %H:%M:%S") )
    # Добавляем температуру воздуха
```

```

T.append( float(data[1]) )

# Рассчитываем вспомогательные значения для аппроксимации
for i in range(len(time)):
    deftime.append( (time[i] - time[0]).seconds )
    dT.append( abs(T[i] - 292.92) )
    lndT.append( log(dT[-1]) )

# Находим коэффициенты линейной аппроксимации зависимости ln(dT) от времени
a = polyfit(deftime[0:200], lndT[0:200], 1)

A = exp(a[1])
B = a[0]
# Рассчитываем значения dT по аппроксимационной формуле
for i in range(len(deftime)):
    dT2.append( A * exp(B*deftime[i]) )

# Выводим значение времени релаксации (тепловой инерции термометра)
print "Время тепловой инерции термометра: %.0f с" % (1.0/abs(B))
print T

# Создаем график
plot(deftime, dT2, color="red", lw=2)
scatter(deftime, dT, color="blue")
xlabel("Time (s)", fontsize=14)
ylabel("dT (K)", fontsize=14)
grid()
savefig("TvsP.png", dpi=150)
show()

```

Приложение В

Специализированное программное обеспечение для обработки полученных
данных

```
#!/usr/bin/env python
# coding: utf8

from __future__ import unicode_literals
from numpy import *
from datetime import *
from matplotlib.pyplot import *

# Давление насыщения водяного пара над плоской поверхностью чистой воды
# (формула Магнуса)
# Входной параметр:
# T - температура воздуха, К
# Выходной параметр:
# E - давление насыщения водяного пара, Па
def es(T):
    return 610.78*10**(7.63*(T-273.15)/(T-31.25))

# Создаем пустые списки
time = []
z     = []
T     = []
P     = []
e     = []
Tdht = []
edht = []
```

```

# Имя файла данных
filename = "2017-2-9"

# Открываем файл
fd = open(filename, "r")

# Загружаем данные построчно
for line in fd:
    # Разбиваем строку на отдельные слова по символу табуляции
    data = line.split("\t")
    # Если в строке не шесть слов, то переходим к следующей строке
    if len(data)!=6:
        continue
    # Добавляем время
    time.append( datetime.strptime(data[0], "%Y-%m-%d %H:%M:%S") )
    # Добавляем температуру воздуха
    T.append( float(data[1]) )
    # Добавляем атмосферное давление
    P.append( float(data[2]) )
    # Добавляем парциальное давление водяного пара
    e.append( (float(data[3])) )
    Tdht.append( float(data[4]) )
    edht.append( (float(data[5])/100)*es(Tdht[-1]) )
z.append( 0 )

#Рассчитываем высоту
for i in range(1, len(Tdht)):
    if ( T[i] == T[i - 1] ):
        z.append( -((287 * T[i - 1] * log(P[i]/P[i - 1]))/(9.81)) + z[i - 1] )
    else:
        z.append( -((287 * (T[i] - T[i - 1]) * log(P[i]/P[i - 1]))/(9.81 * log(1.0
print Tdht, z

```

```
# Создаем график
plot(e, z)
xlabel("%", fontsize=14)
ylabel("Z(m)", fontsize=14)
grid()
savefig("ZvsE.png", dpi=150)
show()
```