



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

**Кафедра Экспериментальной физики атмосферы**

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**  
(бакалаврская работа)

**На тему «Чувствительность и инерция метеорологических измерительных приборов»**

**Исполнитель** **Никитина Виктория Сергеевна**  
(фамилия, имя, отчество)

**Руководитель** кандидат физико-математических наук, доцент  
(ученая степень, ученое звание)  
**Восканян Карина Левановна**  
(фамилия, имя, отчество)

**«К защите допускаю»**  
**Заведующий кафедрой**

(подпись)  
доктор физико-математических наук, профессор  
(ученая степень, ученое звание)  
**Кузнецов Анатолий Дмитриевич**  
(фамилия, имя, отчество)

«18» мая 2020 г.

Санкт-Петербург  
2020

## Содержание

|                                                                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Введение .....                                                                                                                   | 3  |
| 1 Погрешность, чувствительность и инерция прибора .....                                                                          | 5  |
| 2 Сведения об измерении скорости ветра .....                                                                                     | 9  |
| 2.1 Способы измерения скорости ветра .....                                                                                       | 11 |
| 2.2 Виды анемометров .....                                                                                                       | 12 |
| 2.2.1 Индукционные анемометры.....                                                                                               | 12 |
| 2.2.2 Импульсные (контактные) анемометры.....                                                                                    | 15 |
| 2.2.3 Лазерный доплеровский анемометр .....                                                                                      | 16 |
| 2.2.4 Акустические анемометры.....                                                                                               | 18 |
| 2.3 Теория ротоанемометров .....                                                                                                 | 20 |
| 3 Расчёт инерционных погрешностей ротоанемометров .....                                                                          | 28 |
| 3.1 Определение задержки во времени в зависимости от средней скорости<br>ветра .....                                             | 29 |
| 3.2 Определение задержки во времени в зависимости от амплитуды<br>флуктуаций скорости ветра .....                                | 32 |
| 3.3 Определение задержки во времени в зависимости от периода<br>флуктуаций скорости ветра .....                                  | 34 |
| 3.4 Вычисление среднего значения показаний анемометра .....                                                                      | 34 |
| 3.5 Определение превышения значений скорости ветра в зависимости от<br>амплитуды флуктуаций.....                                 | 37 |
| 3.6 Определение превышения значений скорости ветра в зависимости от<br>средней скорости ветра .....                              | 38 |
| 3.7 Определение превышения значений скорости ветра и времени<br>стабилизации показаний в зависимости от пути синхронизации ..... | 39 |
| 4 Инерционная погрешность ротоанемометров, установленных на морских<br>буйковых станциях.....                                    | 43 |
| Заключение .....                                                                                                                 | 51 |
| Список использованных источников .....                                                                                           | 54 |

## Введение

Атмосфера по своей природе представляет собой очень изменчивую систему – её состояние непрерывно меняется, и процессы, происходящие в ней, плавно перетекают один в другой. Такое переменчивое состояние оказывает большое влияние на жизнедеятельность человечества, поскольку метеорологические условия зачастую являются важнейшим фактором в некоторых отраслях деятельности. Именно поэтому первостепенной задачей является получение как можно более точных значений метеовеличин и создание точного прогноза погоды.

Составлению прогноза погоды предшествует сбор данных с определённой территории. В настоящее время наблюдения за погодой в основном производятся с помощью автоматических метеорологических станций, однако, и по сей день существуют станции, работающие традиционным способом, то есть предполагающие непосредственное участие метеоролога в сборе информации о погоде.

Получаемая информация должна быть точной настолько, насколько это возможно. Согласно «Наставлению гидрометеорологическим станциям и постам» [9] для измерений должны использоваться только приборы, которые рекомендованы для сети Государственной системы наблюдений и контроля природной среды, и соответствуют виду измерений. К каждому прибору обязательно должен прилагаться паспорт, в котором указаны технические характеристики прибора, и свидетельство о пригодности прибора для производства соответствующих измерений.

К сожалению, любые приборы измеряют метеовеличину с некоторой погрешностью. Это происходит из-за того, что каждый прибор состоит из элементов, которые преобразуют измеряемую величину в различные сигналы, воспринимаемые человеком или специальной аппаратурой. Из-за этих преобразований точность измерений понижается, соответственно, возрастают

погрешности измерений. Погрешность измерения связана с понятием чувствительности прибора.

Данная работа посвящена исследованию инерционных погрешностей приборов для измерения скорости ветра – ротоанемометров. Актуальность этой проблемы тем более важна, что многие отрасли народного хозяйства напрямую зависят от параметров ветра – например, авиация, судоходство, строительные работы, транспорт, спортивные мероприятия и многое другое.

Точность ротоанемометров зависит от влияния инерционных погрешностей при изменении скорости ветра. Для выявления этих ошибок необходимо определить характеристики составных частей ротоанемометра при различных флуктуациях скорости ветра. Чтобы понять, от чего зависят ошибки, необходимо изучить важный параметр прибора – его инерцию.

## 1 Погрешность, чувствительность и инерция прибора

Как уже было сказано выше, в ходе работы с тем или иным метеорологическим прибором, необходимо знать основные характеристики данного прибора, а именно – чувствительность, инерцию и погрешность. Эти характеристики показывают, насколько прибор пригоден для измерения в данных конкретных условиях.

Абсолютная чувствительность прибора представляет собой отношение изменения выходной величины  $Y$  к вызвавшему её изменению входной величины  $X$ . [3] С точки зрения математики это отношение можно выразить в виде производной:

$$S = \frac{dY}{dX} \quad (1.1)$$

Очевидно, что входная величина представляется собой ту величину, которую измеряет прибор (например, скорость ветра, давление или солнечная радиация). Выходная величина – это та величина, в которую преобразуется входная в ходе работы прибора. Это может быть отклонение стрелки прибора, высота столбика ртути и т.п. Если нам заранее известна зависимость  $Y(X)$ , то можно узнать чувствительность, проведя математические преобразования с формулой (1). Данная зависимость может быть достаточно простой (например, в случае с чувствительностью ртутного термометра, где входной величиной является температура окружающего воздуха, а входной – высота столбика ртути [3]) или сложной (например, в случае с чувствительностью импульсного фотометра ФИ-4, где входной величиной является метеорологическая дальность видимости, а выходной – напряжение, поступающее на цифровой вольтметр после прохождения составных блоков прибора [11]; или в случае с балансомером, где входной величиной выступает радиационный баланс, а выходной – ток, текущий через гальванометр.[2,5])

В случае если прибор состоит из нескольких блоков (рис. 1.1), то чувствительность прибора становится равной произведению чувствительности каждого из блоков.

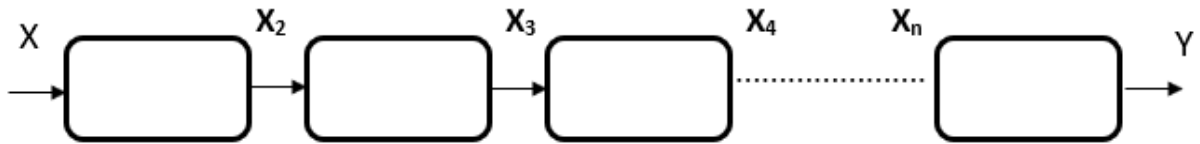


Рисунок 1.1 – Блок-схема сложного измерительного прибора

$$Y = f(X) = f(X_n(X_{n-1}(X_{n-2} \dots (X))) \quad (1.2)$$

$$\frac{dY}{dX} = \frac{dY}{dX_n} * \frac{dX_n}{dX_{n-1}} * \frac{dX_{n-1}}{dX_{n-2}} * \dots * \frac{dX_2}{dX} \quad (1.3)$$

Такое представление даёт возможность исследовать чувствительность прибора путём исследования чувствительности отдельных его блоков. Можно рассматривать чувствительность одного блока независимо от других и дать рекомендации по увеличению чувствительности прибора в целом.

Существует также понятие относительной чувствительности прибора. Она представляет собой отношение абсолютной чувствительности к значению выходной величины  $Y$  [3]:

$$S = \frac{1}{Y} \frac{dY}{dX} \quad (1.4)$$

Относительная чувствительность показывает, на какую часть от самой себя изменяется выходная величина при изменении входной величины на единицу.[3] Особенность относительной чувствительности в том, что она имеет

одну и ту же размерность для всех однотипных приборов (например, анемометров). Следовательно, мы можем производить сравнение приборов по их относительной чувствительности.

Ещё одной важной характеристикой прибора является погрешность измерения. Обычно она выражается как  $\pm \Delta X$ , где  $X$  – входная величина прибора (т.е. измеряемая величина). Погрешность измерения напрямую связана с чувствительностью. Очевидно, что чем больше чувствительность прибора, тем меньше будут значения погрешности. Математически это можно выразить так:

$$\Delta X = \frac{\Delta Y}{S}, \quad (1.5)$$

где  $S$  – чувствительность прибора;

$\Delta Y$  – погрешность измерения выходной величины.

$\Delta Y$  для стрелочных приборов как правило составляет половину деления шкалы. Для цифровых приборов эта величина определяется, исходя из физической природы выходной величины.

При определении погрешности прибора помимо величин, входящих в уравнение (1.5) следует учитывать погрешности, обусловленные влиянием на работу прибора других физических величин.[3]

Инерция прибора – третья важнейшая характеристика. Под инерцией прибора имеется в виду то обстоятельство, что прибор реагирует на изменение измеряемой величины не мгновенно, а с некоторой задержкой во времени. [3]

Каждый прибор обладает паспортом, в котором содержится информация об инерции прибора. В качестве численной характеристики инерции можно использовать понятие коэффициента инерции. Коэффициент инерции – это время, в течение которого разность между установившимися и текущими показаниями прибора уменьшается в  $e$  раз. [2,5] Иногда коэффициент инерции называют постоянной времени прибора.

У некоторых приборов невозможно точно указать коэффициент инерции, так как он зависит от внешних факторов. У ротационных анемометров вместо понятия коэффициента инерции используется путь синхронизации — путь, проходимый воздушным потоком за время, в течение которого разность между угловой скоростью вращения вертушки и установившейся угловой скоростью уменьшается в  $e$  раз.[3] Дело в том, что путь синхронизации является константой прибора, а время синхронизации (коэффициент инерции) — зависит от скорости ветра. Существуют также приборы, у которых инерция пренебрежимо мала или отсутствует совсем (например, акустические анемометры).

В случае сложного измерительного прибора, состоящего из нескольких измерительных блоков (рис. 1.1), общая инерция будет равна сумме инерций всех отдельных блоков.

Также нужно отметить зависимость между чувствительностью прибора и его инерцией. Если наша цель уменьшить инерцию, то в большинстве случаев и чувствительность прибора неизбежно уменьшится. Если наша цель повысить чувствительность, то и инерция прибора увеличится. Иными словами, улучшая одну характеристику, мы, как правило, неизбежно ухудшаем другую.



## 2 Сведения об измерении скорости ветра

Воздух в атмосфере всегда находится в непрерывном движении относительно поверхности земли. Это движение является следствием неоднородного распределения давления и температуры во всей толще атмосферы. Движение воздуха всегда направлено из области с высоким атмосферным давлением в область низкого атмосферного давления.

Под ветром принято понимать поток атмосферного воздуха, движущегося горизонтально относительно земной поверхности.[7] Однако, наряду с горизонтальными движениями воздуха, существуют также вертикальные, обусловленные особенностями рельефа определённой местности или температурой подстилающей поверхности. Вертикальные движения в сотни раз меньше горизонтальных, поэтому в метеорологии рассматривают только горизонтальные составляющие и, соответственно, под ветром подразумевают только их.

Как уже было сказано выше, ветер представляет собой движение, а значит, характеризуется скоростью и направлением. Скорость ветра представляет собой путь, пройденный воздушными частицами в единицу времени.[7] Скорость ветра – это векторная величина, она характеризуется модулем (то есть числовым значением) и направлением. Под самой скоростью ветра подразумевают численное значение, а под направлением скорости – направление вектора (т.е. направление, откуда дует ветер).

В метеорологии скорость ветра измеряется в метрах в секунду (м/с) или километрах в час (км/ч). Чтобы перевести скорость ветра из м/с в км/ч и обратно используют коэффициент перевода, равный 3,6. Если значение скорости ветра в м/с умножить на 3,6, получим скорость в км/ч, а если значение скорости в км/ч разделить на коэффициент, то мы получим значение скорости ветра в м/с. Иногда в качестве единицы измерения скорости ветра используют узлы. Обычно эта единица используется морскими или корабельными метеорологическими станциями. Чтобы перевести значение скорости ветра из

узлов в м/с, необходимо умножить его на коэффициент 0,5; а чтобы перевести в км/ч, необходимо умножить на коэффициент 1,8.

В повседневной жизни ветер часто оценивают не по значениям его скорости непосредственно, а по его силе. Для этого существует шкала Бофорта, по которой сила ветра измеряется в баллах. Эта шкала содержит в себе информацию об оценке действия ветра той или иной силы на состояние морской поверхности или наземных предметов.

За направление ветра в метеорологии принимается сторона горизонта, откуда перемещается воздушная масса. Направление ветра измеряется в градусах или румбах. Один градус равен  $1/360$  части всего горизонта, счёт градусов ведётся от северного конца географического меридиана по часовой стрелке от 0 до  $360^\circ$ . [7]

При измерении направления ветра в румбах принимается, что один румб составляет  $1/16$  часть горизонта. Существует 8 основных румбов – север, юг, восток, запад, северо-восток, юго-восток, северо-запад, юго-запад. Каждый из основных румбов занимает  $45^\circ$ . Кроме этого, существуют 8 дополнительных румбов – северо-северо-восток, юго-юго-восток, северо-северо-запад, юго-юго-запад, восток-северо-восток, восток-юго-восток, запад-юго-запад, запад-северо-запад.

Следует отметить, что в авиации и аэронавигации за направление ветра принимают не ту часть горизонта, откуда перемещается воздух, а ту часть, куда он перемещается. Аэронавигационное направление ветра отличается от метеорологического на  $180^\circ$ .

Для большего удобства проведения измерений скорости ветра были введены понятия мгновенной и сглаженной скорости ветра. Мгновенная скорость ветра – это скорость, при которой фиксировались сильные порывы ветра. Отметим, что ветер считается порывистым, если его скорость в течение 2 мин изменяется на 4 м/с и более. [7] Мгновенная скорость ветра может быть значительно выше сглаженной. Сглаженная скорость ветра – это осреднённое значение скорости ветра за небольшой временной промежуток наблюдений. На

метеорологических станциях при наблюдениях за ветром чаще всего определяют сглаженную скорость ветра, то есть определяют среднее значение скорости.

Наблюдения за скоростью и направлением ветра очень важны для решения ряда практических задач, например, для составления грамотного прогноза погоды. Измерения скорости ветра на метеорологических станциях производится приборами – анемометрами.

## 2.1 Способы измерения скорости ветра

Скорость ветра можно определить как производную от пути по времени. Такой метод определения называется прямым методом. Он используется в метеорологии при проведении шаропилотных наблюдений. Однако, для наблюдений на постоянной основе этот метод неудобен, поскольку он довольно трудоёмкий. Поэтому обычно используются косвенные методы измерения. В этом случае применяются преобразователи скорости ветра – датчики, которые при взаимодействии с потоками воздуха реагируют на изменение величины и преобразуют её в другую величину, измерить которую не представляется трудным. По физическим свойствам все преобразователи скорости воздушного потока можно разделить на 5 групп:

- методы, основанные на использовании энергии теплового потока;
- тепловые методы;
- методы, основанные на введении в поток невесомой метки и измерении её скорости;
- корреляционные методы;
- оптические методы.

В метеорологии для измерения скорости ветра применяются приборы, принцип действия которых основан на преобразовании скорости ветра в механическое перемещение чувствительного элемента. Чаще всего используются 3 вида чувствительных элементов – чашечные вертушки,

воздушный винт и свободно подвешенная пластина. В качестве примера прибора, у которого чувствительным элементом является вертушка или воздушный винт, может послужить ротоанемометр.

## 2.2 Виды анемометров

Анемометры – самые распространенные приборы, использующиеся на метеорологических станциях для измерения скорости ветра. Современные анемометры автоматически определяют среднюю и максимальную скорость ветра. Стандартная высота для установки анемометра на метеостанции – 10 м. Если анемометр расположен на другой высоте, то производится приведение результатов к стандартному уровню.

Существуют различные типы анемометров. Основные – чашечные или лопастные анемометры, состоящие из вертушки и генератора. Другая разновидность – анемометры по типу пропеллера, которые представляют собой продолговатый корпус обтекаемой формы, на котором закреплена флюгарка, поворачивающая корпус в направлении ветра. Ось корпуса и ось флюгарки соединяются с электрическим генератором, генерирующим электрический ток, пропорциональный скорости вращения флюгарки, т.е. скорости ветра.

Существуют и другие разновидности анемометров: акустические, способные измерять не только горизонтальную, но и вертикальную составляющую скорости ветра, лазерные доплеровские анемометры, у которых самый большой диапазон измерений, электрические тепловые анемометры с малой инерцией, индукционные анемометры, импульсные (контактные) анемометры. В метеорологии самым распространённым прибором для измерения скорости ветра является чашечный анемометр.

### 2.2.1 Индукционные анемометры

Этот тип анемометров подразделяется на дистанционные анемометры с генератором тока (рис. 2.1) и анемометр АРИ-49.

Индукционный анемометр с генератором тока состоит из датчика – чашечной вертушки или винта (1), ось которого (2) соединена с постоянным магнитом (3).

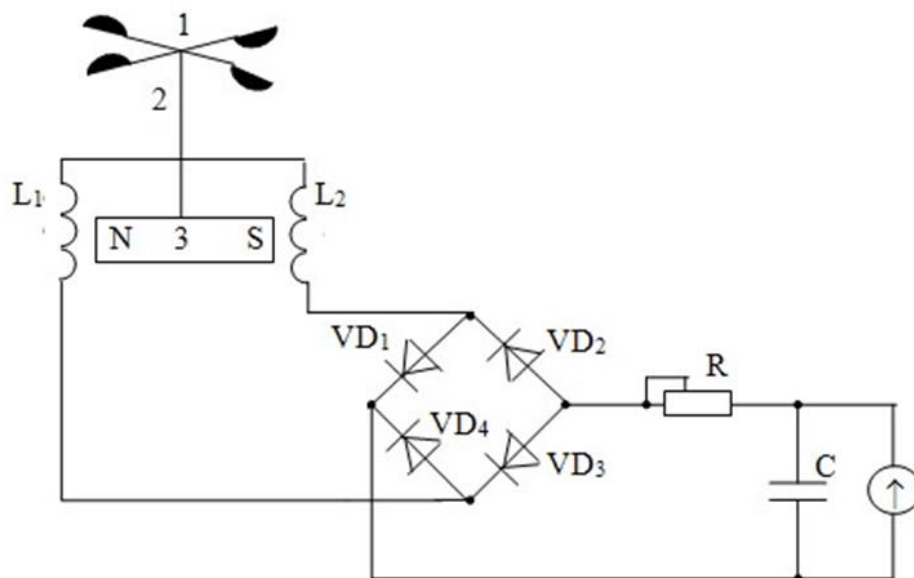


Рисунок 2.1 – Индукционный анемометр с генератором тока

Ось вертушки вращается с угловой скоростью  $\Omega$ , которая связана со скоростью ветра уравнением:

$$\Omega = \frac{V}{\sigma \cdot R}, \quad (2.1)$$

где  $\sigma$  – отношение  $\frac{V}{U}$ , то есть скорости ветра к линейной скорости чашки;

$R$  – радиус плеча вертушки,

$V$  – скорость ветра.

Вместе с вертушкой вращается магнит (3) с той же угловой скоростью. Около магнита расположены две неподвижные катушки  $L1$  и  $L2$ . В них возникает переменная ЭДС, амплитуда которой зависит от угловой скорости

вращения магнита. Данная конструкция представляет собой генератор переменного тока, который используется для измерения скорости ветра. Однако, непосредственно измерять амплитуду ЭДС неудобно, поэтому собирается схема, изображенная на рисунке 2.1. В нее включен выпрямитель на диодах VD1...VD4. На вертикальную диагональ мостовой диодной схемы подается переменный ток. Когда в верхней точке диагонали положительный полупериод, ток проходит через диод VD1 влево и не проходит вправо через VD2. Когда положительный полупериод подается на нижнюю точку мостовой схемы, ток проходит влево через диод VD4 и не проходит вправо через VD3. Поэтому в горизонтальной диагонали моста будет ток одного знака. Однако, этот ток пульсирующий и непосредственно его измерять его неудобно. Для измерения его стрелочным прибором необходим сглаживающий RC - фильтр, состоящий из конденсатора С и сопротивления R. Конденсатор заряжается через сопротивление тогда, когда амплитуда высока. Зарядка происходит сравнительно медленно. В промежутках между полупериодами происходит разрядка конденсатора – тоже довольно медленно. В результате напряжение на конденсаторе меняется очень незначительно, практически оно постоянно. Возникающий постоянный ток измеряют стрелочным или цифровым прибором.

Анемометр АРИ-49 не является дистанционным прибором, при измерениях его необходимо держать в руке. Это довольно грубый прибор, имеющий большие погрешности.[3]

Внешний вид и устройство прибора показаны на рисунке 2.2. Магнит (3) вращается внутри металлической чашки (4) чашечной вертушкой (1). Чашка может поворачиваться вокруг своей оси, но она удерживается пружиной (5) в нейтральном положении. Магнитное поле постоянного магнита возбуждает индукционные токи в корпусе чашки, которые возрастают, если возрастает скорость ветра. В свою очередь, индукционные токи возбуждают вторичное магнитное поле, которое взаимодействует с магнитным полем постоянного магнита. Это взаимодействие влияет так, что вторичное поле тормозит вращение магнита. Но магнит связан с вертушкой, поэтому чашка увлекается

вслед за магнитом. Таким образом, чашка поворачивается на некоторый угол, тем больший, чем быстрее вращается магнит, т.е., чем больше скорость ветра. Этот угол показывается стрелкой на шкале (6), проградуированной в метрах в секунду.[3]



Рисунок 2.2 – Внешний вид и устройство анемометра АРИ-49

### 2.2.2 Импульсные (контактные) анемометры

В случае импульсных анемометров мерой скорости ветра является частота импульсов, генерируемых с помощью какого-либо устройства.

Устройство прибора показано на рисунке 2.3. Датчиком скорости ветра является чашечная вертушка (1). На ее оси (2) укреплен постоянный магнит (3), который вращается вместе с вертушкой. Рядом с магнитом находится геркон (4), соединенный с источником тока (5). Когда один из полюсов магнита оказывается рядом с герконом, его лепестки замыкаются, и на выходе появляется импульс тока. Таким образом, частота импульсов зависит от угловой скорости вращения магнита, т.е. от скорости ветра. Для измерения частоты импульсов применяются частотомеры, преобразующие частоту в напряжение, измеряющееся стрелочным или цифровым прибором. В более современных цифровых приборах применяются цифровые счетчики,

осуществляющие подсчет электрических импульсов за определенное время, задаваемое таймером. Преимущество импульсных анемометров в том, что измеряемым параметром является частота импульсов, а не амплитуда, поскольку частота гораздо меньше подвержена искажениям, чем амплитуда.[3]

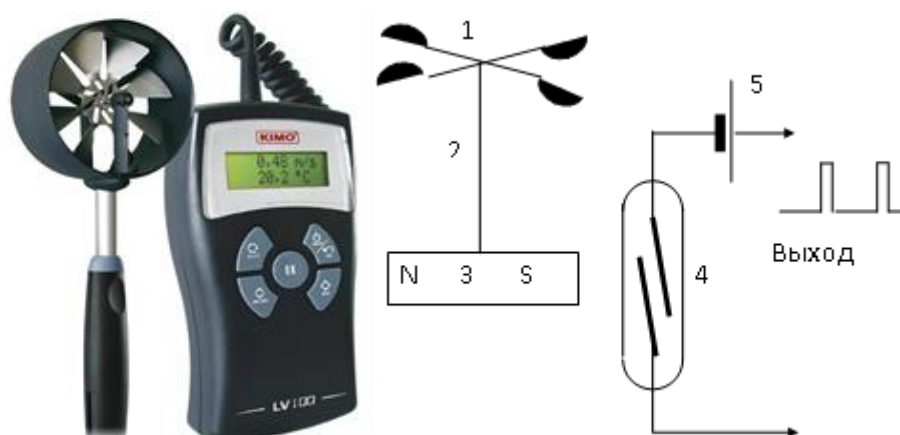


Рисунок 2.3 – Внешний вид и устройство контактного анемометра

### 2.2.3 Лазерный доплеровский анемометр

Лазерный доплеровский анемометр основан на явлении Доплера. Для измерения скорости ветра применяется дифференциальный метод. Для этого собирается установка, оптическая схема которой представлена на рисунке 2.4.

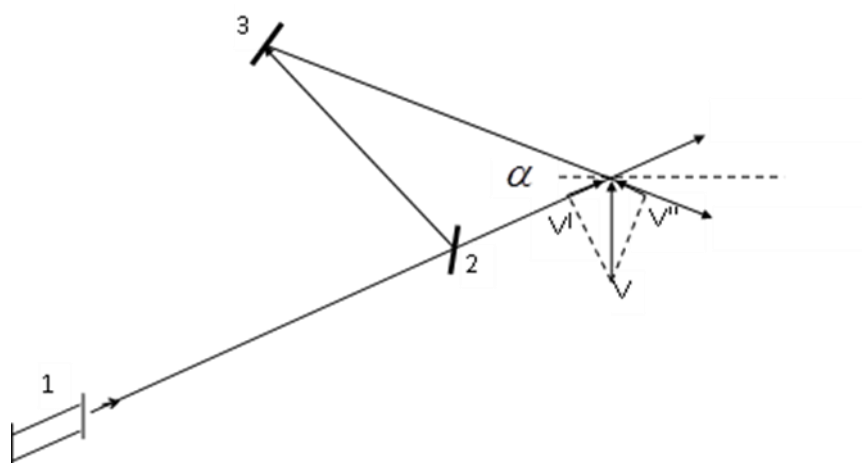


Рисунок 2.4 – Оптическая схема лазерного анемометра



Лазер (1) излучает световой пучок, который проходит через полупрозрачную пластину (2). Половина света отражается пластиной и направляется к зеркалу (3). Отраженный от зеркала световой пучок пересекается под углом  $\alpha$  с основным пучком в точке, которая может быть удалена от установки на расстояние до нескольких десятков метров. Предположим, что направление ветра ( $V$ ) перпендикулярно биссектрисе угла  $\alpha$ , тогда, в том же направлении движется отражающая свет частица аэрозоля. Следовательно, от частицы отражаются оба световых пучка. При этом явление Доплера проявляется относительно проекции скорости ветра на направление лучей  $V'$  и  $V''$ . Но изменение частоты происходит с разными знаками, поскольку проекция скорости ветра на проходящий луч направлена по лучу, а соответствующая проекция на отраженный луч – против луча. Следовательно, наблюдатель воспринимает два отраженных луча с разной частотой [3]:

$$\nu_1 = \frac{C - 2V \cdot \sin \frac{\alpha}{2}}{\lambda} \quad (2.2)$$

$$\nu_2 = \frac{C + 2V \cdot \sin \frac{\alpha}{2}}{\lambda}, \quad (2.3)$$

где  $\lambda$  – длина волны излученного сигнала;

$C$  – скорость света;

$V$  – скорость ветра;

$\alpha$  – угол пересечения отражённого светового пучка с основным пучком.

Однако, яркость этих лучей суммируется, так как они приходят на один светоприёмник. Фактически суммируются амплитуды периодических сигналов, имеющих несколько разную частоту. Это явление носит название биения.

Частота изменения яркости сигнала равна, согласно теории биений, разности частот обоих воспринятых сигналов:

$$\Delta \nu = \frac{4V \cdot \sin \frac{\alpha}{2}}{\lambda} \quad (2.4)$$

Если измерять частоту изменения яркости сигнала  $\Delta \nu$ , которая также функция скорости ветра, то относительная чувствительность не будет зависеть от скорости света  $C$  и становится достаточно значительной величиной:

$$S_{rel} = \frac{1}{\Delta \nu} \cdot \frac{d\Delta \nu}{dV} = \frac{1}{V} \quad (2.5)$$

Данный метод измерения скорости ветра привлекателен тем, что, согласно формуле (5) относительная чувствительность такого метода тем больше, чем меньше скорость ветра. [3]

#### 2.2.4 Акустические анемометры

Принцип действия акустических анемометров основан на измерении времени прохождения звукового сигнала от передатчика к приёмнику. Звуковой сигнал подаётся импульсами.

Допустим, передатчик и приёмник расположены на расстоянии  $L$  друг от друга вдоль направления ветра. Тогда время, которое потребуется сигналу на прохождение этого расстояния, можно определить по формуле:

$$\tau = \frac{L}{(C \pm V)}, \quad (2.7)$$

где  $C$  – скорость звука в воздухе;

$V$  – скорость ветра. [3]

Однако, известно, что скорость звука зависит от плотности среды, в которой звук распространяется, а значит и от температуры среды. Следовательно, время  $\tau$  так же зависит от температуры воздуха. Это приводит к погрешностям, возникающим при измерении и для их исключения необходимо исключить влияние температуры. Для этого собирают схему, представляющую собой цепочку передатчик-приёмник-передатчик (рис.2.5).

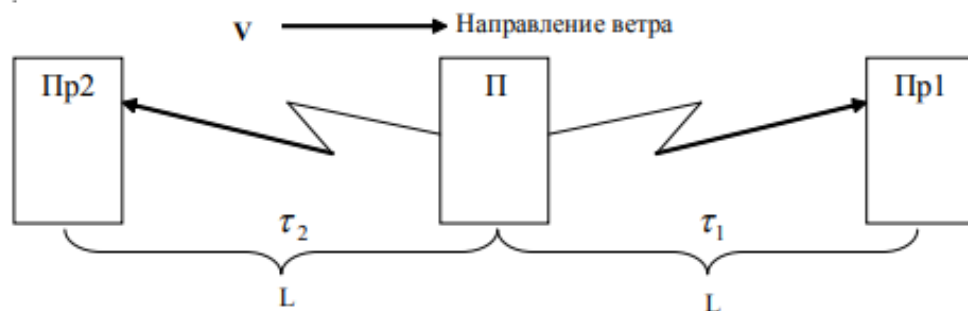


Рисунок 2.5 – Блок-схема акустического анемометра

При проведении измерений определяют разность между временем прихода сигнала от передатчика к первому приёмнику и временем прихода сигнала от передатчика ко второму приёмнику. Разность времени в данном случае является выходным параметром. Она прямо пропорциональна составляющей скорости воздушного потока вдоль линии приёмник-передатчик. Таким образом зависимость скорости ветра от температуры исключается. [3]

Существуют акустические анемометры, работа которых основана на измерении разности фаз акустических сигналов. Такие анемометры называются фазовыми.

Акустические анемометры (рис. 2.6) являются довольно точными приборами, поскольку свободны от инерционных погрешностей. Их достоинство и недостаток одновременно – отсутствие движущихся частей прибора, поскольку с одной стороны это ведёт к уменьшению погрешностей

прибора, а с другой стороны увеличивает сложность его конструкции, а соответственно и стоимость.



Рисунок 2.6 – Внешний вид акустического анемометра

### 2.3 Теория ротоанемометров

Как уже было сказано ранее, чувствительность прибора – это величина, показывающая как быстро прибор реагирует на изменение внешних параметров, на него влияющих.

Для того, чтобы определить чувствительность вертушки ротоанемометра, рассмотрим силы, действующие на неё (рис. 2.7).

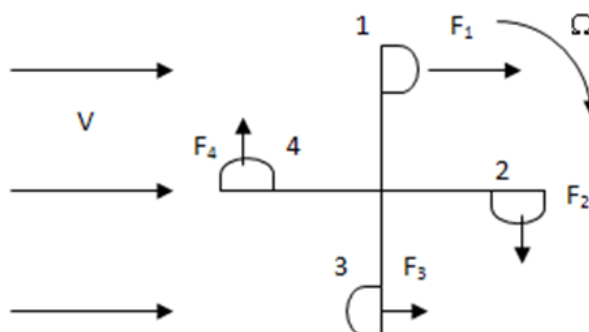


Рисунок 2.7 – Силы, действующие на чашечную вертушку в воздушном потоке

На первую чашку действует сила  $F_1$ , направленная по потоку ветра. Вторая и четвертая чашки находятся в таком положении, что сила действия ветра направлена вдоль лопастей вертушки и не оказывает действия на ее вращение. Однако на эти чашки действуют аэродинамические силы  $F_2$  и  $F_4$ . На третью чашку действует сила  $F_3$ , также направленная по потоку, но значение этой силы меньше, чем  $F_1$ , поскольку третья чашка обдувается потоком ветра и оказывает гораздо меньшее сопротивление, чем первая. В результате действия этих сил вертушка начнет поворачиваться. Чашка (1) будет двигаться по потоку ветра, чашка (3) – против потока. В результате силы будут изменяться. [3]

Предположим, что общая сумма сил, действующих на вертушку в любом положении, постоянна и равна сумме сил, действующих на нее в положении, показанном на рисунке 8. Под действием этих сил вертушка будет двигаться с угловым ускорением. Тогда сила  $F_1$  будет уменьшаться, а сила  $F_3$  – возрастать. Ускоряющий момент сил уменьшается и через некоторое время скорость вращения вертушки станет постоянной. Назовем такое состояние установившимся, и обозначим угловую скорость вращения вертушки  $\Omega$ . В установившемся состоянии угловая скорость вращения вертушки связана со скоростью ветра. Примем следующие дополнительные предположения:

1. силы  $F_2$  и  $F_4$  малы по сравнению с силами  $F_1$  и  $F_3$ ;
2. сила трения на оси вертушки пренебрежимо мала;
3. угловое ускорение равно нулю, скорость вращения вертушки постоянна.

С учётом этих предположений можно записать уравнение вертушки:

$$\sum_i M_i = K \cdot \frac{d\omega}{d\tau}, \quad (2.8)$$

где  $M$  – момент силы, действующей на чашку;

$K$  – момент инерции всей вертушки;

$\omega$  – угловая скорость вращения вертушки;

$\tau$  – время.

Согласно предположению 3,  $\frac{d\omega}{d\tau} = 0$ , тогда левая часть уравнения (12) так же равна 0. Но согласно предположению 1, момент сил складывается из моментов двух сил  $F_1$  и  $F_3$ . Учитывая, что сила  $F_3$  оказывает тормозящее действие на вертушку, можно записать сумму этих моментов:

$$M_1 - M_3 = 0 \quad (2.9)$$

Тогда:

$$R \cdot p_1 - R \cdot p_3 = 0, \quad (2.10)$$

где  $R$  – радиус плеча вертушки;

$p$  – аэродинамическое давление на чашку.

Но из аэродинамики известно, что:

$$p = \frac{1}{2} \cdot C \cdot \rho \cdot S \cdot (V')^2, \quad (2.11)$$

где  $C$  – коэффициент аэродинамического сопротивления чашки;

$\rho$  – плотность воздуха;

$S$  – площадь проекции чашки на направление, перпендикулярное ветровому потоку;

$V'$  – скорость движения воздуха относительно чашки.

Так как первая чашка движется по потоку с линейной скоростью  $U$ , то для нее  $V'_1 = V - U$ . Третья чашка движется против потока с той же линейной скоростью  $U$ , для неё  $V'_3 = V + U$ . Тогда уравнение (2.10) можно преобразовать:

$$\frac{1}{2} C_1 \cdot \rho \cdot S \cdot (V - U)^2 = \frac{1}{2} \cdot C_3 \cdot \rho \cdot S \cdot (V + U)^2 \quad (2.12)$$

где  $C_1$  и  $C_2$  – коэффициенты аэродинамического сопротивления первой и третьей чашки.

Разделим обе части уравнения (2.12) на величину  $C_3 \cdot U^2$ :

$$\frac{C_1}{C_3} \left( \frac{V}{U} - 1 \right)^2 = \left( \frac{V}{U} + 1 \right)^2 \quad (2.13)$$

Опытным путем установлено, что  $\frac{C_1}{C_3} \approx 4$ . Обозначив отношение  $\frac{V}{U} \equiv \sigma$ , можно переписать уравнение (2.13):

$$4 \cdot (\sigma - 1)^2 = (\sigma + 1)^2 \quad (2.14)$$

Это уравнение имеет 2 корня:

$$\sigma_1 = 3; \sigma_2 = \frac{1}{3}. \quad (2.15)$$

Так как очевидно, что  $V > U$ , а следовательно,  $\sigma > 1$ , окончательное решение:

$$\sigma = 3$$

Учитывая соотношение между линейной и угловой скоростью вращения вертушки:

$$U = \Omega \cdot R \quad (2.16)$$

Получается следующая зависимость:

$$\Omega = \frac{V}{\sigma \cdot R} \quad (2.17)$$

Анализируя формулу (2.17), можно сделать вывод, что  $\Omega$  связана с  $V$  прямой зависимостью. Эта зависимость нарушается только при малой скорости ветра, где формула не выполняется из-за влияния силы трения на оси вертушки. Угловая скорость вращения становится равной нулю в том случае, когда сумма моментов сил, раскручивающих вертушку, становится равна моменту силы трения. Соответствующая скорость ветра  $V^*$  называется пороговой скоростью вертушки. При скорости ветра ниже пороговой вертушка не вращается. [3]

Формула (2.17) дает возможность написать выражение для чувствительности чашечной вертушки:

$$S = \frac{d\Omega}{dV} = \frac{1}{\sigma \cdot R} \quad (2.18)$$

Однако, предполагать, что угловое ускорение равно нулю, несправедливо, так как обычно ветер бывает порывистый, то есть его скорость изменяется всё время. Обозначим изменяющуюся угловую скорость вращения вертушки через  $\omega$ . Пусть в начальном состоянии угловая скорость вращения вертушки была равна  $\omega_0$ . Тогда сумма моментов сил, раскручивающих вертушку, записывается в виде:

$$\sum_i M_i = kV^2 \cdot \frac{\Omega - \omega}{\Omega}, \quad (2.19)$$

где  $\Omega$  – новая установившаяся угловая скорость;

$V$  – скорость ветра;



$k$  – коэффициент, зависящий от устройства вертушки.

Тогда уравнение (2.8) получаем в виде:

$$K \cdot \frac{d\omega}{d\tau} = -kV^2 \frac{\omega - \Omega}{\Omega} \quad (2.20)$$

Разделяя переменные, запишем:

$$\frac{d\omega}{\omega - \Omega} = -\frac{k \cdot V^2}{K \cdot \Omega} d\tau \quad (2.21)$$

Проинтегрируем формулу (2.15) в заданных пределах:

$$\int_{\omega_0}^{\omega} \frac{d\omega}{\omega - \Omega} = -\int_0^{\tau} \frac{k \cdot V^2}{K \cdot \Omega} d\tau \quad (2.22)$$

$$\ln \frac{\omega - \Omega}{\omega_0 - \Omega} = -\frac{k \cdot V^2}{K \cdot \Omega} \cdot \tau \quad (2.23)$$

$$\omega - \Omega = (\omega_0 - \Omega) \cdot e^{-\frac{k \cdot V^2}{K \cdot \Omega} \cdot \tau} \quad (2.24)$$

Обозначив показатель в степени экспоненты  $\frac{K \cdot \Omega}{k \cdot V} = L$ , перепишем:

$$\omega - \Omega = (\omega_0 - \Omega) \cdot e^{-\frac{V \cdot \tau}{L}} \quad (2.25)$$

Это выражение показывает изменение разности угловой скорости вращения вертушки и установившейся угловой скорости. С течением времени эта разность уменьшается, причём интенсивность уменьшения зависит от скорости ветра  $V$  и от величины,  $L$  (пути синхронизации вертушки). Смысл этой величины более понятен, если в уравнении (2.25) принять  $V \cdot \tau = L$ . Тогда:

$$\omega - \Omega = \frac{\omega_0 - \Omega}{e} \quad (2.26)$$

Путь синхронизации – это путь, проходимый воздушным потоком за время, в течение которого разность между угловой скоростью вращения вертушки и установившейся угловой скоростью уменьшается в  $e$  раз. [3]

Чтобы связать понятие пути синхронизации и инерции анемометра, обратимся к уравнению пути синхронизации:

$$L = \frac{K \cdot \Omega}{k \cdot V} = \frac{K}{k \cdot R \cdot \sigma} \quad (2.27)$$

Так как в правую часть данного уравнения входят только величины, зависящие от конструкции вертушки, можно сделать вывод, что путь синхронизации – это постоянная для данной вертушки величина. Если вертушка содержит  $n$  чашек, каждая из которых имеет массу  $m$ , то суммарный момент инерции вертушки  $K = n \cdot mR^2$ . Тогда:

$$L = \frac{n \cdot m \cdot R}{k \cdot \sigma} \quad (2.28)$$

Для того чтобы вертушка быстрее воспринимала изменение скорости ветра, необходимо, чтобы путь синхронизации был бы малым. Если  $L = V \cdot \tau^*$ , то  $\tau^*$  (то есть время синхронизации) зависит от скорости ветра. Причём с увеличением скорости ветра время синхронизации уменьшается. Отсюда можно сделать вывод, что чем больше скорость ветра, тем быстрее она воспринимается вертушкой анемометра.

На рисунке 2.8 представлено восприятие вертушкой прямоугольных флуктуаций скорости ветра.

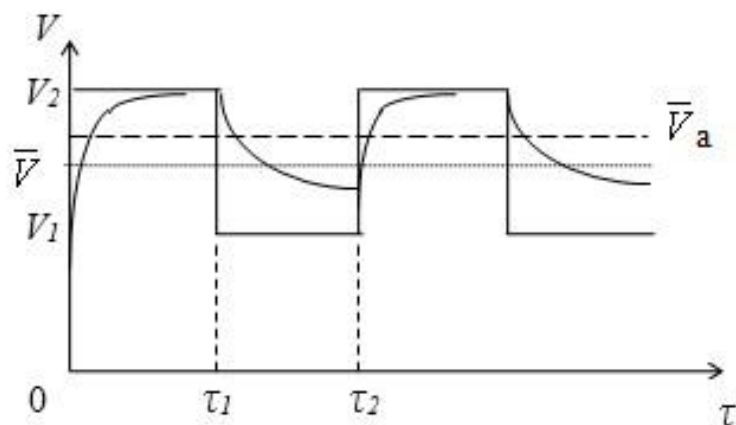


Рисунок 2.8 – Восприятие вертушкой прямоугольных флуктуаций скорости ветра

По рисунку 2.8 можно легко понять, как будет реагировать ротоанемометр на флуктуации скорости ветра. Высокую скорость ветра он воспринимает быстро, а малую скорость ветра – медленно. Осреднение этих результатов даст значение выше средней скорости ветра. Отсюда можно сделать вывод, что анемометр завышает среднюю скорость ветра.

### 3 Расчёт инерционных погрешностей ротоанемометров

Чтобы рассчитать погрешности вертушки при флуктуациях ветра предположим, что флуктуации прямоугольные, то есть скорость ветра резко меняется от одного значения до другого. Обратимся к формуле (2.26). Заменяем  $\omega$ ;  $\omega_0$ ;  $\Omega$  на соотношения:

$$\omega = \frac{V}{R}; \quad \Omega = \frac{V_{уст}}{R}; \quad \omega_0 = \frac{V_0}{R}$$

После преобразований получаем:

$$V - V_{уст} = (V_0 - V_{уст}) \cdot e^{-\frac{V_{уст} \cdot \tau}{L}} \quad (3.1)$$

где  $V_{уст}$  – это та скорость ветра, которую анемометр воспримет (истинная);

$V$  – текущие показания анемометра;

$V_0$  – начальная скорость ветра. [3]

Формулу (3.1) можно переписать в виде:

$$V = V_{уст} + (V_0 - V_{уст}) \cdot e^{-\frac{V_{уст} \cdot \tau}{L}} \quad (3.2)$$

Для исследования инерционных погрешностей ротоанемометра при порывах ветра предположим, что порывы ветра имеют ступенчатый характер (рис. 2.8). Тогда осредненные показания анемометра будут несколько выше истинной средней скорости ветра. Задачей данной работы является исследование этой инерционной ошибки ротоанемометра и ее зависимости от различных

факторов – как факторов, зависящих только от погоды, так и от конструкции анемометра.

Для необходимых расчётов по формуле (3.2) и построения графиков на языке программирования CSharp (C#) была написана программа, с помощью которой были исследованы интересующие нас зависимости.

Как известно, анемометр не сразу воспринимает новую скорость ветра. Это происходит с задержкой во времени. Эта задержка зависит от многих параметров, среди которых средняя скорость ветра, амплитуда флуктуаций скорости ветра и период флуктуаций скорости ветра. Были проведены исследования этих зависимостей и на основе полученных данных построены графики. [4,6]

### 3.1 Определение задержки во времени в зависимости от средней скорости ветра

Прежде всего нас интересовало сколько скоро анемометр покажет установившуюся скорость ветра. Для этого необходимо было определить время, в течение которого показания анемометра стабилизируются. С помощью программы по формуле (3.2) были сделаны расчёты и построены графики, подобные графику на рисунке 3.1. На этом графике время стабилизации показаний равно примерно 30 с. Затем варьировались различные параметры и таким образом с помощью этих графиков были исследованы зависимости  $\Delta t$  от  $V$ .



Рисунок 3.1 – Автоматизированный расчёт реакции анемометра на флуктуации скорости ветра с построением графика

Расчёты были сделаны при малых скоростях ветра, средних и очень больших. По результатам расчётов были построены графики, изображённые на рисунках 3.2-3.4.

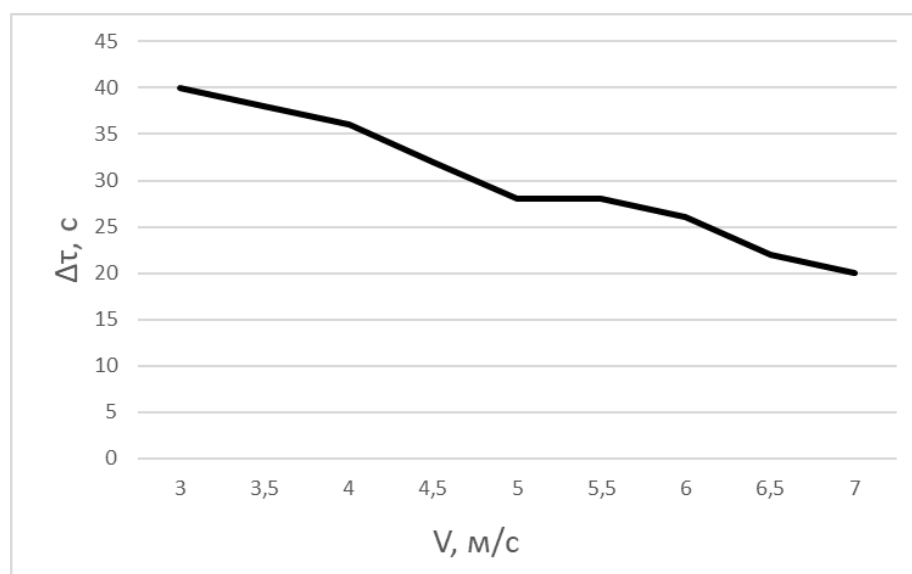


Рисунок 3.2 – Зависимость времени стабилизации показаний анемометра от истинной средней скорости ветра

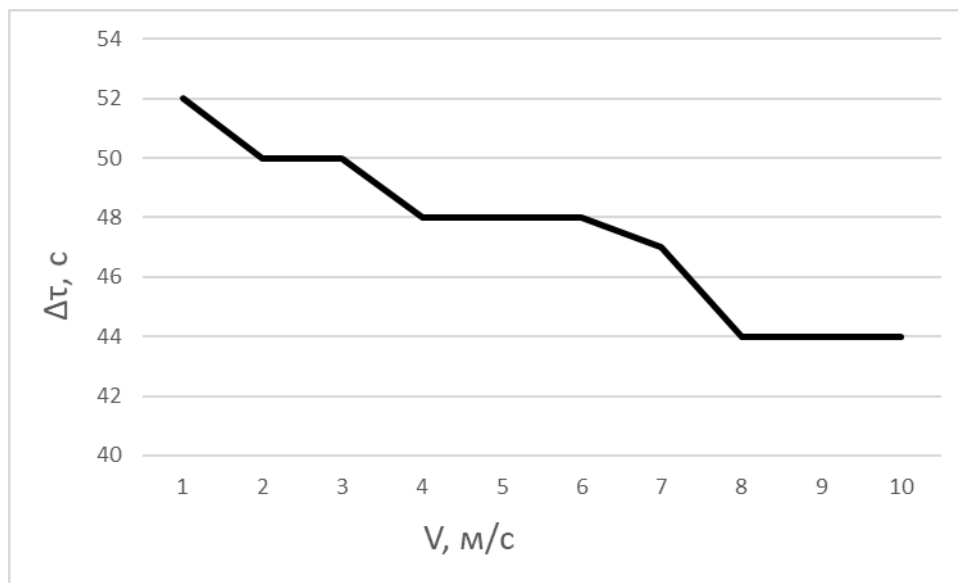


Рисунок 3.3 – Зависимость времени стабилизации показаний анемометра от истинной средней скорости ветра

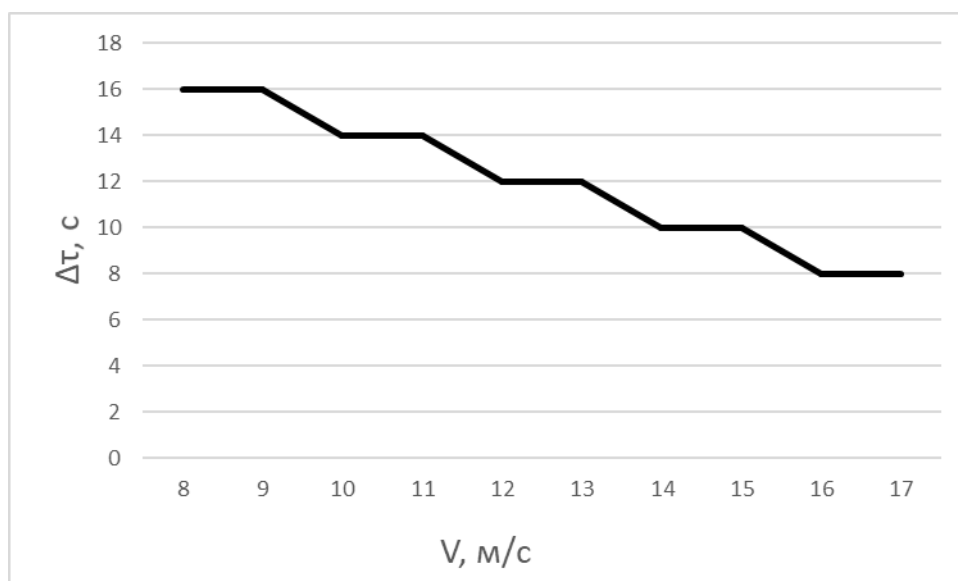


Рисунок 3.4 – Зависимость времени стабилизации показаний анемометра от истинной средней скорости ветра

Анализируя полученные графики, легко прийти к выводу, что задержка во времени уменьшается с увеличением скорости ветра. Иными словами,

можно сказать, что чем больше скорость ветра, тем быстрее она воспринимается анемометром. [4,6] Обращает на себя внимание ступенчатый характер зависимости. Это неизбежно, поскольку определение времени не может быть сделано с большей точностью, чем период флуктуаций скорости.

### 3.2 Определение задержки во времени в зависимости от амплитуды флуктуаций скорости ветра

Таким же образом с помощью программы были сделаны расчёты зависимости  $\Delta\tau$  от амплитуды флуктуаций  $A$  при маленьких значениях амплитуды флуктуаций скорости ветра, средних значениях и очень больших значениях. По результатам расчётов были построены графики, изображённые на рисунках 3.5-3.7.

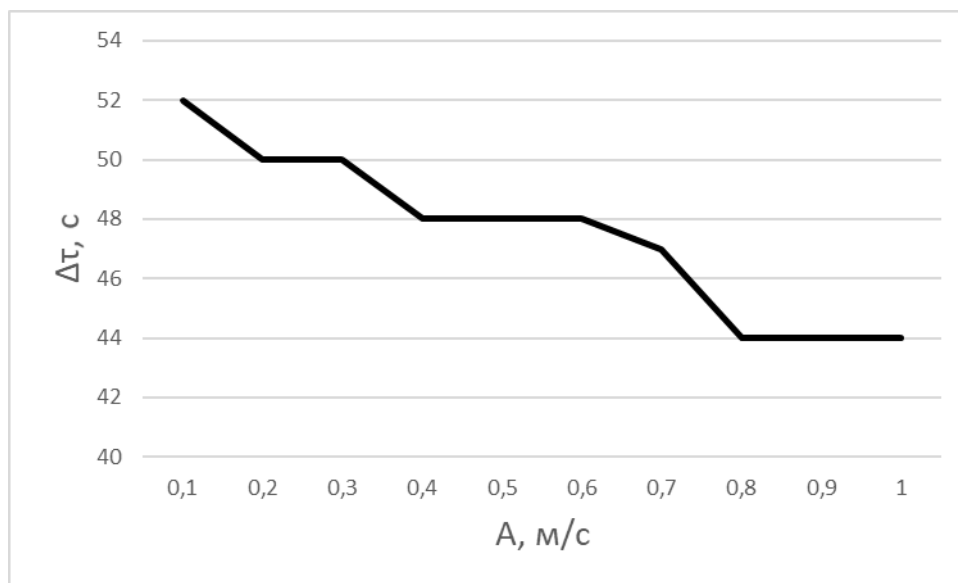


Рисунок 3.5 – Зависимость времени стабилизации показаний анемометра от амплитуды флуктуаций скорости ветра



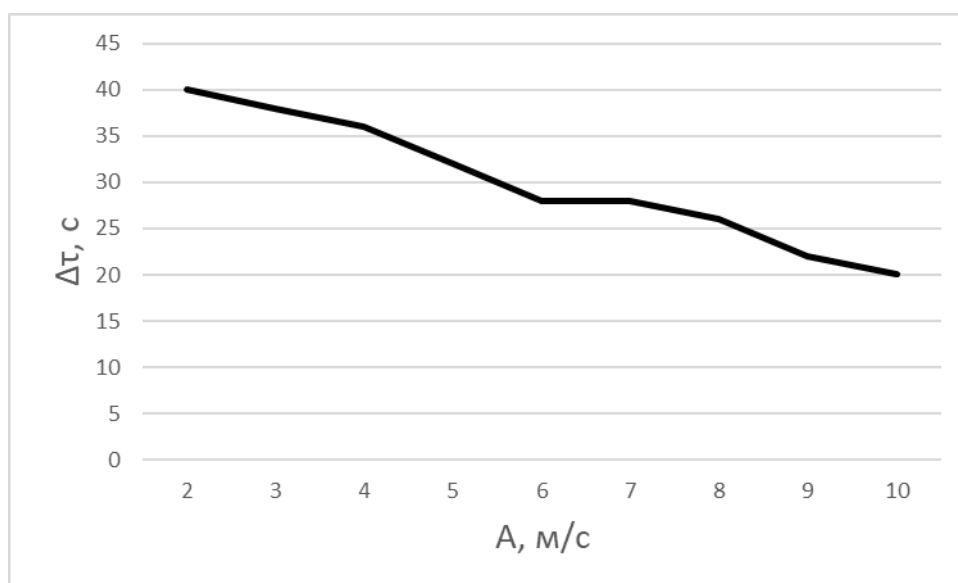


Рисунок 3.6 – Зависимость времени стабилизации показаний анемометра от амплитуды флуктуаций скорости ветра

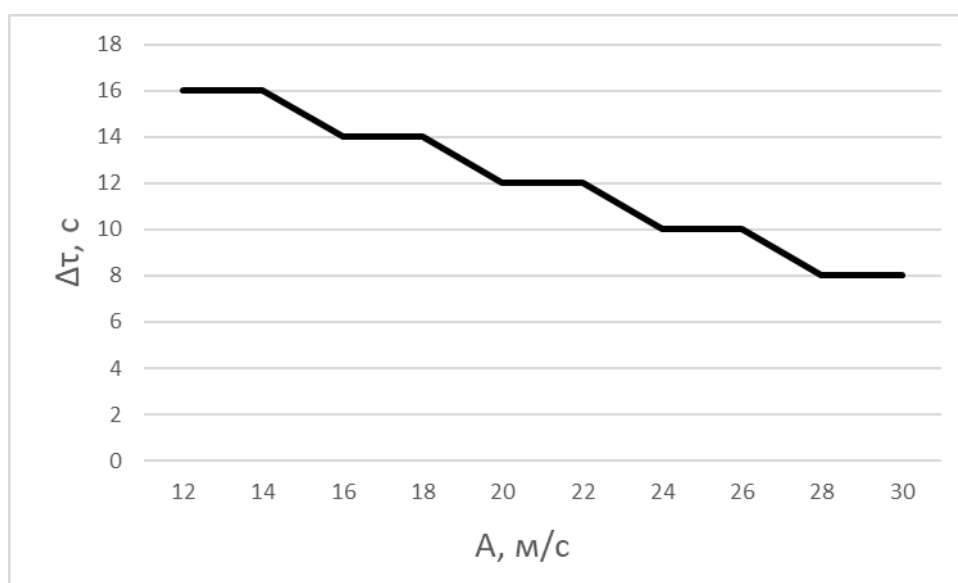


Рисунок 3.7 – Зависимость времени стабилизации показаний анемометра от амплитуды флуктуаций скорости ветра.

При анализе графиков становится очевидным, что задержка во времени с увеличением амплитуды флуктуаций скорости ветра уменьшается. [4,6]

### 3.3 Определение задержки во времени в зависимости от периода флуктуаций скорости ветра

Далее были сделаны расчёты зависимости  $\Delta\tau$  от периода флуктуаций  $T$ . По результатам расчётов также был построен график зависимости, представленный на рисунке 3.8.

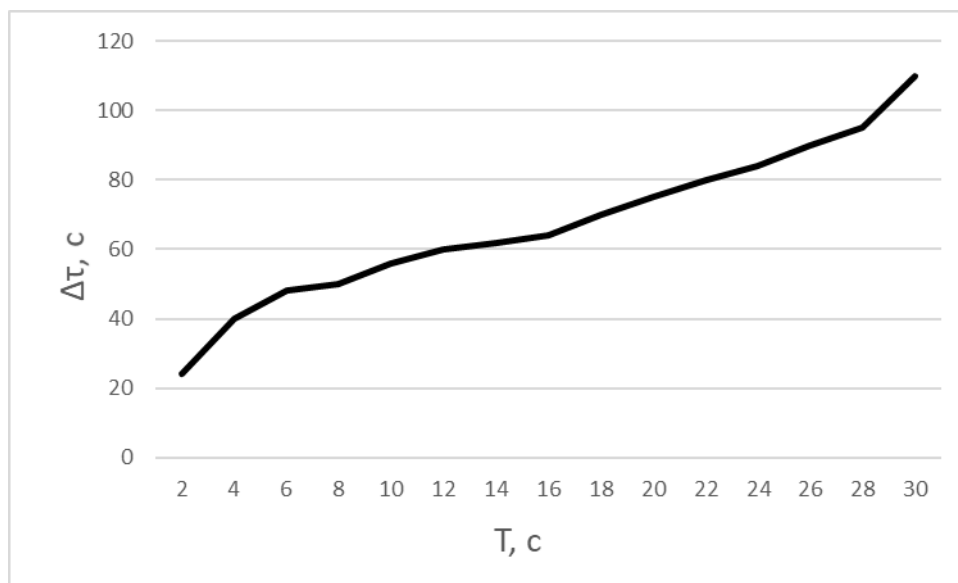


Рисунок 3.8 – Зависимость времени стабилизации показаний анемометра от периода флуктуаций скорости ветра

Анализируя график, можно сказать, что задержка во времени увеличивается с увеличением периода флуктуаций скорости ветра. [4,6]

### 3.4 Вычисление среднего значения показаний анемометра

Отдельно необходимо остановиться на вопросе определения среднего значения показаний анемометра, то есть методике осреднения периодических изменений показаний анемометра после достижения времени стабилизации

показаний. На рисунке 3.9 показан один период изменения показаний анемометра, то есть сильно увеличенный участок рисунка 3.1.

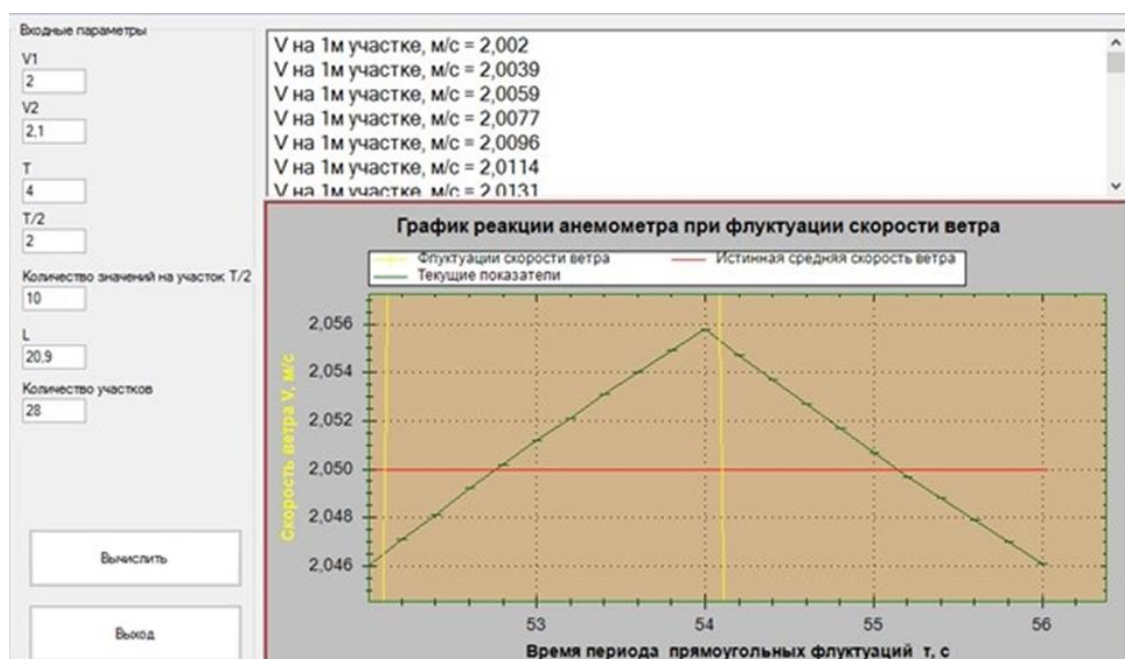


Рисунок 3.9 – Определение среднего значения скорости ветра.

Среднее значение скорости ветра, воспринимаемой анемометром, есть не что иное как площадь под кривой текущих показаний анемометра, поделенная на соответствующий интервал времени. Произвести расчёт среднего значения можно двумя способами.

1) Вычисление методом трапеций.

Разобьём кривую текущих показаний анемометра на маленькие отрезки. Каждому из отрезков соответствует определённое время  $\Delta t$ . Будем считать среднее значение скорости ветра по формуле:

$$\bar{V} = \frac{1}{\tau_n - \tau_1} \int_{\tau_1}^{\tau_n} V dt \quad (3.3)$$

Эту же формулу можно переписать в виде:

$$\frac{1}{(n-1)\Delta\tau} \left( \frac{V_1+V_2}{2} \right) \Delta\tau + \frac{V_2+V_3}{2} \Delta\tau + \dots + \frac{V_{n-1}+V_n}{2} \Delta\tau \quad (3.4)$$

После очевидных преобразований формула записывается так:

$$\frac{1}{n-1} \left( \frac{V_1+V_n}{2} \right) + V_2 + V_3 + \dots + V_{n-1} \quad (3.5)$$

По формуле (2.27) был произведён расчёт среднего значения при флуктуациях скорости ветра от 2 до 2.1 м/с.

|              |                 |                 |
|--------------|-----------------|-----------------|
| $V_1=2,046$  | $V_8=2,0532$    | $V_{15}=2,0515$ |
| $V_2=2,0471$ | $V_9=2,054$     | $V_{16}=2,0505$ |
| $V_3=2,0481$ | $V_{10}=2,0547$ | $V_{17}=2,0495$ |
| $V_4=2,0492$ | $V_{11}=2,0558$ | $V_{18}=2,0486$ |
| $V_5=2,0502$ | $V_{12}=2,0546$ | $V_{19}=2,0479$ |
| $V_6=2,0512$ | $V_{13}=2,0537$ | $V_{20}=2,047$  |
| $V_7=2,0521$ | $V_{14}=2,0525$ | $V_{21}=2,0461$ |

Подставляя эти значения в формулу (3.5), получаем:

$$\bar{v} = \frac{1}{20} (2,046 + 40,9911) = \frac{43,0371}{20} = 2,05 \text{ м/с}$$

2) Вычисление по упрощённой формуле.

Опытным путём было установлено, что вычислить среднее значение скорости ветра, воспринимаемой анемометром, можно с помощью упрощённой формулы:

$$\bar{V}_{\text{упр}} = \frac{V_1 + V_{\text{max}}}{2}, \quad (3.6)$$

где  $V_{\text{max}}$  – максимальное значение скорости на данном временном промежутке.

Подставляя в эту формулу значения скорости ветра, получаем для случая, изображенного на рисунке 3.9:

$$\bar{V}_{\text{упр}} = \frac{2,046 + 2,0558}{2} = 2,05 \text{ м/с}$$

Полученные результаты показывают нам, что конечный результат в обоих случаях одинаковый (погрешность не превышает сотых долей м/с), что позволяет нам для удобства в дальнейшем вести расчёт по упрощённой формуле.

### 3.5 Определение превышения значений скорости ветра в зависимости от амплитуды флуктуаций

Как уже говорилось выше, анемометр завышает среднюю скорость ветра. Для того чтобы понять, от чего зависит это превышение, были проведены исследования зависимости  $\Delta V$  (разницы между показаниями анемометра и средним значением скорости ветра) от амплитуды флуктуаций скорости ветра. Расчёты проводились с помощью той же программы путём анализа рисунков, аналогичных рисунку 3.1. По результатам исследования был построен график, представленный на рисунке 3.10.

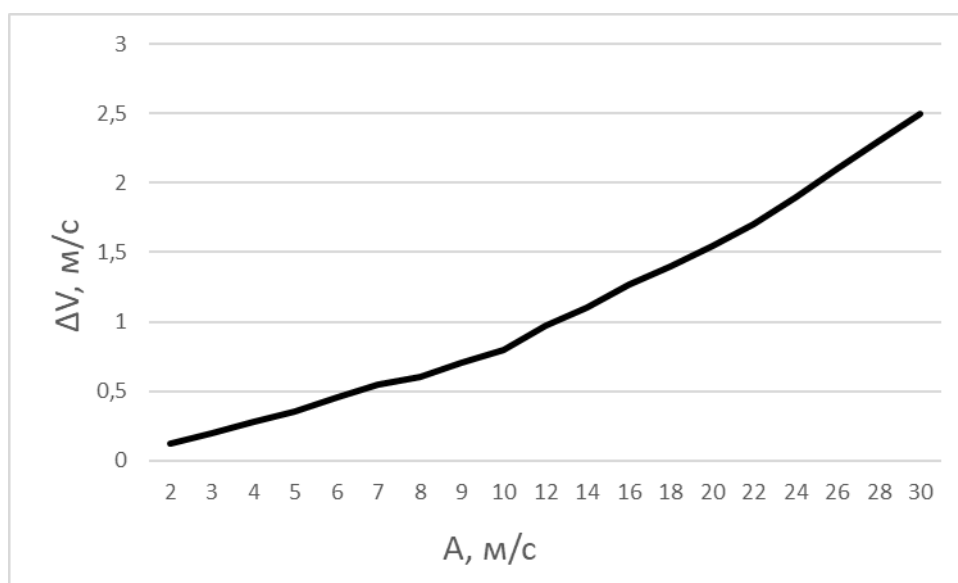


Рисунок 3.10 – Зависимость инерционной погрешности анемометра от амплитуды флуктуаций скорости ветра

Анализ графика говорит нам о том, что при увеличении амплитуды флуктуаций скорости ветра погрешность  $\Delta V$  тоже увеличивается, то есть чем больше флуктуации, тем сильнее анемометр завышает скорость ветра. Если при амплитуде ниже 3 м/с это превышение можно не принимать во внимание, то при амплитуде более 3 м/с это превышение становится достаточно значительным. [4,6]

### 3.6 Определение превышения значений скорости ветра в зависимости от средней скорости ветра

Теперь исследуем зависимость превышения показаний анемометра над средней скоростью ветра в зависимости от самой истинной средней скорости ветра. Это было сделано таким же образом, как и предыдущие расчёты, то есть путём анализа графиков, построенных с помощью программы. Для того, чтобы определить как меняется погрешность  $\Delta V$  при изменении средней скорости

ветра, был построен график зависимости  $\Delta V$  от  $V$ , изображённый на рисунке 3.11.

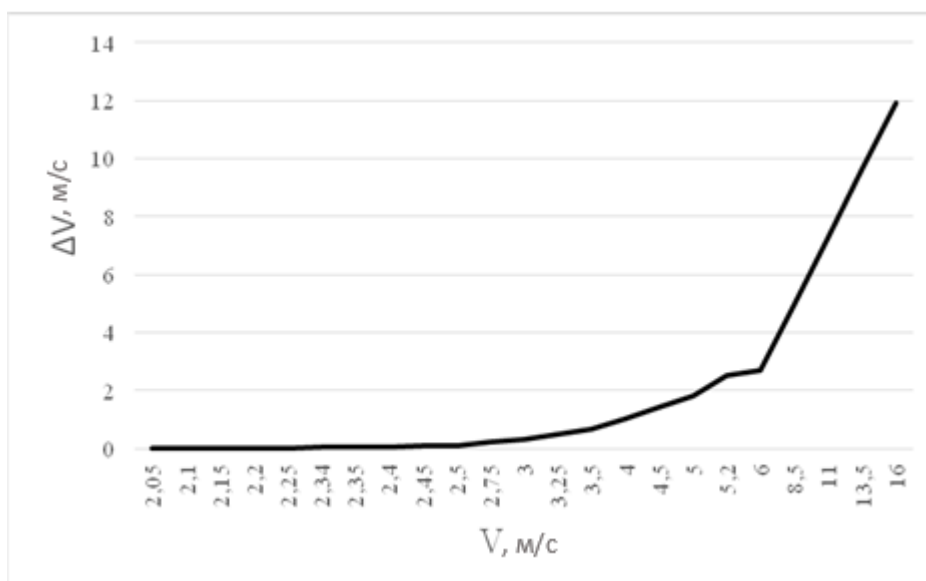


Рисунок 3.11 – Зависимость инерционной погрешности анемометра от истинной средней скорости ветра

Исходя из графика, легко понять, что с ростом средней скорости ветра погрешность  $\Delta V$  возрастает. Иными словами, чем больше средняя скорость ветра, тем сильнее она завышается анемометром. При скоростях ветра более 3 м/с это превышение необходимо учитывать. [4,6]

### 3.7 Определение превышения значений скорости ветра и времени стабилизации показаний в зависимости от пути синхронизации

Наиболее интересной представляется зависимость инерционной ошибки и времени достижения стабильных показаний от пути синхронизации анемометра. Напомним, что путь синхронизации – это путь, проходимый воздушным потоком за время, в течение которого разность между угловой скоростью вращения вертушки и установившейся угловой скоростью

уменьшается в  $\epsilon$  раз.[3] Путь синхронизации является константой анемометра. Значение пути синхронизации говорит нам о том, как должен быть сконструирован прибор, чтобы его погрешность была наименьшей.

С этой целью при заданных погодных параметрах варьировалось значение пути синхронизации анемометра. Расчёты были проведены по той же программе.

Чтобы наглядно определить тенденцию зависимости, были построены два графика – зависимость инерционной погрешности  $\Delta V$  и зависимость времени достижения стабильных показаний  $\Delta t$  от пути синхронизации прибора (рис. 3.12 и 3.13 соответственно).

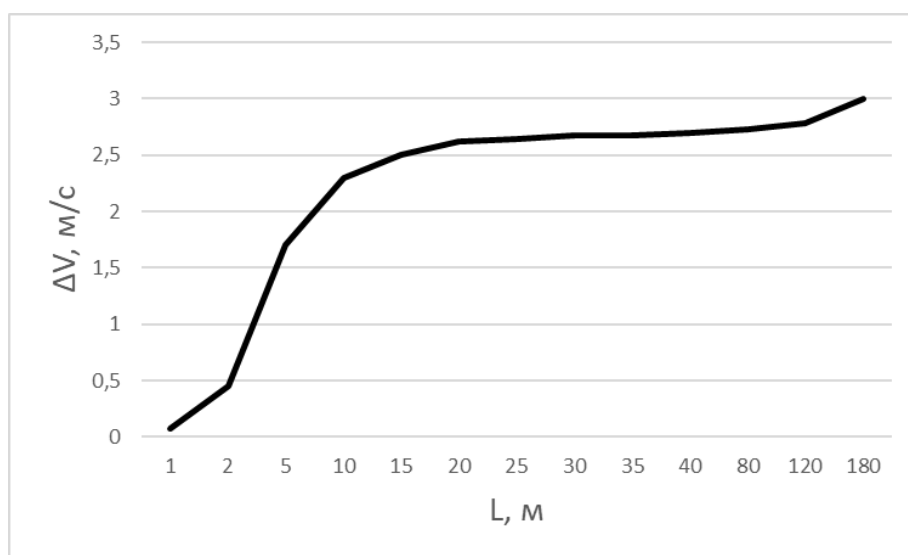


Рисунок 3.12 – Зависимость инерционной погрешности анемометра от пути синхронизации



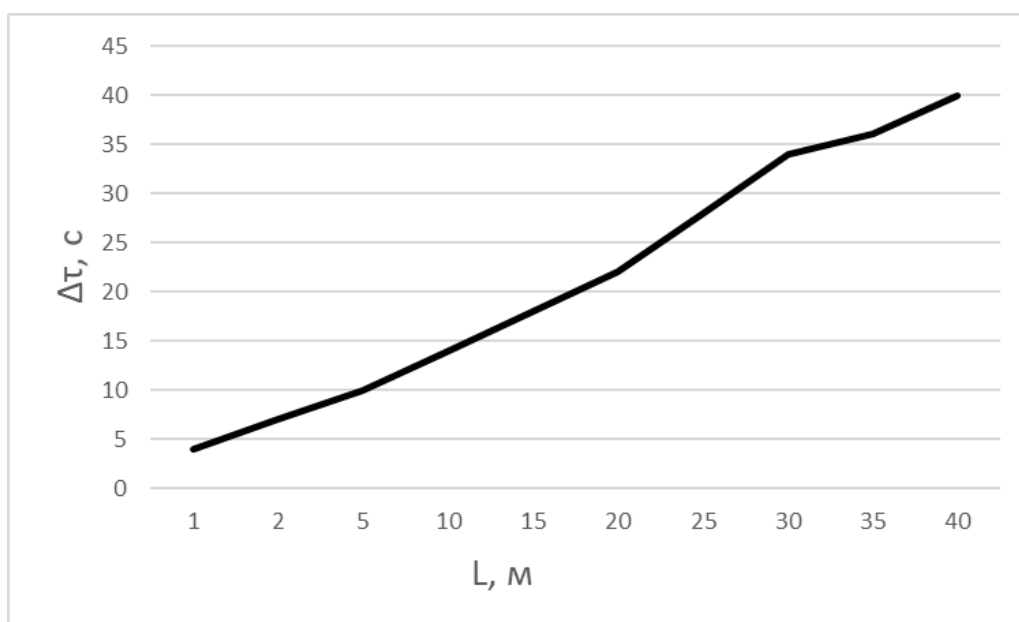


Рисунок 3.13 – Зависимость времени стабилизации показаний анемометра от пути синхронизации

Графики показывают, что с увеличением пути синхронизации увеличивается и инерционная погрешность ротоанемометра, и время достижения прибором стабильных показаний. Это говорит о том, что для уменьшения влияния погрешности необходимо конструировать приборы с наименьшим путём синхронизации.

Согласно формуле (2.28) путь синхронизации зависит от массы вертушки и от количества чашек. Т.к. значения массы и количества стоят в числителе дроби, можно сделать вывод о том, что для уменьшения пути синхронизации (а следовательно, и для уменьшения инерционной погрешности прибора), необходимо уменьшать массу вертушки и количество чашек. Очевидно, наименьшее возможное количество чашек равно трем. Иными словами, для того, чтобы ротоанемометр обладал меньшей инерцией, он должен быть возможно малым и лёгким. [4,6]

Например, анемометр WAA151, выпускаемый фирмой «Vaisala» (Финляндия) и используемый на морских буйковых метеорологических станциях, обладает путём синхронизации 2 м. [12] Для сравнения, датчик

скорости ветра, используемый на метеостанции М-49 (СССР), обладал путём синхронизации 28 м. [13]

#### 4 Инерционная погрешность ротоанемометров, установленных на морских буйковых станциях

Буйковые метеорологические станции являются автоматическими станциями и устанавливаются в океане в труднодоступных местах, где сложно получить информацию непосредственно контактными измерениями. Они фиксируются в океане с помощью специальных якорей и оснащаются блоком долговременного электропитания.

Буйковые АМС представляют собой один или несколько буюв с автоматическими метеодатчиками для измерения скорости и направления ветра, температуры и влажности воздуха, атмосферного давления, количества осадков и облачности. Такие станции также измеряют характеристики водной среды – скорость течения, солёность, мутность и т.д. Очевидно, что буйковые АМС не дают полных сведений о погоде, а передают только информацию о состоянии атмосферы вблизи водной поверхности. Однако, эти станции очень важны, поскольку данные, полученные с них, позволяют заполнить пробелы в информации, приходящей с остальных средств наблюдений в море. [1]

Как видно из рисунка 4.1, датчик скорости ветра устанавливается на некоторой высоте над поверхностью моря для того, чтобы исключить забрызгивание насколько это возможно. Однако, морской буй подвержен влиянию волнения моря. Легко понять, что датчик при этом совершает колебания в направлении скорости ветра. Таким образом, при движении датчика в направлении скорости ветра он регистрирует меньшую скорость, а при движении в направлении против скорости ветра – завышенную скорость. Следовательно, средняя скорость ветра будет определена с ошибкой, которую можно рассчитать, используя методику, разработанную в настоящей работе.



Рисунок 4.1 – Буйковая метеорологическая станция PIRATA  
(США, Франция, Бразилия)

Для проведения расчёта необходимо знать несколько величин – высоту датчика над уровнем моря, угловую амплитуду колебаний датчика и частоту колебаний датчика.

На рисунке 4.2 представлены колебания датчика под действием морских волн.

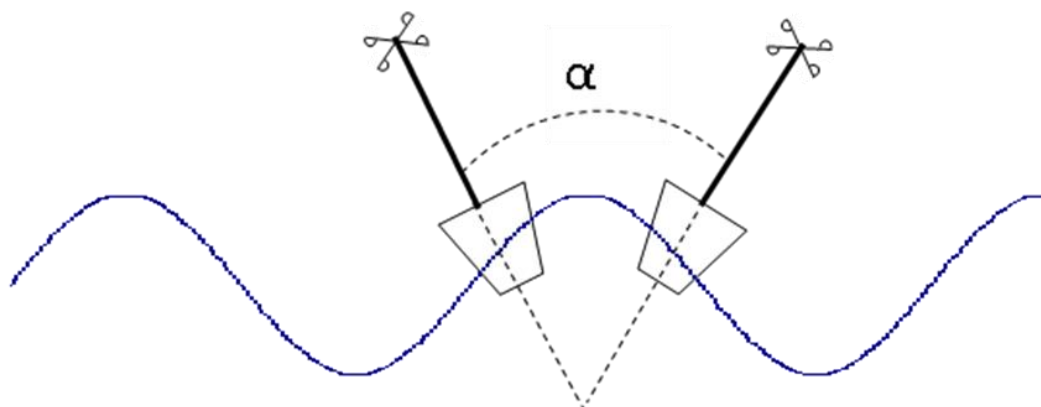


Рисунок 4.2 – Схематичное изображение колебаний датчика параметров ветра под действием волнения моря

Если  $H$  – высота, на которой располагается датчик,  $\alpha$  – угловая амплитуда колебаний датчика, а  $T$  – период колебаний, то скорость передвижения датчика относительно поверхности моря может быть определена по формуле:

$$V = \frac{2l}{T} = 2lf, \quad (4.1)$$

где  $l$  – длина дуги, на которую опирается угол  $\alpha$ ;

$f$  – частота колебаний (Гц).

Длину дуги определим по формуле:

$$l = \alpha H, \quad (4.2)$$

где  $\alpha$  – угол в радианах.

Согласно теоретическим сведениям частотный диапазон морских волн может варьироваться от 0,07 до 8 рад/с, т.е. от 0,011 до 1,25 Гц. Соответственно период качания буя составляет от 0,5 до 10 с. Углы отклонения, согласно [10], могут изменяться в пределах от  $40^\circ$  до  $68^\circ$ , т.е. от 0,7 до 1,2 рад.

Значения высоты датчика  $H$  приводятся в [14]. Используются две стандартные высоты  $H_1 = 2,9$  м,  $H_2 = 3,5$  м. Эти значения и были использованы при расчётах погрешностей.

Прежде всего необходимо рассчитать скорости движения датчика при разных значениях  $\alpha$  и  $f$  для двух значений высоты датчика. Расчёты выполнялись по формуле (4.1) с учётом (4.2).

По результатам расчетов были построены графики зависимостей  $V(\alpha)$  для трёх крайних значений частот  $f_1=0,011$  Гц,  $f_2=0,5$  Гц,  $f_3=1,25$  Гц. Расчёты были выполнены для  $H_1=2,9$  м,  $H_2=3,5$  м. Результаты представлены на рисунках 4.3 и 4.4.

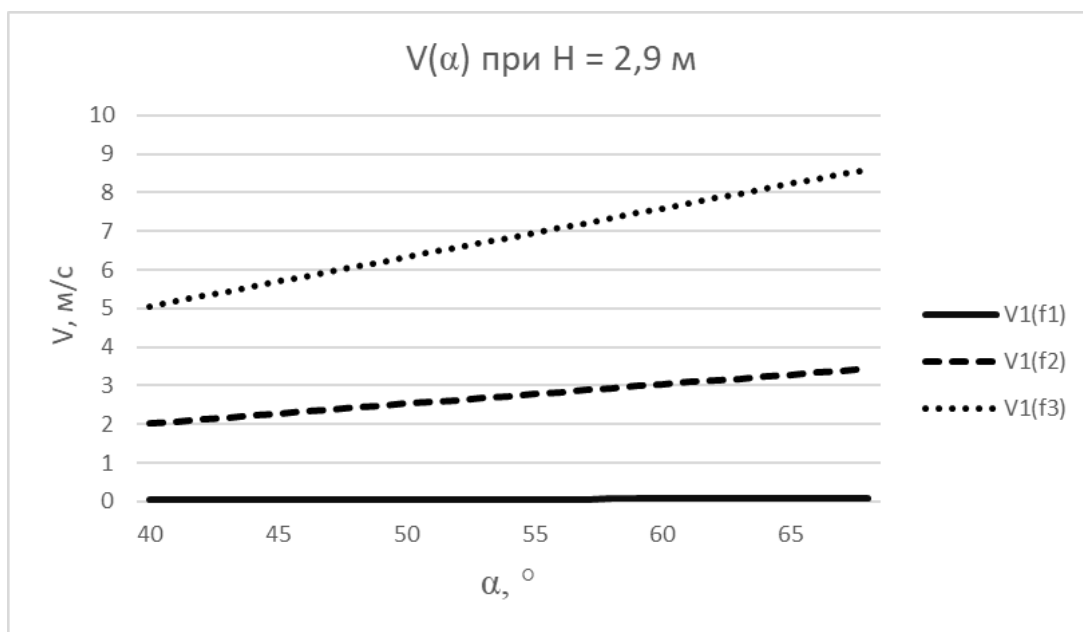


Рисунок 4.3 – График зависимости скорости движения датчика при разных значениях частот и углов раскачки буя

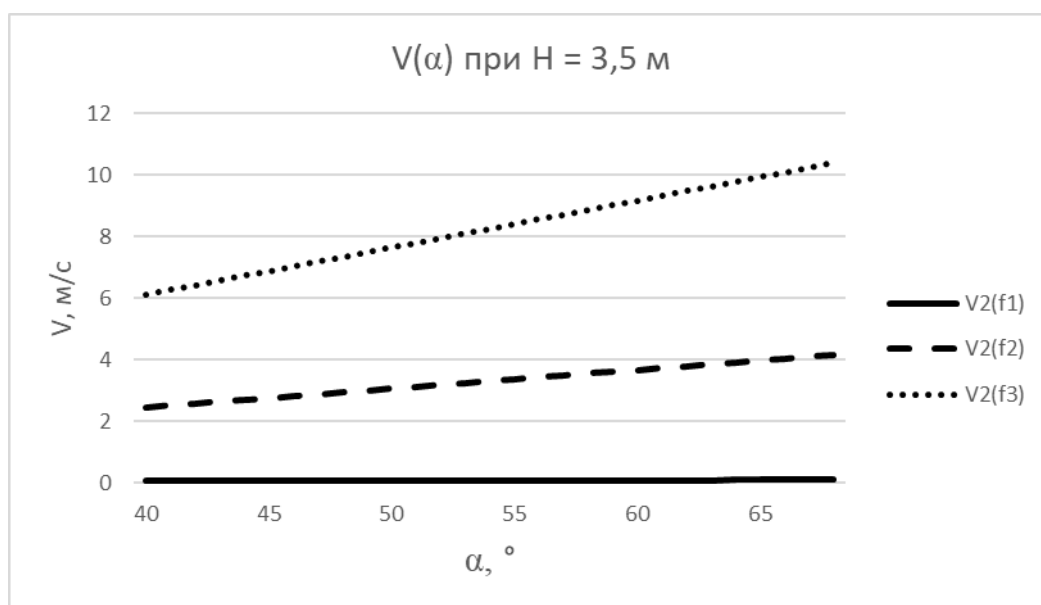


Рисунок 4.4 – График зависимости скорости движения датчика при разных значениях частот и углов раскачки буя

Далее рассчитывались погрешности по методике, изложенной в главе 3 данной работы.

Прежде всего отметим, что в случае  $f_1=0,011$  Гц (синяя кривая на рис. 4.3 и 4.4) скорости движения датчика оказались столь малыми, что рассчитанное значение погрешности для всех углов составляет доли см/с. Эта величина может считаться пренебрежимо малой и результаты расчёта для этого случая не включались в итоговую таблицу.

Для случаев  $f_2=0,5$  Гц,  $f_3=1,25$  Гц погрешности оказались достаточно значимыми (табл. 4.1 и 4.2).

Таблица 4.1

Результаты расчётов погрешностей для высоты датчика Н=2,9 м

| Т, с | $\alpha, ^\circ$ | Скорость движения датчика, м/с | Скорость ветра, м/с | Погрешность, м/с |
|------|------------------|--------------------------------|---------------------|------------------|
| 2    | 40°              | $\pm 2$ м/с                    | 5 м/с               | 1,45 м/с         |
|      |                  |                                | 10 м/с              | 0 м/с            |
|      |                  |                                | 20 м/с              | 0 м/с            |
|      | 60°              | $\pm 3$ м/с                    | 5 м/с               | 1,1 м/с          |
|      |                  |                                | 8 м/с               | 0,25 м/с         |
|      |                  |                                | 10 м/с              | 0,1 м/с          |
|      |                  |                                | 15 м/с              | 0 м/с            |
|      | 68°              | $\pm 3,4$ м/с                  | 5 м/с               | 1,7 м/с          |
|      |                  |                                | 8 м/с               | 0,85 м/с         |
|      |                  |                                | 10 м/с              | 0,15 м/с         |
|      |                  |                                | 15 м/с              | 0 м/с            |
| 0,8  | 40°              | $\pm 5,06$ м/с                 | 6 м/с               | 4,03 м/с         |
|      |                  |                                | 10 м/с              | 1,5 м/с          |
|      |                  |                                | 15 м/с              | 0,65 м/с         |
|      |                  |                                | 20 м/с              | 0,33 м/с         |
|      |                  |                                | 25 м/с              | 0 м/с            |
|      | 60°              | $\pm 7,5$ м/с                  | 8 м/с               | 6,75 м/с         |
|      |                  |                                | 10 м/с              | 4,2 м/с          |
|      |                  |                                | 15 м/с              | 1,75 м/с         |
|      |                  |                                | 20 м/с              | 0,6 м/с          |
|      |                  |                                | 25 м/с              | 0,25 м/с         |
|      |                  |                                | 30 м/с              | 0 м/с            |
|      | 68°              | $\pm 8,6$ м/с                  | 9 м/с               | 7,8 м/с          |
|      |                  |                                | 10 м/с              | 6,3 м/с          |
|      |                  |                                | 15 м/с              | 2,3 м/с          |
|      |                  |                                | 20 м/с              | 0,8 м/с          |
|      |                  |                                | 25 м/с              | 0,3 м/с          |
|      |                  |                                | 30 м/с              | 0 м/с            |



Таблица 4.2

Результаты расчётов погрешностей для высоты датчика  $H=3,5$  м

| $T, c$ | $\alpha, ^\circ$ | Скорость движения датчика, м/с | Скорость ветра, м/с | Погрешность, м/с |
|--------|------------------|--------------------------------|---------------------|------------------|
| 2      | 40°              | $\pm 2,4$ м/с                  | 5 м/с               | 1,4 м/с          |
|        |                  |                                | 10 м/с              | 0,35 м/с         |
|        |                  |                                | 15 м/с              | 0,15 м/с         |
|        |                  |                                | 20 м/с              | 0,1 м/с          |
|        |                  |                                | 25 м/с              | 0 м/с            |
|        | 60°              | $\pm 3,6$ м/с                  | 5 м/с               | 2,5 м/с          |
|        |                  |                                | 10 м/с              | 0,9 м/с          |
|        |                  |                                | 15 м/с              | 0,25 м/с         |
|        |                  |                                | 20 м/с              | 0,1 м/с          |
|        |                  |                                | 25 м/с              | 0 м/с            |
|        | 68°              | $\pm 4,1$ м/с                  | 5 м/с               | 3,1 м/с          |
|        |                  |                                | 10 м/с              | 1,1 м/с          |
|        |                  |                                | 15 м/с              | 0,4 м/с          |
|        |                  |                                | 20 м/с              | 0,1 м/с          |
|        |                  |                                | 25 м/с              | 0 м/с            |
| 0,8    | 40°              | $\pm 6,1$ м/с                  | 8 м/с               | 3,95 м/с         |
|        |                  |                                | 10 м/с              | 2,45 м/с         |
|        |                  |                                | 15 м/с              | 1,05 м/с         |
|        |                  |                                | 20 м/с              | 0,3 м/с          |
|        |                  |                                | 25 м/с              | 0 м/с            |
|        | 60°              | $\pm 9,1$ м/с                  | 10 м/с              | 8,9 м/с          |
|        |                  |                                | 15 м/с              | 2,55 м/с         |
|        |                  |                                | 20 м/с              | 1,05 м/с         |
|        |                  |                                | 25 м/с              | 0,55 м/с         |
|        |                  |                                | 30 м/с              | 0,15 м/с         |
|        | 68°              | $\pm 10,3$ м/с                 | 35 м/с              | 0 м/с            |
|        |                  |                                | 15 м/с              | 5,35 м/с         |
|        |                  |                                | 20 м/с              | 1,65 м/с         |
|        |                  |                                | 25 м/с              | 0,65 м/с         |
|        |                  |                                | 30 м/с              | 0,15 м/с         |
|        |                  |                                | 35 м/с              | 0 м/с            |

Анализируя данные таблиц 4.1 и 4.2, прежде всего необходимо отметить, что в них отражены все возможные комбинации углов отклонения буя, скорости ветра и периода раскачки (или частоты). Поэтому в таблице могут встречаться явно нереальные случаи – например, при малой скорости ветра

период колебаний не может быть очень большим из-за малой высоты волн, и, наоборот, при большой скорости ветра период колебаний не может быть малым. Не будучи океанологом, автор не располагает сведениями о соотношении указанных параметров, оставляя этот вопрос на рассмотрение специалистов.

Отметим, что погрешность измерения, указанная в последнем столбце таблиц 4.1 и 4.2, всегда означает превышение показаний анемометра над истинной средней скоростью ветра. Причина этого указана в главе 2. Разумеется, на эту погрешность накладываются другие погрешности анемометров, которые остаются за рамками данной работы.

Обращает на себя внимание, что величина погрешности особенно значительна при малых скоростях ветра. Это объясняется тем, что скорость раскачки буя сопоставима со скоростью ветра, а в некоторых случаях может даже превышать её. При большой скорости ветра влияние скорости раскачки становится незначительным, и ошибка стремится к нулю.

Из таблиц 4.1 и 4.2 также видно, что при прочих одинаковых условиях погрешность возрастает при увеличении высоты датчика. Это легко объяснить, т.к. с увеличением высоты увеличивается скорость раскачки буя. Таким образом, можно рекомендовать уменьшение высоты положения датчика. Впрочем, это может привести к забрызгиванию датчика водой и искажению показаний из-за измерения скорости ветра вблизи уровня шероховатости.

Результаты проведённых расчётов могут быть использованы для автоматической обработки результатов измерений. В самом деле, океанографические буи оснащены датчиком частоты и угла раскачки.[8] Знание этих величин позволит применить разработанную методику при определении истинной средней скорости ветра, заложив её в программу обработки измерений.

## Заключение

Выполненное исследование затрагивает актуальную и очень востребованную тему не только в области метеорологии, но и во многих отраслях хозяйственной деятельности человека. Потребителями метеорологической информации о скорости ветра являются строительные и спортивные объекты, отрасли дорожного, железнодорожного, водного и воздушного сообщения и другие хозяйственные объекты. Чем точнее будут проведены измерения скорости ветра и рассчитаны ветровые нагрузки, тем качественнее будут подготовлены проекты крупных и сложных объектов, а также высотных зданий.

В ходе выполнения исследования на языке CSharp (C#) написана программа для автоматизации расчетов, обработки и визуализации полученных результатов.

Поставленные исследовательские задачи выполнены в полном объеме. В работе показана возможность увеличения точности измерений скорости ветра для ротоанемометров.

Результаты проделанной работы можно резюмировать в виде следующих выводов:

1. Ротоанемометры завышают истинную среднюю скорость ветра.
2. С ростом средней скорости ветра инерционная погрешность анемометра возрастает. Если при скорости ветра менее 3 м/с это превышение незначительно, то при скоростях ветра более 3 м/с это превышение может достигать нескольких метров в секунду и его необходимо учитывать.
3. При увеличении амплитуды флуктуаций скорости ветра погрешность  $\Delta V$  так же увеличивается, то есть чем больше флуктуации, тем сильнее анемометр завышает скорость ветра. Если при амплитуде ниже 1,5 м/с это превышение можно не принимать во внимание, то при амплитуде

более 2,5 м/с это превышение становится достаточно значительным (около 2 м/с при амплитуде флуктуаций 7 м/с).

4. С увеличением амплитуды флуктуаций время достижения стабильных показаний резко уменьшается. Если при амплитуде 1-2 м/с оно составляет 40-45 с, то при амплитуде 20-25 м/с (резкий порывистый ветер) оно составляет около 10 секунд.
5. Время достижения стабильных показаний при порывистом ветре уменьшается с увеличением скорости ветра. Иными словами, чем больше скорость ветра, тем быстрее она воспринимается анемометром. Характерное время составляет 14-15 секунд при скорости ветра 10 м/с.
6. Период флуктуаций также влияет на время достижения анемометром стабильных показаний. Как и можно было предполагать, при удлинении периода флуктуаций время достижения стабильных показаний возрастает. Однако, отношение времени достижения стабильных показаний к периоду флуктуаций практически не изменяется.
7. С ростом пути синхронизации анемометра инерционная погрешность растёт, и время стабилизации показаний увеличивается. Таким образом, для уменьшения погрешности можно рекомендовать разработку анемометров с малым путём синхронизации.
8. Практическое применение методики, разработанной в данной работе, может быть осуществлено при автоматической обработке измерений скорости ветра на буйковых метеорологических станциях. Замечено, что при большой скорости ветра инерционная погрешность анемометров на буйковых станциях пренебрежимо мала, а при малой скорости ветра её необходимо учитывать.

В работе предложена методика определения инерционной погрешности с помощью программы, составленной на языке CSharp (C#).

Полученные в результате исследования данные позволяют дать рекомендации для проектирования ротоанемометров.

Результаты проведённых расчётов могут быть использованы при конструировании метеорологических приборов и для автоматической обработки результатов измерений.

Результаты исследования апробированы и внедрены в учебный процесс в РГГМУ в рамках учебных дисциплин кафедры экспериментальной физики атмосферы.

#### Список использованных источников

1. Восканян К. Л., Кузнецов А. Д., Сероухова О. С. Автоматические метеорологические станции. Часть I. Тактико-технические характеристики. РГГМУ, С-Пб, 2016 г. – 165 с.
2. Григоров Н. О., Никитина В. С. Теоретическое исследование чувствительности и инерции балансомера. Известия Географического общества Узбекистана. Том 56, Ташкент, 2019 г. – с. 141-147.
3. Григоров Н.О., Саенко А.Г., Восканян К.Л. Методы и средства гидрометеорологических измерений. Метеорологические приборы. РГГМУ, С-Пб, 2012 г. – 306 с.
4. Инерционные погрешности ротоанемометров. Григоров Н. О., Никитина В. С. Труды II Всероссийской конференции «Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития», имени Л. Н. Карлина. 19-20.12.2018 г. Санкт-Петербург, с. 204-205.
5. Исследование балансомера. Григоров Н. О., Никитина В. С. Электронный журнал «SOUTHERN ALMANAC OF SCIENTIFIC RESEARCH — ЮЖНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ АЛЬМАНАХ» 13.09.2019 г. Севастополь. Режим доступа: <http://yunia.ru/article/10-3> (дата обращения 20.10.2019)
6. Исследование погрешностей ротоанемометров. Григоров Н. О., Никитина В. С. Электронный журнал «SOUTHERN ALMANAC OF SCIENTIFIC RESEARCH — ЮЖНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ АЛЬМАНАХ» 23.04.2019 г. Севастополь. Режим доступа: <https://yunia.ru/article/9-5> (дата обращения 15.06.2019)
7. Капустин А. В., Сторожук Н. Л. Технические средства гидрометеорологической службы. Санкт-Петербург, 2005 г. – 283 с.
8. Ковчин И.С., Степанюк И.А. Методы специальных океанологических измерений. Санкт-Петербург, 2002 г. – 263 с.

9. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып.3, ч.1. Метеорологические измерения на станциях. Л., Гидрометеиздат, 1985 г. – 300 с.
10. Оптико-физические средства исследования океана / Гульков В.Н., Зайцев В.А., Кропоткин М.А. и др. - Л.: Судостроение, 1984.- 264 с.
11. Чувствительность трансмиссометров как функция измерительной базы. Григоров Н. О., Никитина В. С. Электронный журнал «SOUTHERN ALMANAC OF SCIENTIFIC RESEARCH — ЮЖНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ АЛЬМАНАХ» 07.12.2017 г. Севастополь  
Режим доступа: <http://yunia.ru/article/4-3> (дата обращения 10.09.2019)
12. URL: [http://www.raimet.ru/imgs/db/catalog2\\_files/file\\_24.pdf](http://www.raimet.ru/imgs/db/catalog2_files/file_24.pdf). Анемометр WAA151 [Электронный ресурс] Анемометр WAA151 Техническое описание. (дата обращения 01.04.2020).
13. URL: <http://www.meteogmp.ru/products/view/35> [Электронный ресурс]. Метеостанция М-49М (дата обращения 16.04.2020).
14. URL: [www.pmel.noaa.gov](http://www.pmel.noaa.gov) [Электронный ресурс] Буйковые метеорологические станции. (дата обращения 20.04.2020)