



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

Кафедра ЭФА

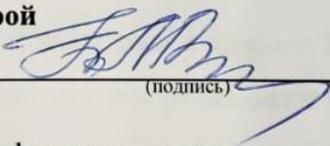
**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**  
(бакалаврская работа)

На тему: «Влияние точности измерения скорости ветра на её прогноз»

Исполнитель Шамаева Марина Сергеевна  
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат физико-математических наук, доцент  
(ученая степень, ученое звание)  
Симакина Татьяна Евгеньевна  
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»  
И.о. заведующего кафедрой

  
(подпись)

кандидат физико-математических наук, доцент  
(ученая степень, ученое звание)

Восканян Карина Левановна  
(фамилия, имя, отчество)

« 27 » мая 2023 г.

Санкт-Петербург  
2023

## Содержание

<b>Введение</b> .....	3
<b>Глава 1. Методы измерения скорости ветра</b> .....	6
1.1. Ветер в атмосфере .....	6
1.2. Виды современных ротоанемометров .....	9
1.3. Инерция ротоанемометров .....	18
1.3.1 Пульсирующий ветровой поток и особенности его измерения .....	18
1.3.2. Причины возникновения инерционной погрешности .....	19
1.3.3. Методы калибровки индукционного анемометра .....	23
<b>Глава 2. Методики прогноза скорости ветра</b> .....	25
2.1. Методика определения скорости бокового ветра.....	25
2.2. Методика определения шквала .....	25
2.3. Прогноз скорости ветра у Земли .....	27
<b>Глава 3. Оценка погрешности измерения скорости ветра</b> .....	28
3.1. Эксперимент по измерению пути синхронизации вертушки индукционного анемометра .....	28
3.2. Исследование влияния значения пути синхронизации на инерционную погрешность.....	47
3.3. Исследование времени задержки в снятии показаний.....	48
<b>Глава 4. Исследование влияния погрешности измерения скорости ветра на точность его прогноза</b> .....	50
4.1. Влияние погрешности измерения скорости ветра на точность определения шквала.....	50
4.2. Влияние погрешности измерения скорости ветра на точность определения бокового ветра .....	53
4.3. Влияние погрешности измерения скорости ветра на точность его восстановления по высотам .....	57
<b>Заключение</b> .....	64
<b>Литература</b> .....	66

## Введение

Атмосфера находится в постоянном движении и скорость её движения не бывает одинаковой в разных частях земного шара. И у поверхности земли и на высотах существуют зоны как с сильными ветрами, так и со штилевыми. Прогноз скорости ветра и особенно его штормовые градации является востребованной информацией во многих сферах деятельности человека.

Потребителями информации о параметрах ветра являются аэропорты, крупные транспортные магистрали, а также строительные, спортивные и другие хозяйственные объекты. Получение как можно более точных значений скоростей ветра является важной задачей в связи со строительством высотных зданий, мостов. Например, небоскреб «Лахта-Центр», расположенный в Санкт-Петербурге, имеет высоту 462 метра, что делает его сильно подверженным ветрам, дующим с Финского залива [9]. Неправильное определение ветровых динамических нагрузок может привести к вибрации сооружения, и как следствие, ухудшению устойчивости и несущей способности перекрытий. Активное применение сегодня малых летательных аппаратов также требует точного знания скорости и направления ветра в данной точке и в данный момент. Поэтому в наборе измерительных приборов для управления полетами необходима портативная автоматическая метеостанция, обязательно включающая анемометр.

В автоматических станциях погоды в качестве измерителя скорости ветра зачастую используется электрический индукционный анемометр с генератором переменного тока. Чувствительным элементом такого анемометра является винт с лопастями, преобразующий скорость ветра в угловую скорость вращения постоянного магнита, закрепленного на оси винта. Механическое вращение преобразуется в электрический сигнал, который передается по каналам связи в абонентские пункты визуализации, обработки и накопления.

Существенным недостатком механических измерителей скорости ветра является их ненадежная работа при инверсных изменениях атмосферных параметров среды: температуры, давления, влажности воздуха [8]. Например, замерзание влаги на подвижных частях часто приводит к остановке крыльчатки. Также индукционный анемометр обладает погрешностями, связанными с недостаточной чувствительностью и инерцией – запаздыванием измерения реальных значений величин во времени. Вследствие инерционных свойств винт воспринимает скорость ветра не мгновенно, а с задержкой.

Данная работа посвящена исследованию погрешности ротоанемометров, которая ограничивает предельную точность определения других метеорологических параметров, предиктором для которых и является измеренные значения скорости ветра.

**Актуальность работы** обусловлена потребностью в точной информации о скорости ветра, средней и пульсационной составляющих, максимальных порывах, «розе ветров».

**Объектом исследования** являются результаты измерения индукционного анемометра.

**Предмет исследования:** погрешность этих измерений и её влияние на точность прогноза скорости ветра.

**Цель работы:** оценка влияния задержки в снятии показаний индукционного анемометра на точность прогноза скорости ветра.

**Задачами** данной работы являются:

- рассмотреть методы измерения скорости ветра и виды современных анемометров;
- изучить устройство индукционного анемометра;
- проанализировать факторы, влияющие на инерционность вертушки ротоанемометра;

- провести эксперимент по измерению пути синхронизации вертушки индукционного анемометра переменного тока и оценить погрешность ее измерений;
- рассмотреть эмпирические методы прогноза скорости ветра;
- исследовать влияние погрешности измерений скорости ветра на точность его прогноза.

**Структура работы:** ВКР состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка использованной литературы.

В первой главе описаны методы измерения скорости ветра, виды современных анемометров, анализ задержки в показаниях, факторы, влияющие на задержку, и методы устранения.

Во второй главе рассмотрены методики прогноза скорости ветра.

В третьей дана оценка погрешности измерения скорости ветра.

В четвертой главе исследовано влияние погрешности измерения скорости ветра на точность его прогноза.

Общий объём работы составляет 65 листов. Работа содержит 25 рисунков и 15 таблиц. В списке литературы - 15 наименований.

## Глава 1. Методы измерения скорости ветра

### 1.1. Ветер в атмосфере

Ветер - это любое движение воздушных масс в атмосфере. Причиной возникновения является неравномерное распределение давления ( $P_1—P_7$ ) воздуха (Рисунок 1.1.). В процессе неравномерного нагрева воздушных масс в атмосфере образуются массы теплого (Т. В.) и холодного (Х. В.) воздуха. В теплом воздухе давление медленно уменьшается с высотой, и на определенной высоте оно будет выше, чем в массе холодного воздуха. Воздух начинает перетекать из области теплой массы в область холодной. В то же время давление холодной воздушной массы увеличивается не только на высоте перетекания воздуха, но и у поверхности Земли. У поверхности Земли холодный воздух будет течь навстречу тепловому, из области высокого давления В (Рисунок 1.2.) в область более низкого Н, что приведет к образованию ветра. Сила, вызывающая ветер, называется барическим градиентом.

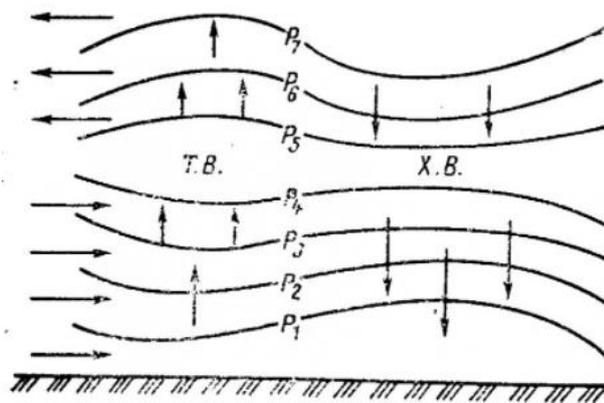


Рисунок 1.1. Схема возникновения ветра

Горизонтальным барическим градиентом ( $G$ ) называется изменение давления атмосферы на поверхности земли на расстоянии 111 км по направлению наибольшего его падения. Направление барического градиента измеряется в градусах по круговому счету, а значение его — в Паскалях. Значение градиента прямо пропорционально разности давлений. От этого значения и зависит сила ветра.

Движение воздуха должно было бы происходить по направлению барического градиента  $G$ , однако в действительности направление ветра составляет с направлением градиента некоторый угол,  $\alpha$  (см. рис. 1.2.), иногда весьма значительный. Это отклонение происходит в результате того, что на массы движущегося воздуха воздействует отклоняющая сила и сила трения (сила Кориолиса). Сила Кориолиса отклоняет ветер вправо в северном полушарии и влево — в южном. Скорость ветра при этом не меняется. В результате трения воздуха о поверхности, Земли меняется не только направление, но и скорость ветра. Под воздействием указанных сил ветер отклоняется от барического градиента над океанами в средних широтах на угол  $80\text{—}90^\circ$ , а над сушей — до  $60^\circ$ .

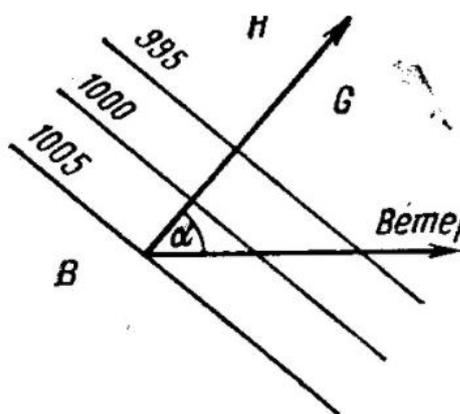


Рисунок 1.2. Отклонение ветра от барического градиента в северном полушарии

На более локальном уровне разница давлений возникает из рельефа местности, а также из-за разного нагрева различных областей [13].

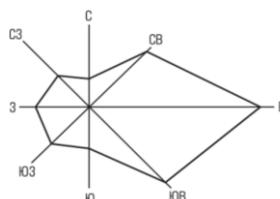
К формированию ветров приводят также и кратковременные процессы, которые, в отличие от преобладающих ветров, не являются регулярными, а происходят хаотически, часто в течение определённого сезона. Такими процессами является образование циклонов, антициклонов и подобных им явлений меньшего масштаба, в частности гроз.

Циклонами и антициклонами называют области низкого или, соответственно, высокого атмосферного давления, обычно такие, которые

возникают на пространстве размером свыше нескольких километров. На Земле они образуются над большей частью поверхности и характеризуются типичной для них циркуляционной структурой. Из-за влияния силы Кориолиса в Северном полушарии движение воздуха вокруг циклона вращается против часовой стрелки, а вокруг антициклона — по часовой стрелке. В Южном полушарии направление движения обратное. При наличии трения о поверхность появляется компонента движения к центру или от центра, в результате воздух движется по спирали к области низкого или от области высокого.

Ветер характеризуется направлением и скоростью или направлением и силой. За направление ветра принимают ту часть горизонта, откуда дует ветер. Направление ветра обычно определяют по восьми румбам горизонта (странам света) или в градусах, начиная от северного румба по часовой стрелке. Для обозначения главных румбов используют начальные буквы названий стран света: север (С), юг (Ю), восток (В), запад (З). В международной классификации используют латинские обозначения (N — норд, S — зюйд, E — ост, W — вест). Для анализа повторяемости различного направления ветра применяют график, называемый *розой ветров* (графическое изображение направления ветра за месяц, сезон или год).

Для построения розы ветров рассчитывают повторяемость ветра для каждого из восьми румбов, т.е. вычисляют, сколько раз повторилось то или иное направление ветра за данный период. Полученные значения выражают в процентах от общего числа наблюдений. Число штилей в 100% не входит (подсчитывают отдельно). Роза ветров дает наглядное представление о том, какое направление ветра за данный период является господствующим.



### *Рисунок 1.3. Роза ветров*

Для определения направления ветра используется прибор флюгер. Главная особенность этого прибора заключается в том, что он устанавливается на открытой местности, и может свободно вращаться на своей оси. В результате, по позиции, которую занимают флюгер можно определить господствующее направление ветра. Обычно флюгер устанавливаются на высоте от 10 до 13 м, и очень важно, чтобы место установки было на открытом пространстве.

Скорость ветра определяется в метрах в секунду, но иногда выражается в километрах в час, на метеорологических станциях большинства стран мира обычно измеряют на высоте 10 м и усредняют за 10 минут. Типичными приборами, предназначенными непосредственно для измерения скорости ветра, служат разнообразные анемометры, в которых применяются способные вращаться чаши или пропеллеры. [12]

#### 1.2. Виды современных ротоанемометров

##### Традиционные ротоанемометры

Традиционные ротоанемометры – самые распространенные и широко применяемые приборы для измерений скорости ветров. Они очень просты в эксплуатации и имеют относительно низкую стоимость. Однако, они не всегда могут быть эффективны на больших высотах или на больших расстояниях.



*Рисунок 1.4. Чашечный анемометр*

Они представляют собой устройства, состоящие из трех-четырёх лопастей, закрепленных на вертикальной оси. Под воздействием ветра лопасти начинают вращаться и угол поворота определяется датчиками. Скорость ветра рассчитывается по формуле:

$$V = \pi \cdot D \cdot n / 60,$$

где  $V$  - скорость ветра,  $D$  - диаметр ротора,  $n$  - число оборотов за минуту.

Одним из главных преимуществ традиционных ротоанемометров является возможность измерения направления ветра. Это достигается за счет установки дополнительных датчиков на оси ротора. Таким образом, ротоанемометры могут определять не только скорость ветра, но и его направление. Кроме того, их можно использовать в самых различных условиях, включая низкие температуры и высокую влажность. Однако они

могут быть подвержены износу и повреждениям при сильном ветре или других экстремальных условиях.

Традиционные ротоанемометры также могут использоваться для автоматического сбора данных. Они могут быть подключены к компьютеру или другому устройству для сбора и анализа данных о скорости и направлении ветра.

### Ультразвуковые ротоанемометры

Ультразвуковой ротоанемометр – это устройство, которое использует ультразвуковые волны для измерения скорости вращения ротора. Он состоит из двух основных компонентов: датчика и электронного блока. Ультразвуковой датчик ротоанемометра обычно устанавливается на поверхности ротора ветрогенератора. Он генерирует ультразвуковые волны, которые отражаются от поверхности ротора и возвращаются обратно к датчику. Электронный блок обрабатывает эти отраженные волны и определяет скорость вращения ротора.



*Рисунок 1.5. Ультразвуковой датчик ветра*

Одним из преимуществ является его высокая точность измерения. Он может измерять скорость вращения с точностью до нескольких оборотов в минуту. Кроме того, он не требует контакта с поверхностью ротора, что позволяет избежать износа и повреждений.

Ультразвуковые ротоанемометры можно использовать не только для измерения скорости вращения роторов ветрогенераторов, но и для контроля работы других вращающихся механизмов, таких как насосы, вентиляторы и компрессоры. Они также могут использоваться для измерения скорости движения жидкостей и газов.

Этот тип ротоанемометра генерирует ультразвуковые волны, которые отражаются от поверхности ротора и возвращаются обратно к датчику. Когда ротор вращается, скорость отраженных волн изменяется в зависимости от направления вращения и скорости вращения. Электронный блок анализирует изменение частоты отраженных волн и определяет скорость вращения ротора. Чем выше скорость вращения, тем больше изменение частоты отраженных волн.

Таким образом, ультразвуковые ротоанемометры являются эффективными и точными инструментами для измерения скорости вращения роторов и контроля работы различных механизмов.

### Лазерные ротоанемометры

Лазерные ротоанемометры были разработаны в 1970-х годах и с тех пор стали одним из наиболее распространенных способов измерения скорости вращения роторов ветрогенераторов. В настоящее время они широко используются в промышленности ветроэнергетики для контроля работы ветрогенераторов и оптимизации их производительности.

Одним из первых лазерных ротоанемометров был разработан компанией «Ласер Анемометрикс» (Laser Anemometrics) в 1970-х годах. Это устройство использовало лазерный луч, который проецировался на

поверхность ротора, и детектор, который измерял отраженный лазерный луч. С тех пор многие компании разработали свои собственные версии лазерных ротоанемометров, которые отличаются точностью, диапазоном дальности измерения и другими характеристиками.

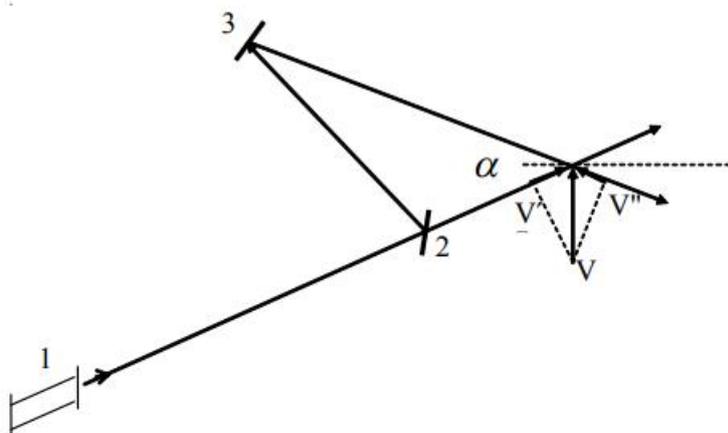


Рисунок 1.6. Оптическая схема лазерного анемометра. 1 – световой пучок, излученный лазером, 2 – полупрозрачная пластина, 3 – зеркало.

Одной из главных преимуществ лазерных ротоанемометров является их высокая точность измерения скорости вращения ротора. Они также могут быть использованы для измерения скорости вращения роторов на больших высотах и в различных условиях, таких как низкая температура, высокая влажность и т.д.

Однако, лазерные ротоанемометры могут быть более дорогими, чем другие типы анемометров, и могут требовать более сложной установки и обслуживания. Также они могут быть чувствительны к вибрациям и другим внешним факторам, которые могут повлиять на точность измерений.

Некоторые компании также разрабатывают интегрированные системы, которые объединяют лазерные ротоанемометры с другими типами датчиков для более полного контроля работы ветрогенераторов.

Лазерный ротоанемометр использует лазерный луч, который проецируется на поверхность ротора ветрогенератора. Когда ротор вращается, отраженный луч изменяет свою частоту и фазу, что позволяет определить

скорость вращения ротора. Для этого используется метод доплеровского сдвига частоты, который измеряет изменение частоты лазерного луча при отражении от движущейся поверхности.

Для более точного измерения скорости вращения ротора, лазерный ротоанемометр устанавливается на несколько точек на поверхности ротора. Это позволяет учитывать возможные отклонения в скорости вращения ротора и получать более точные данные.

Лазерные ротоанемометры могут использоваться как для измерения скорости вращения роторов горизонтальных ветрогенераторов, так и вертикальных осей. Они также могут быть использованы для контроля работы других типов механизмов, которые имеют вращающиеся элементы.

В целом, эти ротоанемометры являются одним из самых точных и современных типов приборов для измерения скорости вращения ротора ветрогенераторов. [11]

#### Акустические ротоанемометры

Акустические ротоанемометры широко используются в промышленности для измерения скорости вращения роторов и турбин. Они более точны и надежны, чем традиционные ротоанемометры, поскольку не требуют контакта с вращающимся объектом и не подвержены износу.

Работают на основе эффекта Доплера, который заключается в изменении частоты звуковых волн, когда источник и приемник перемещаются относительно друг друга. Для измерения скорости вращения ротора акустический ротоанемометр генерирует ультразвуковые волны, которые отражаются от поверхности ротора и возвращаются обратно к датчику.



*Рисунок 1.7. Портативный акустический анемометр АПА-1*

При вращении ротора скорость отраженных волн меняется в зависимости от направления вращения и скорости вращения. Электронный блок анализирует изменение частоты отраженных волн и определяет скорость вращения ротора. Чем выше скорость вращения, тем больше изменение частоты отраженных волн.

Преимуществом данного прибора является возможность измерения скорости вращения в широком диапазоне, от нескольких оборотов в минуту до нескольких тысяч оборотов в минуту. Кроме того, они могут использоваться для измерения скорости вращения как металлических, так и неметаллических роторов.

Однако имеют некоторые ограничения. К примеру, они не могут использоваться для измерения скорости вращения в жидкостях или газах, так как ультразвуковые волны плохо распространяются в этих средах. Кроме того, они могут быть подвержены помехам от других источников ультразвуковых волн, например, от других ультразвуковых приборов или от окружающей среды.

Тем не менее, акустические ротоанемометры все еще остаются популярными инструментами для измерения скорости вращения роторов в различных промышленных областях благодаря своей высокой точности и надежности.

### Индукционный анемометр

Индукционный анемометр является прибором для измерения скорости ветра. Он использует принцип электромагнитной индукции для определения скорости воздушного потока. Устройство состоит из двух катушек, одна из которых является передающей, а другая - приемной. Когда ветер движется через передающую катушку, он создает переменное магнитное поле, которое индуцирует переменное напряжение в приемной катушке. Это напряжение пропорционально скорости воздушного потока и может быть использовано для определения его скорости.

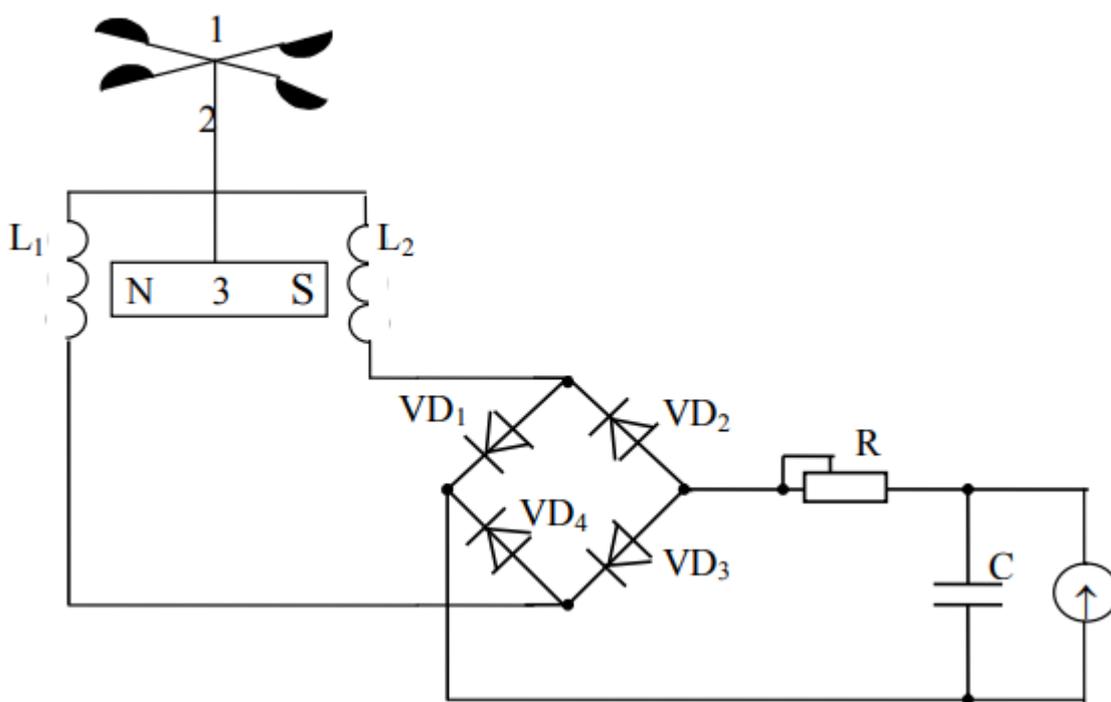


Рисунок 1.8. Индукционный анемометр с генератором тока

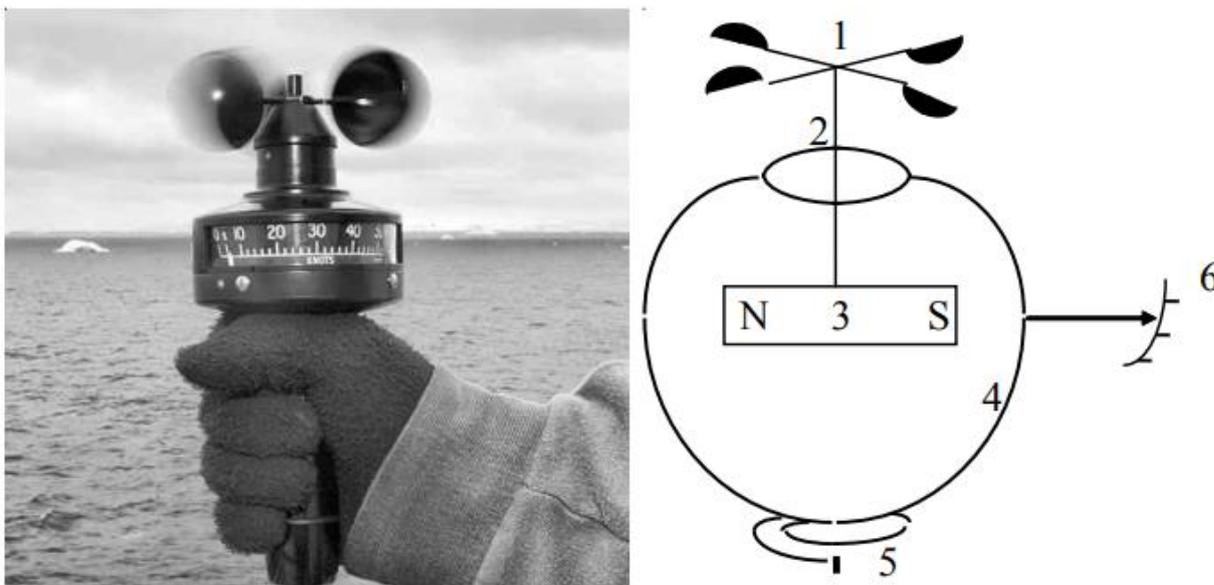


Рисунок 1.9. Индукционный анемометр АРИ-49. 1 – датчик – чашечная вертушка или винт, 2 – ось, 3 – постоянный магнит, 4 – металлическая чашка, 5 – пружина, 6 – шкала.

Особенности конструкции индукционных анемометров могут различаться в зависимости от производителя и модели. Однако, обычно они имеют две катушки, расположенные на расстоянии друг от друга. Размеры катушек и расстояние между ними могут быть изменены в зависимости от требований конкретного приложения.

Для моделирования работы индукционного анемометра используются компьютерные программы, которые позволяют рассмотреть различные сценарии работы прибора при различных скоростях ветра. Это позволяет определить оптимальные параметры для работы анемометра.

Экспериментальные исследования работы проводятся на специально созданных установках. Измерения скорости ветра проводятся при различных условиях, таких как направление и скорость ветра, температура и влажность воздуха. Оценка точности измерений проводится с помощью сравнения результатов с другими методами измерения скорости ветра.

Оценка работы показывает, что прибор обладает высокой точностью и надежностью. Однако, существуют некоторые недостатки, такие как ограниченный диапазон измеряемых скоростей ветра и зависимость от

направления ветра. Рекомендации по улучшению работы индукционного анемометра включают увеличение диапазона измеряемых скоростей и улучшение точности измерений при изменении направления ветра.

В заключении можно отметить, что индукционные анемометры являются эффективным и надежным способом измерения скорости ветра. Дальнейшие исследования могут быть направлены на улучшение точности измерений и расширение диапазона измеряемых скоростей ветра. [6]

### 1.3. Инерция ротоанемометров

#### 1.3.1 Пульсирующий ветровой поток и особенности его измерения

Пульсирующий ветер - это изменения скорости и направления ветра, которые происходят с определенной периодичностью и амплитудой.

Пульсации ветрового потока могут иметь различные характеристики, такие как частота, амплитуда и продолжительность. Частота пульсаций может варьироваться от нескольких герц до нескольких килогерц, а амплитуда может изменяться от нескольких процентов до нескольких десятков процентов от средней скорости ветра.

Пульсации ветра могут вызывать различные эффекты на окружающую среду. Например, они могут приводить к повышенному шуму и вибрациям, что может быть нежелательным для жилых зданий и инфраструктуры. Кроме того, пульсации ветра могут оказывать влияние на экологические системы, такие как леса и растительность, а также на животный мир.

В аэродинамике летательных аппаратов пульсации приводят к изменению аэродинамических характеристик, таких как подъемная сила и сопротивление. Это может быть особенно важно для вертолетов и других летательных аппаратов, которые работают вблизи поверхности земли.

В работе ветрогенераторов пульсации могут вызывать изменения в производительности генератора. Это может приводить к нестабильной работе генератора и уменьшению его эффективности.

В целом, пульсации ветрового потока являются важным фактором, который необходимо учитывать при проектировании и эксплуатации различных систем и устройств, связанных с ветром.

Измерение пульсаций ветра может быть достаточно сложным процессом. Для этого используются специальные приборы, такие как анемометры и микрофоны.

Анемометры измеряют скорость и направление ветра, а также его пульсации. Микрофоны используются для измерения шума, вызванного пульсациями ветра. Это особенно важно для оценки воздействия пульсаций на жилые здания и другие инфраструктурные объекты.

Для более точного измерения пульсаций ветрового потока могут использоваться специальные программы компьютерного моделирования. Они позволяют оценить эффекты пульсаций на различные системы и устройства, а также определить оптимальные параметры для их проектирования и эксплуатации.

### 1.3.2. Причины возникновения инерционной погрешности

#### 1) Состояние ротора

- Размер и форма лопастей ротора

Лопастей ротора являются основным элементом, который преобразует энергию ветра в электрический сигнал, который затем используется для определения скорости ветра. Один из основных способов, которыми размер и форма лопастей ротора могут влиять на точность измерения, связан с тем, что они могут создавать неодинаковое сопротивление воздуху. Если лопасти имеют неравномерную форму или размеры, то они могут создавать большее сопротивление воздуха на одной стороне, чем на другой, что может привести

к погрешности измерения. Точно также, если лопасти имеют разные размеры. Также важно учитывать и другие факторы, такие как материал, из которого сделаны лопасти, и их угол наклона.

Если лопасти сделаны из материала, который имеет большую плотность, то они будут создавать большее сопротивление воздуху и тормозить вращение ротора. Это может привести к погрешности измерения скорости ветра. Если угол наклона лопастей неправильный, то это может привести к тому, что они будут создавать большее или меньшее сопротивление воздуху, что может повлиять на скорость вращения ротора и точность измерения.

- **Неправильная установка ротора**

Если ротор установлен неправильно, то он может не вращаться свободно и терять энергию во время работы. Кроме того, неправильная установка может привести к его износу и повреждению. Ротор установлен слишком близко к магнитам, происходит столкновение с ними и повреждение. Это также приводит к неправильным показаниям. Для того чтобы избежать таких проблем и минимизировать погрешности измерения, необходимо следовать определенным рекомендациям по его установке:

Во-первых, установить ротор на определенном расстоянии от магнитов. Это расстояние должно быть достаточно большим, чтобы ротор мог свободно вращаться и не сталкиваться с магнитами. Оптимальное расстояние зависит от типа индукционного анемометра и может быть указано в инструкции по эксплуатации. Во-вторых, установить ротор таким образом, чтобы он был выровнен по центру магнитов. Если установлен слишком близко к одному из магнитов, то это может привести к его неправильному вращению и неправильным показаниям скорости ветра. В-третьих, необходимо убедиться, что ротор установлен правильно и надежно закреплен. Если не закреплен надежно, то он может двигаться и повреждаться во время работы.

- Засорение ротора

Ротор может засоряться различными материалами, такими как пыль, грязь, листья и другие мелкие предметы, которые могут попасть внутрь прибора. Когда ротор засоряется, он может начать вращаться неравномерно или даже остановиться. Если ротор не вращается свободно, то он не сможет генерировать электрический сигнал, нужный для измерения скорости ветра. Кроме того, засорение ротора может привести к его износу и повреждению. Засорившись, он может сталкиваться с магнитами и другими частями прибора.

Для избегания засорения ротора и минимизации погрешности, нужно следовать определенным рекомендациям по его эксплуатации. Устанавливать индукционный анемометр на месте, где он не будет подвергаться воздействию мусора и других мелких предметов. Например, прибор можно установить на высокой мачте или на крыше здания, где он будет защищен от попадания мусора. Необходимо периодически очищать ротор от засорений. Это можно сделать с помощью щетки или пылесоса. Очистка ротора должна проводиться регулярно, чтобы избежать накопления мусора и других материалов.

## 2) Наличие препятствий в потоке воздуха

Причины, по которым наличие препятствий может влиять на погрешности измерения:

- Изменение направление потока воздуха

В потоке воздуха есть препятствия, например, здания или деревья, то это может изменить направление потока воздуха и приведет к тому, что ротор будет вращаться не так быстро, как должен был бы вращаться в условиях свободного потока воздуха.

- Изменение скорости потока воздуха

Если в потоке имеются препятствия происходит изменение скорости потока воздуха. Например, если ветер проходит через городской ландшафт, то

скорость ветра может быть ниже, чем в открытой местности, в черте этого же города.

### 3) Вибрации и шум

Индукционный анемометр работает на основе принципа электромагнитной индукции, и любые вибрации или шумы могут повлиять на точность измерений. Вибрации и шум могут возникать из-за различных причин, таких как движение автомобилей, поездов, строительные работы и т.д. Вибрации могут передаваться на статор индукционного анемометра и вызывать неправильное вращение ротора. Шум может вызвать электромагнитные помехи, которые могут повлиять на работу индукционного анемометра и вызвать погрешности измерения скорости ветра.

Для минимизации погрешности измерения скоростей ветра необходимо устанавливать прибор в местах, где нет источников вибраций и шума. Для более точных измерений можно использовать специальные методы и технологии, которые помогают минимизировать влияние вибраций и шума на работу прибора. Например, можно использовать системы фильтрации шума и вибраций, которые позволяют устранить нежелательные эффекты и повысить точность измерений. Также можно использовать специальные материалы и конструкции. Использование материалов с высокой амортизацией, которые поглощают вибрации и шумы, или специальные конструкции, которые уменьшают воздействие внешних факторов на работу прибора.

### 4) Изменение температурного режима

Изменение температурного режима может оказывать значительное влияние на погрешности измерения скоростей ветра. Это связано с тем, что температура окружающей среды влияет на электрические свойства материалов, из которых изготовлены датчики анемометра, а также на характеристики электронных компонентов, используемых в приборе. Во-первых, изменение температуры может приводить к изменению

сопротивления датчиков анемометра. Это может привести к изменению чувствительности прибора. Например, если температура окружающей среды повышается, то сопротивление датчиков может увеличиваться, что приводит к уменьшению скорости ветра, измеренной прибором. Во-вторых, изменение температуры может влиять на точность измерения времени, используемого для расчета скорости ветра. Если температура окружающей среды меняется быстро, то это может привести к изменению частоты колебаний датчиков анемометра, что может привести к ошибкам в измерении времени. В-третьих, изменение температуры может влиять на характеристики электронных компонентов, используемых в приборе. Изменение температуры может привести к изменению напряжения питания или к изменению параметров усилителей сигнала.

Для уменьшения влияния изменения температурного режима на погрешности измерения скоростей ветра индукционным анемометром необходимо использовать компенсационные методы. Наглядный пример использовать термокомпенсацию – метод, при котором изменение температуры компенсируется путем изменения параметров электрических цепей прибора. Также можно использовать автоматическую калибровку прибора, которая позволяет корректировать его характеристики в зависимости от изменения температуры окружающей среды.

### 1.3.3. Методы калибровки индукционного анемометра

Для калибровки индукционного анемометра можно использовать следующие методы:

Метод сравнения с другими приборами. Этот метод заключается в сравнении измерений, полученных с помощью индукционного анемометра и других приборов, которые имеют высокую точность измерений скорости ветра. Например, можно использовать метеорологические станции или

лазерные доплеровские анемометры. После сравнения результатов измерений можно скорректировать показания индукционного анемометра.

Метод изменения напряжения. Метод заключается в измерении напряжения, генерируемого датчиками индукционного анемометра при различных скоростях ветра. После этого можно построить калибровочную кривую, которая связывает напряжение и скорость ветра. Калибровочная кривая может быть использована для корректировки показаний индукционного анемометра.

Метод изменения параметров электромагнитных полей. Этот метод заключается в измерении изменений параметров электромагнитных полей, которые возникают при изменении скорости ветра. Например, можно измерять изменение индукции магнитного поля или изменение емкости конденсаторов, которые используются в индукционном анемометре. После этого можно построить калибровочную кривую, которая связывает параметры электромагнитных полей и скорость ветра. Калибровочная кривая может быть использована для корректировки показаний индукционного анемометра.

Калибровка индукционного анемометра должна проводиться периодически, чтобы обеспечить точность измерений при изменении условий окружающей среды или при износе датчиков и других компонентов прибора.

## Глава 2. Методики прогноза скорости ветра

### 2.1. Методика определения скорости бокового ветра

Прогноз направления ветра дается специалистами синоптическим методом. Это значит, что синоптик, оценив и спрогнозировав синоптическое положение в зоне ответственности, определяет преобладающее направление ветра. При прогнозе направления ветра и даже по фактическому ветру на авиационных метеорологических станциях определяется боковая составляющая ветра. Обычно это делается с помощью графика, представленного на рисунке 2.1. [4].

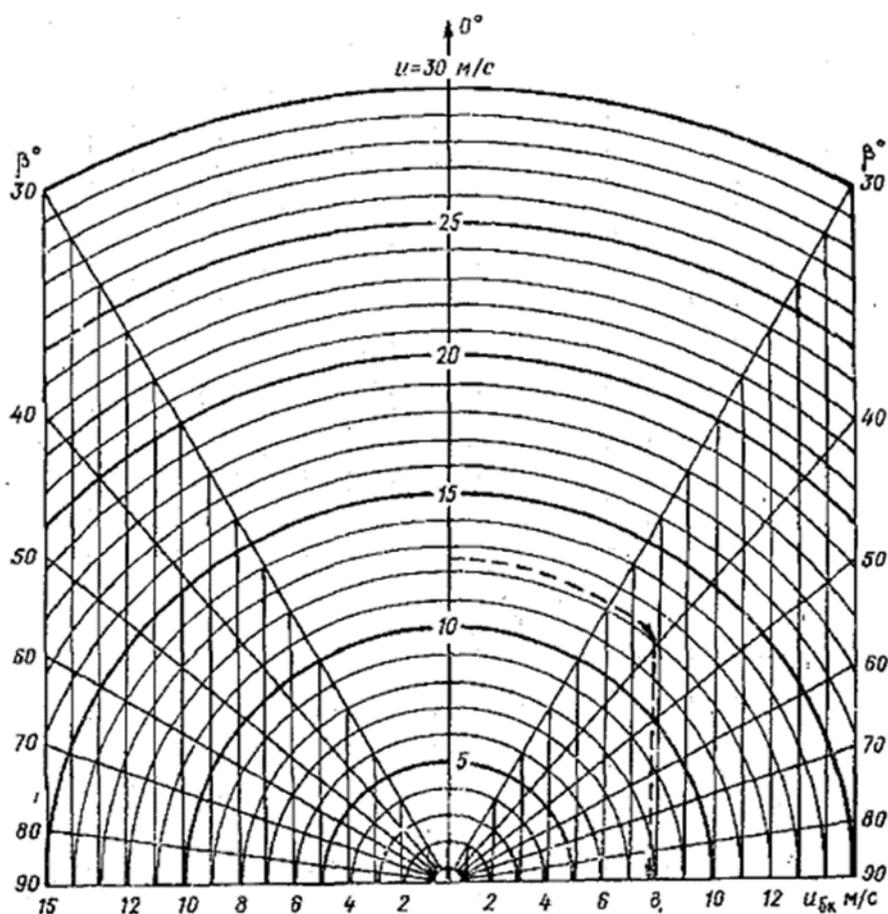


Рисунок 2.1. Номограмма для определения боковой составляющей ветра по скорости ветра  $U$  и углу  $P$  между направлением ветра и направлением ВПП [4].

### 2.2. Методика определения шквала

Шквал – это резкое и внезапное усиление ветра с обязательным изменением его направления. Б.Е. Песков и А.И. Ситников [1] предложили

методику прогноза шквалов с заблаговременностью 3 - 6 часов при ожидаемом развитии мощной кучевой облачности.

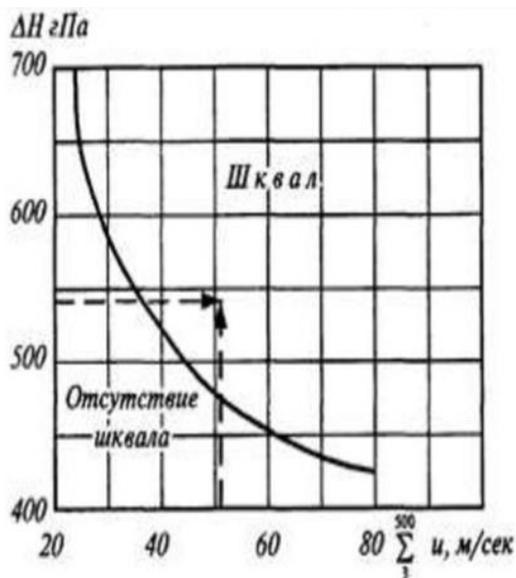


Рисунок 2.2. График для определения возможности шквала [1].

На графике по горизонтальной оси отложено суммарное значение скорости ветра (м/с) на уровне земной поверхности 850, 700 и 500 гПа, а по вертикальной оси – вертикальная мощность кучево – дождевого облака (гПа). Вся площадь графика разделена кривой на две зоны: «без шквала» и «шквал». Если по исходным данным наша точка попала в зону «шквал», то скорость ветра при шквале можно уточнить по графику на рисунке 2.3.

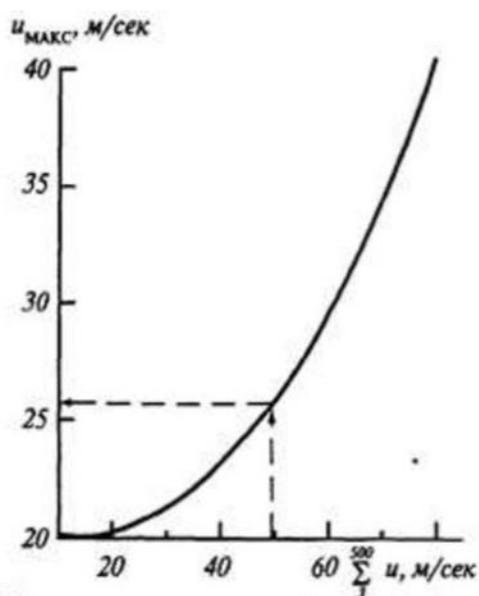


Рисунок 2.3. График для определения максимальной скорости ветра при шквале [1].

### 2.3. Прогноз скорости ветра у Земли

Рассмотрим два метода, которые позволяют спрогнозировать ветер при любой скорости.

А.С. Зверевым предложен график [3] (рисунок 2.4.), с помощью которого по горизонтальному градиенту давления в зависимости от времени года и времени суток можно определить ожидаемую скорость ветра.

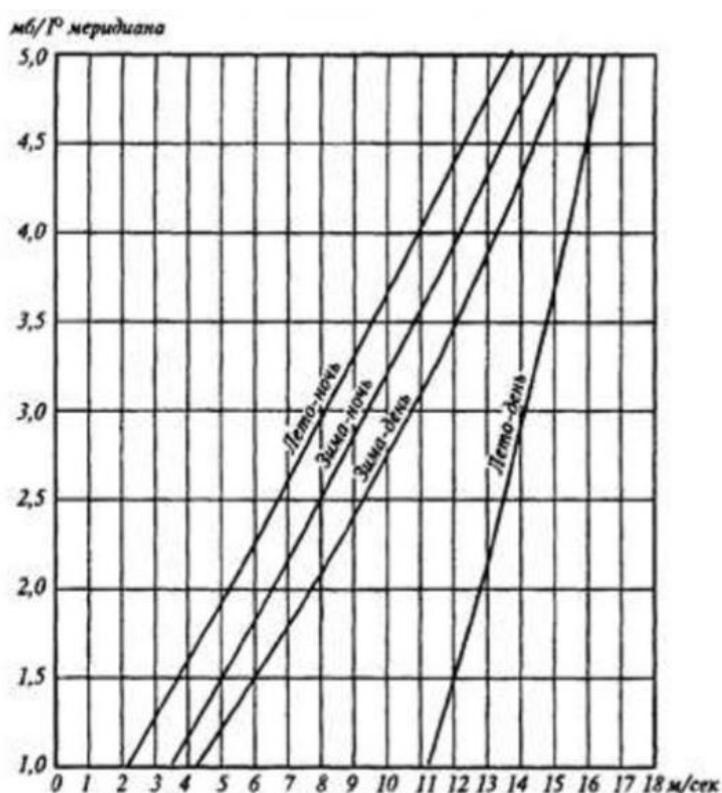


Рисунок 2.4. График зависимости скорости ветра от величины горизонтального градиента давления [3].

О.Г. Богаткиным предложен метод [3], по которому рекомендуется определять скорость ветра по полуэмпирической формуле:

$$V = k \cdot (pp),$$

Где  $V$  – скорость ветра, м/с;  $k$  – полуэмпирический коэффициент, равный  $k = 2,5$  для северо – запада ЕЧР;  $(pp)$  – барометрическая тенденция, гПа/3 ч, взятая по абсолютной величине за последний срок наблюдений. Эта формула дает хорошие результаты в зоне холодного фронта.

## Глава 3. Оценка погрешности измерения скорости ветра

### 3.1. Эксперимент по измерению пути синхронизации вертушки индукционного анемометра

Индукционный анемометр имеет путь синхронизации. Путь синхронизации вертушки - это путь, проходимый воздушным потоком, за время, в течение которого разность угловых скоростей между угловой скоростью вращения вертушки и установившейся угловой скоростью уменьшается в  $\epsilon$  раз.

Схема оборудования для эксперимента представлена на рисунке 3.1. ЛАТР обозначен 1 на рисунке 3.1. цена его деления 20В, аэродинамическую трубу – 2, градуировочный график – 3, цифровой вольтметр В7-20 - 4, стрелочный вольтметр – 6 цена его деления 2В, кнопку электромагнитного стопора – 7 и секундомер в телефоне – цена деления 0,5 сек.



Рисунок 3.1. Оборудование для исследования ротоанемометров [6].

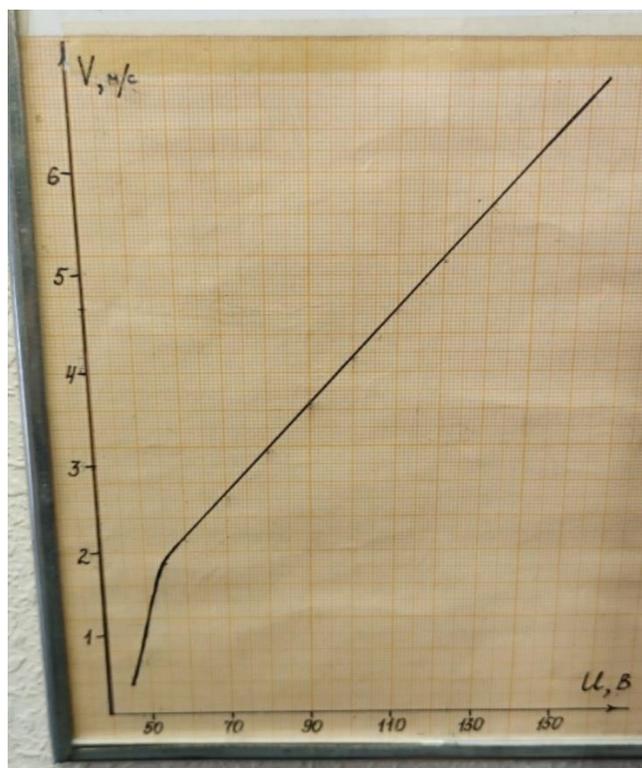


Рисунок 3.2. Градуировочный график. Зависимость скорости воздушного потока от напряжения питания двигателя аэродинамической трубы

Время и путь синхронизации:

1. Устанавливаем напряжение ЛАТРа:  $U_{\text{ЛАТРа}} = 70 \text{ В}$ .

Снимаем с графика значение скорости ветра  $V = 2,65 \text{ м/с}$

Измеряем напряжение вольтметра  $U = 16 \text{ В}$ .

$$U' = U - U/e = 16 - 16/2,7 = 10,074 \text{ В}$$

- Фиксируем время синхронизации  $t$  (сек):

$$t_1 = 28,24$$

$$t_2 = 29,56$$

$$t_3 = 28,35$$

$$t_4 = 29,17$$

$$t_5 = 27,48$$

- Нахождение погрешности прямых многократных измерений времени:

Вычисляем среднее арифметическое значение измеряемой величины:

$$\bar{t} = \frac{28,24 + 29,56 + 28,35 + 29,17 + 27,48}{5} = 28,56 \text{ с}$$

Вычисляем оценку среднего квадратического отклонения:

$$S_{\bar{t}} = \sqrt{\frac{(28,24 - 28,56)^2 + (29,56 - 28,56)^2 + (28,35 - 28,56)^2 + (29,17 - 28,56)^2 + (27,48 - 28,56)^2}{5(5 - 1)}} \\ = 0,13$$

Рассчитываем случайную погрешность:

2,78 – коэффициент Стьюдента, который определен из таблицы 3.1.

«Значение коэффициента Стьюдента», при доверительной вероятности  $\alpha = 0,95$  и числе измерений  $n = 5$ .

Таблица 3.1. Значение коэффициента Стьюдента для  $\alpha = 0,95$

$n$	2	3	4	5	6	7	8	9	10	20	30
$t_{\alpha,n}$	12,7	4,30	3,18	2,78	2,57	2,45	2,36	2,31	2,26	2,09	2,04

$$\Delta_{\bar{t}} = 2,78 \cdot 0,13 = 0,36$$

Определяем абсолютную погрешность:

0,01 сек – инструментальная погрешность секундомера, дискретность отсчета времени – 0,01 сек.

$$\Delta_t = \sqrt{0,36^2 + \left(\frac{2}{3} * 0,01 \text{ сек}\right)^2} = 0,36 \text{ с}$$

Вычисляем относительную погрешность измерения:

$$\varepsilon_t = \frac{0,36}{28,56} * 100\% = 1\%$$

$$t = (28,56 \pm 0,36) \text{ сек}; \varepsilon_t = 1 \%, \alpha = 0,95$$

- Вычисляем путь синхронизации  $L = t \cdot V$

$$L = 28,56 * 2,65 = 75,68 \text{ м}$$

- Нахождение погрешности косвенных измерений (путь синхронизации):

Определим абсолютную погрешность по формуле:

$$\Delta_z = \sqrt{\left(\frac{\partial L}{\partial t} * \Delta t\right)^2 + \left(\frac{\partial L}{\partial V} * \Delta V\right)^2}$$

$$\frac{\partial L}{\partial t} = V; \quad \frac{\partial L}{\partial V} = t$$

Выводим формулу для расчета:

$$\Delta L_n = \sqrt{(V * \Delta t)^2 + (t_n * \Delta V)^2}$$

$\Delta t$  – абсолютная погрешность  $t$ .

$\Delta V = 0,02$  м/с – абсолютная погрешность  $V$  (см. график).

Расчет абсолютной погрешности (м):

$$\Delta L = \sqrt{(2,65 * 0,36)^2 + (28,56 * 0,02)^2} = 1,11 \text{ м}$$

Определяем относительную погрешность:

$$\varepsilon_t = \frac{1,11}{33,63} * 100\% = 3\%$$

$$L = (75,68 \pm 1,11) \text{ м}; \quad \varepsilon_t = 3\%; \quad \alpha = 0,95$$

- Нахождение времени, через которое можно измерять скорость ветра:

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

$V_{уст}$  – скорость ветра, которую воспринимает анемометр;

$V$  – текущие показания анемометра;

$V_0$  – начальная скорость ветра = 0 м/с;

$\tau$  – время.

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

$$V - V_{уст} = \Delta V_{допустимой}$$

$$\Delta V_{допустимой} = 0,5 + 0,05 * V_{max}$$

$$\tau = -\frac{L}{V_{уст}} * \ln \frac{\Delta V_{допустимой}}{V_{уст}}$$

$$\Delta V_{допустимой} = 0,5 + 0,05 * 2,65 = 0,6325 \text{ м\c}$$

$$\tau = -\frac{75,68}{2,65} * \ln \frac{0,6325}{2,65} = 40,9139 \text{ сек}$$

2. Устанавливаем напряжение ЛАТРа:  $U_{ЛАТРа} = 80 \text{ В}$ .

Снимаем с графика значение скорости ветра  $V = 3,2 \text{ м\c}$

Измеряем напряжение вольтметра  $U = 20 \text{ В}$ .

$$U' = U - U/e = 20 - 20/2,7 = 12,592 \text{ В}$$

- Фиксируем время синхронизации  $t$  (сек):

$$t_1 = 13,45$$

$$t_2 = 12,84$$

$$t_3 = 12,04$$

$$t_4 = 13,60$$

$$t_5 = 12,70$$

- Нахождение погрешности прямых многократных измерений (время):

Вычисляем среднее арифметическое значение измеряемой величины:

$$\bar{t} = \frac{13,45+12,84+12,04+13,60+12,70}{5} = 12,93 \text{ с}$$

Вычисляем оценку среднего квадратического отклонения:

$$s_{\bar{t}} = \sqrt{\frac{(13,45 - 12,93)^2 + (12,84 - 12,93)^2 + (12,04 - 12,93)^2 + (13,60 - 12,93)^2 + (12,70 - 12,93)^2}{5(5 - 1)}} = 0,28$$

Рассчитываем случайную погрешность:

$$\Delta_{\bar{t}} = 2,78 * 0,28 = 0,78$$

Определяем абсолютную погрешность:

0,01 сек – инструментальная погрешность секундомера, дискретность отсчета времени – 0,01 сек.

$$\Delta_t = \sqrt{0,78^2 + \left(\frac{2}{3} * 0,01 \text{ сек}\right)^2} = 0,78$$

Вычисляем относительную погрешность измерения:

$$\varepsilon_t = \frac{0,78}{12,93} * 100\% = 6\%$$

$$t = (12,93 \pm 0,78) \text{ сек}; \varepsilon_t = 6 \%, \alpha = 0,95$$

- Вычисляем путь синхронизации  $L = t \cdot V$

$$L = 12,93 * 3,2 = 41,38 \text{ м}$$

- Нахождение погрешности косвенных измерений пут и синхронизации:

Определим абсолютную погрешность по формуле:

$$\Delta_z = \sqrt{\left(\frac{\partial L}{\partial t} * \Delta t\right)^2 + \left(\frac{\partial L}{\partial V} * \Delta V\right)^2}$$

$$\frac{\partial L}{\partial t} = V; \frac{\partial L}{\partial V} = t$$

Выводим формулу для расчета:

$$\Delta L_n = \sqrt{(V * \Delta t)^2 + (t_n * \Delta V)^2}$$

$\Delta t$  – абсолютная погрешность  $t$ .

$\Delta V = 0,02 \text{ м/с}$  – абсолютная погрешность снятия показаний скорости  $V$  (см. график).

Расчет абсолютной погрешности (м):

$$\Delta L = \sqrt{(3,2 * 0,78)^2 + (12,93 * 0,02)^2} = 2,51 \text{ м}$$

Определяем относительную погрешность:

$$\varepsilon_t = \frac{2,51}{33,63} * 100\% = 7\%$$

$$L = (75,68 \pm 2,51) \text{ м}; \varepsilon_t = 7\%; \alpha = 0,95$$

- Нахождение времени, через которое можно измерять скорость ветра:

$$V = V_{\text{уст}} + (V_0 - V_{\text{уст}}) * e^{-\frac{V_{\text{уст}} * \tau}{L}}$$

$V_{\text{уст}}$  – скорость ветра, которую воспринимает анемометр;

$V$  – текущие показания анемометра;

$V_0$  – начальная скорость ветра = 0 м/с;

$\tau$  – время.

$$V - V_{\text{уст}} = (V_0 - V_{\text{уст}}) * e^{-\frac{V_{\text{уст}} * \tau}{L}}$$

$$V - V_{\text{уст}} = \Delta V_{\text{допустимой}}$$

$$\Delta V_{\text{допустимой}} = 0,5 + 0,05 * V_{\text{max}}$$

$$\tau = -\frac{L}{V_{\text{уст}}} * \ln \frac{\Delta V_{\text{допустимой}}}{V_{\text{уст}}}$$

$$\Delta V_{\text{допустимой}} = 0,5 + 0,05 * 3,2 = 0,66 \text{ м/с}$$

$$\tau = -\frac{41,38}{3,2} * \ln \frac{0,66}{3,2} = 20,4141 \text{ сек}$$

3. Устанавливаем напряжение ЛАТРа:  $U_{\text{ЛАТРа}} = 90 \text{ В}$ .

Снимаем с графика значение скорости ветра  $V = 3,65 \text{ м/с}$

Измеряем напряжение вольтметра  $U = 36 \text{ В}$ .

$$U' = U - U/e = 36 - 36/2,7 = 22,666 \text{ В}$$

- Фиксируем время синхронизации  $t$  (сек):

$$t_1 = 10,78$$

$$t_2 = 11,54$$

$$t_3 = 10,11$$

$$t_4 = 10,27$$

$$t_5 = 11,01$$

- Нахождение погрешности прямых многократных измерений (время):

Вычисляем среднее арифметическое значение измеряемой величины:

$$\bar{t} = \frac{10,78+11,54+10,11+10,27+11,01}{5} = 10,74 \text{ с}$$

Вычисляем оценку среднего квадратического отклонения:

$$s_{\bar{t}} = \sqrt{\frac{(10,78 - 10,74)^2 + (11,54 - 10,74)^2 + (10,11 - 10,74)^2 + (10,27 - 10,74)^2 + (11,01 - 10,74)^2}{5(5 - 1)}} \\ = 0,25$$

Рассчитываем случайную погрешность:

$$\Delta_{\bar{t}} = 2,78 * 0,25 = 0,69$$

Определяем абсолютную погрешность:

0,01 сек – инструментальная погрешность секундомера, дискретность отсчета времени – 0,01 сек.

$$\Delta_t = \sqrt{0,69^2 + \left(\frac{2}{3} * 0,01 \text{ сек}\right)^2} = 0,69$$

Вычисляем относительную погрешность измерения:

$$\varepsilon_t = \frac{0,69}{10,74} * 100\% = 6\%$$

$$t = (10,74 \pm 0,69) \text{ сек}; \varepsilon_t = 6 \%, \alpha = 0,95$$

- Вычисляем путь синхронизации  $L = t \cdot V$

$$L = 10,74 * 3,65 = 39,20 \text{ м}$$

- Нахождение погрешности косвенных измерений (путь синхронизации):

Определим абсолютную погрешность по формуле:

$$\Delta_z = \sqrt{\left(\frac{\partial L}{\partial t} * \Delta t\right)^2 + \left(\frac{\partial L}{\partial V} * \Delta V\right)^2}$$

$$\frac{\partial L}{\partial t} = V; \frac{\partial L}{\partial V} = t$$

Выводим формулу для расчета:

$$\Delta L_n = \sqrt{(V * \Delta t)^2 + (t_n * \Delta V)^2}$$

$\Delta t$  – абсолютная погрешность  $t$ .

$\Delta V = 0,02$  м/с – абсолютная погрешность  $V$  (см. график).

Расчет абсолютной погрешности (м):

$$\Delta L = \sqrt{(3,65 * 0,69)^2 + (10,74 * 0,02)^2} = 2,53 \text{ м}$$

Определяем относительную погрешность:

$$\varepsilon_t = \frac{2,53}{33,63} * 100\% = 8\%$$

$$L = (39,20 \pm 2,53) \text{ м}; \varepsilon_t = 8\%; \alpha = 0,95$$

- Нахождение времени, через которое можно измерять скорость ветра:

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

$V_{уст}$  – скорость ветра, которую воспринимает анемометр;

$V$  – текущие показания анемометра;

$V_0$  – начальная скорость ветра = 0 м/с;

$\tau$  – время.

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

$$V - V_{уст} = \Delta V_{допустимой}$$

$$\Delta V_{допустимой} = 0,5 + 0,05 * V_{max}$$

$$\tau = -\frac{L}{V_{уст}} * \ln \frac{\Delta V_{допустимой}}{V_{уст}}$$

$$\Delta V_{\text{допустимой}} = 0,5 + 0,05 \cdot 3,65 = 0,68 \text{ м/с}$$

$$\tau = -\frac{39,2}{3,65} * \ln \frac{0,68}{3,65} = 18,0 \text{ сек}$$

4. Устанавливаем напряжение ЛАТРа:  $U_{\text{ЛАТРа}} = 100 \text{ В}$ .

Снимаем с графика значение скорости ветра  $V = 4,25 \text{ м/с}$

Измеряем напряжение вольтметра  $U = 50 \text{ В}$ .

$$U' = U - U/e = 50 - 50/2,7 = 31,5 \text{ В}$$

- Фиксируем время синхронизации  $t$  (сек):

$$t_1 = 7,70$$

$$t_2 = 8,55$$

$$t_3 = 7,72$$

$$t_4 = 6,95$$

$$t_5 = 8,96$$

- Нахождение погрешности прямых многократных измерений (время):

Вычисляем среднее арифметическое значение измеряемой величины:

$$\bar{t} = \frac{7,70+8,55+7,72+6,95+8,96}{5} = 7,97 \text{ с}$$

Вычисляем оценку среднего квадратического отклонения:

$$s_{\bar{t}} = \sqrt{\frac{(7,70 - 7,97)^2 + (8,55 - 7,97)^2 + (7,72 - 7,97)^2 + (6,95 - 7,97)^2 + (8,96 - 7,97)^2}{5(5 - 1)}} = 0,35$$

Рассчитываем случайную погрешность:

$$\Delta_{\bar{t}} = 2,78 * 0,35 = 0,97$$

Определяем абсолютную погрешность:

0,01 сек – инструментальная погрешность секундомера, дискретность отсчета времени – 0,01 сек.

$$\Delta_t = \sqrt{0,97^2 + \left(\frac{2}{3} * 0,01 \text{ сек}\right)^2} = 0,97$$

Вычисляем относительную погрешность измерения:

$$\varepsilon_t = \frac{0,97}{7,97} * 100\% = 12\%$$

$$t = (7,97 \pm 0,97) \text{ сек}; \varepsilon_t = 12 \%, \alpha = 0,95$$

- Вычисляем путь синхронизации  $L = t \cdot V$

$$L = 7,97 * 4,25 = 33,87 \text{ м}$$

- Нахождение погрешности косвенных измерений (путь синхронизации):

Определим абсолютную погрешность по формуле:

$$\Delta_z = \sqrt{\left(\frac{\partial L}{\partial t} * \Delta t\right)^2 + \left(\frac{\partial L}{\partial V} * \Delta V\right)^2}$$

$$\frac{\partial L}{\partial t} = V; \frac{\partial L}{\partial V} = t$$

Выводим формулу для расчета:

$$\Delta L_n = \sqrt{(V * \Delta t)^2 + (t_n * \Delta V)^2}$$

$\Delta t$  – абсолютная погрешность  $t$ .

$\Delta V = 0,02 \text{ м/с}$  – абсолютная погрешность  $V$  (см. график).

Расчет абсолютной погрешности (м):

$$\Delta L = \sqrt{(4,25 * 0,97)^2 + (7,97 * 0,02)^2} = 4,13 \text{ м}$$

Определяем относительную погрешность:

$$\varepsilon_t = \frac{4,13}{33,63} * 100\% = 12\%$$

$$L = (33,87 \pm 4,13) \text{ м}; \varepsilon_t = 12\%; \alpha = 0,95$$

- Нахождение времени, через которое можно измерять скорость ветра:

$$V = V_{\text{уст}} + (V_0 - V_{\text{уст}}) * e^{-\frac{V_{\text{уст}} * \tau}{L}}$$

$V_{\text{уст}}$  – скорость ветра, которую воспринимает анемометр;

$V$  – текущие показания анемометра;

$V_0$  – начальная скорость ветра = 0 м/с;

$\tau$  – время.

$$V - V_{\text{уст}} = (V_0 - V_{\text{уст}}) * e^{-\frac{V_{\text{уст}} * \tau}{L}}$$

$$V - V_{\text{уст}} = \Delta V_{\text{допустимой}}$$

$$\Delta V_{\text{допустимой}} = 0,5 + 0,05 * V_{\text{max}}$$

$$\tau = -\frac{L}{V_{\text{уст}}} * \ln \frac{\Delta V_{\text{допустимой}}}{V_{\text{уст}}}$$

$$\Delta V_{\text{допустимой}} = 0,5 + 0,05 * 4,25 = 0,7125 \text{ м/с}$$

$$\tau = -\frac{33,87}{4,25} * \ln \frac{0,7125}{4,25} = 14,2325 \text{ сек}$$

5. Устанавливаем напряжение ЛАТРа:  $U_{\text{ЛАТРа}} = 110 \text{ В}$ .

Снимаем с графика значение скорости ветра  $V = 4,5 \text{ м/с}$ .

Измеряем напряжение вольтметра  $U = 64 \text{ В}$ .

$$U' = U - U/e = 64 - 64/2,7 = 40,3 \text{ В}$$

- Фиксируем время синхронизации  $t$  (сек):

$$t_1 = 6,12$$

$$t_2 = 6,04$$

$$t_3 = 6,24$$

$$t_4 = 7,22$$

$$t_5 = 5,75$$

- Нахождение погрешности прямых многократных измерений (время):

Вычисляем среднее арифметическое значение измеряемой величины:

$$\bar{t} = \frac{6,12+6,04+6,24+7,22+5,75}{5} = 6,27 \text{ с}$$

Вычисляем оценку среднего квадратического отклонения:

$$s_{\bar{t}} = \sqrt{\frac{(6,12 - 6,27)^2 + (6,04 - 6,27)^2 + (6,24 - 6,27)^2 + (7,22 - 6,27)^2 + (5,75 - 6,27)^2}{5(5 - 1)}} = 0,25$$

Рассчитываем случайную погрешность:

$$\Delta_{\bar{t}} = 2,78 * 0,25 = 0,70$$

Определяем абсолютную погрешность:

$$\Delta_t = \sqrt{0,7^2 + \left(\frac{2}{3} * 0,01 \text{ сек}\right)^2} = 0,70$$

Вычисляем относительную погрешность измерения:

$$\varepsilon_t = \frac{0,7}{6,27} * 100\% = 11\%$$

$$t = (6,27 \pm 0,70) \text{ сек}; \varepsilon_t = 11 \%, \alpha = 0,95$$

- Вычисляем путь синхронизации  $L = t \cdot V$  (м) для каждого  $t$ :

$$L = 6,27 * 4,5 = 28,22 \text{ м}$$

- Нахождение погрешности косвенных измерений (путь синхронизации):

Определим абсолютную погрешность по формуле:

$$\Delta_z = \sqrt{\left(\frac{\partial L}{\partial t} * \Delta t\right)^2 + \left(\frac{\partial L}{\partial V} * \Delta V\right)^2}$$

$$\frac{\partial L}{\partial t} = V; \frac{\partial L}{\partial V} = t$$

Выводим формулу для расчета:

$$\Delta L_n = \sqrt{(V * \Delta t)^2 + (t_n * \Delta V)^2}$$

$\Delta t$  – абсолютная погрешность  $t$ .

$\Delta V = 0,02$  м/с – абсолютная погрешность  $V$  (см. график).

Расчет абсолютной погрешности:

$$\Delta L = \sqrt{(4,5 * 0,7)^2 + (6,27 * 0,02)^2} = 3,15 \text{ м}$$

Определяем относительную погрешность:

$$\varepsilon_t = \frac{3,15}{33,63} * 100\% = 9\%$$

$$L = (28,22 \pm 3,15) \text{ м}; \varepsilon_t = 9\%; \alpha = 0,95$$

- Нахождение времени, через которое можно измерять скорость ветра:

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

$V_{уст}$  – скорость ветра, которую воспринимает анемометр;

$V$  – текущие показания анемометра;

$V_0$  – начальная скорость ветра = 0 м/с;

$\tau$  – время.

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

$$V - V_{уст} = \Delta V_{допустимой}$$

$$\Delta V_{допустимой} = 0,5 + 0,05 * V_{max}$$

$$\tau = -\frac{L}{V_{уст}} * \ln \frac{\Delta V_{допустимой}}{V_{уст}}$$

$$\Delta V_{допустимой} = 0,5 + 0,05 * 4,5 = 0,725 \text{ м/с}$$

$$\tau = -\frac{28,22}{4,5} * \ln \frac{0,725}{4,5} = 11,4489 \text{ сек}$$

6. Устанавливаем напряжение ЛАТРа:  $U_{\text{ЛАТРа}} = 120 \text{ В}$ .

Снимаем с графика значение скорости ветра  $V = 5,2 \text{ м/с}$ .

Измеряем напряжение вольтметра  $U = 76 \text{ В}$ .

$$U' = U - U/e = 76 - 76/2,7 = 47,9 \text{ В}$$

• Фиксируем время синхронизации  $t$  (сек):

$$t_1 = 4,37$$

$$t_2 = 5,43$$

$$t_3 = 4,86$$

$$t_4 = 4,79$$

$$t_5 = 4,17$$

$$t_6 = 4,93$$

• Нахождение погрешности прямых многократных измерений времени:

Вычисляем среднее арифметическое значение измеряемой величины:

$$\bar{t} = \frac{4,37+5,43+4,86+4,76+4,17+4,93}{6} = 4,75 \text{ с}$$

Вычисляем оценку среднего квадратического отклонения:

$$S_t = \sqrt{\frac{(4,37 - 4,75)^2 + (5,43 - 4,75)^2 + (4,86 - 4,75)^2 + (4,79 - 4,75)^2 + (4,17 - 4,75)^2 + (4,93 - 4,75)^2}{6(6 - 1)}} = 0,18$$

Рассчитываем случайную погрешность:

$$\Delta_t = 2,57 * 0,18 = 0,46$$

Определяем абсолютную погрешность:

$$\Delta_t = \sqrt{0,46^2 + \left(\frac{2}{3} * 0,01 \text{ сек}\right)^2} = 0,47$$

Вычисляем относительную погрешность измерения:

$$\varepsilon_t = \frac{0,47}{4,75} * 100\% = 10\%$$

$$t = (4,75 \pm 0,47) \text{ сек}; \varepsilon_t = 10 \%, \alpha = 0,95$$

- Вычисляем путь синхронизации  $L = t \cdot V$  (м) для каждого  $t$ :

$$L = 4,75 * 5,2 = 24,7 \text{ м}$$

- Нахождение погрешности косвенных многократных измерений (путь синхронизации):

Определим абсолютную погрешность по формуле:

$$\Delta_z = \sqrt{\left(\frac{\partial L}{\partial t} * \Delta t\right)^2 + \left(\frac{\partial L}{\partial V} * \Delta V\right)^2}$$

$$\frac{\partial L}{\partial t} = V; \frac{\partial L}{\partial V} = t$$

Выводим формулу для расчета:

$$\Delta L_n = \sqrt{(V * \Delta t)^2 + (t_n * \Delta V)^2}$$

$\Delta t$  – абсолютная погрешность  $t$ .

$\Delta V = 0,02$  м/с – абсолютная погрешность  $V$  (см. график).

Расчет абсолютной погрешности:

$$\Delta L = \sqrt{(5,2 * 0,47)^2 + (4,75 * 0,02)^2} = 2,45 \text{ м}$$

Определяем относительную погрешность:

$$\varepsilon_t = \frac{2,45}{33,63} * 100\% = 7\%$$

$$L = (24,7 \pm 2,45) \text{ м}; \varepsilon_t = 7\%; \alpha = 0,95$$

- Нахождение времени, через которое можно измерять скорость ветра:

$$V = V_{\text{уст}} + (V_0 - V_{\text{уст}}) * e^{-\frac{V_{\text{уст}} * \tau}{L}}$$

$V_{\text{уст}}$  – скорость ветра, которую воспринимает анемометр;

$V$  – текущие показания анемометра;

$V_0$  – начальная скорость ветра = 0 м/с;

$\tau$  – время.

$$V - V_{\text{уст}} = (V_0 - V_{\text{уст}}) * e^{-\frac{V_{\text{уст}} * \tau}{L}}$$

$$V - V_{\text{уст}} = \Delta V_{\text{допустимой}}$$

$$\Delta V_{\text{допустимой}} = 0,5 + 0,05 * V_{\text{max}}$$

$$\tau = -\frac{L}{V_{\text{уст}}} * \ln \frac{\Delta V_{\text{допустимой}}}{V_{\text{уст}}}$$

$$\Delta V_{\text{допустимой}} = 0,5 + 0,05 * 5,2 = 0,76 \text{ м/с}$$

$$\tau = -\frac{24,7}{5,2} * \ln \frac{0,76}{5,2} = 9,1347 \text{ сек}$$

7. Устанавливаем напряжение ЛАТРа:  $U_{\text{ЛАТРа}} = 130 \text{ В}$ .

Снимаем с графика значение скорости ветра  $V = 5,5 \text{ м/с}$ .

Измеряем напряжение вольтметра  $U = 88 \text{ В}$ .

$$U' = U - U/e = 88 - 88/2,7 = 55,4 \text{ В}$$

- Фиксируем время синхронизации  $t$  (сек):

$$t_1 = 3,57$$

$$t_2 = 4,02$$

$$t_3 = 4,18$$

$$t_4 = 3,60$$

$$t_5 = 3,71$$

$$t_6 = 3,15$$

- Нахождение погрешности прямых многократных измерений (время):

Вычисляем среднее арифметическое значение измеряемой величины:

$$\bar{t} = \frac{3,57+4,02+4,18+3,60+3,71+3,15}{6} = 3,71 \text{ с}$$

Вычисляем оценку среднего квадратического отклонения:

$$s_t = \sqrt{\frac{(3,57 - 3,71)^2 + (4,02 - 3,71)^2 + (4,18 - 3,71)^2 + (3,60 - 3,71)^2 + (3,71 - 3,71)^2 + (3,15 - 3,71)^2}{6(6 - 1)}} \\ = 0,15$$

Рассчитываем случайную погрешность:

$$\Delta_{\bar{t}} = 2,57 * 0,15 = 0,39$$

Определяем абсолютную погрешность:

$$\Delta_t = \sqrt{0,39^2 + \left(\frac{2}{3} * 0,01 \text{ сек}\right)^2} = 0,39$$

Вычисляем относительную погрешность измерения:

$$\varepsilon_t = \frac{0,39}{3,71} * 100\% = 11\%$$

$$t = (3,71 \pm 0,39) \text{ сек}; \varepsilon_t = 11\%, \alpha = 0,95$$

- Вычисляем путь синхронизации  $L = t \cdot V$  (м) для каждого t:

$$L = 3,71 * 5,5 = 20,41 \text{ м}$$

- Нахождение погрешности косвенных многократных измерений (путь синхронизации):

Определим абсолютную погрешность по формуле:

$$\Delta_z = \sqrt{\left(\frac{\partial L}{\partial t} * \Delta t\right)^2 + \left(\frac{\partial L}{\partial V} * \Delta V\right)^2}$$

$$\frac{\partial L}{\partial t} = V; \quad \frac{\partial L}{\partial V} = t$$

Выводим формулу для расчета:

$$\Delta L_n = \sqrt{(V * \Delta t)^2 + (t_n * \Delta V)^2}$$

$\Delta t$  – абсолютная погрешность  $t$ .

$\Delta V = 0,02$  м/с – абсолютная погрешность  $V$  (см. график).

Расчет абсолютной погрешности:

$$\Delta L = \sqrt{(5,5 * 0,39)^2 + (3,71 * 0,02)^2} = 2,15 \text{ м}$$

Определяем относительную погрешность:

$$\varepsilon_t = \frac{2,15}{33,63} * 100\% = 6\%$$

$$L = (20,41 \pm 2,15) \text{ м}; \quad \varepsilon_t = 6\%; \quad \alpha = 0,95$$

- Нахождение времени, через которое можно измерять скорость ветра:

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

$V_{уст}$  – скорость ветра, которую воспринимает анемометр;

$V$  – текущие показания анемометра;

$V_0$  – начальная скорость ветра = 0 м/с;

$\tau$  – время.

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

$$V - V_{уст} = \Delta V_{допустимой}$$

$$\Delta V_{допустимой} = 0,5 + 0,05 * V_{max}$$

$$\tau = -\frac{L}{V_{уст}} * \ln \frac{\Delta V_{допустимой}}{V_{уст}}$$

$$\Delta V_{\text{допустимой}} = 0,5 + 0,05 * 5,5 = 0,775 \text{ м/с}$$

$$\tau = -\frac{20,41}{5,5} * \ln \frac{0,775}{5,5} = 7,27205 \text{ сек}$$

8. Вычисляем среднее квадратическое значение пути синхронизации:

$$\bar{L} = \frac{75,68 + 41,38 + 39,20 + 33,87 + 28,22 + 24,7 + 20,41}{7} = 33,63 \text{ м}$$

### 3.2. Исследование влияния значения пути синхронизации на инерционную погрешность

На рисунке представлен график зависимости среднего времени синхронизации от скорости ветра, построен по получившимся в ходе эксперимента значениям. Экспериментальные данные удалось аппроксимировать степенной зависимостью -  $y = 310,61x^{-2,578}$  с достоверностью, выраженной коэффициентом детерминации, равным 0,9787.

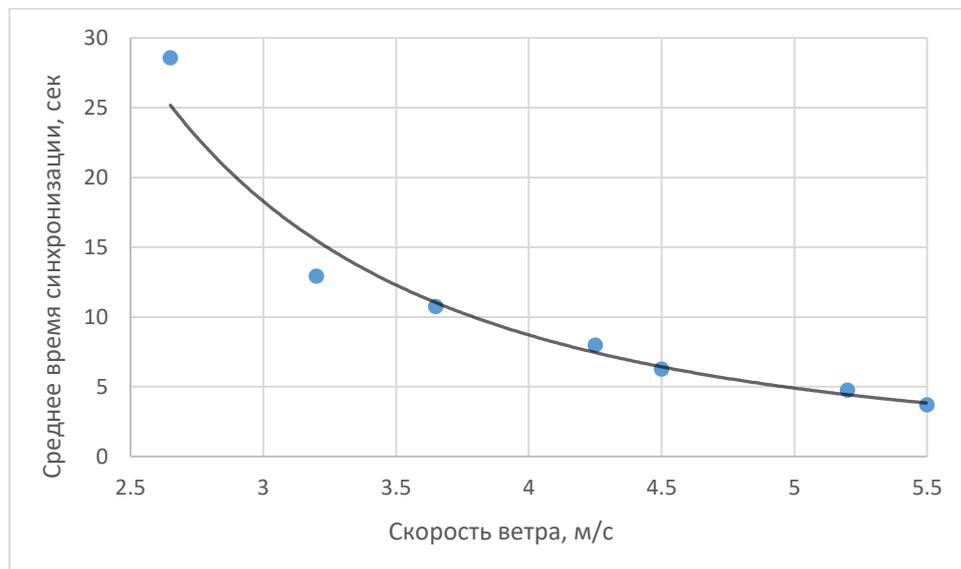


Рисунок 3.3. График зависимости среднего времени синхронизации от скорости ветра.

Ниже представлен график зависимости пути синхронизации от напряжения ЛАТРа. Экспериментальные данные удалось аппроксимировать степенной

зависимостью -  $y = 176331x^{-1,862}$  с достоверностью, выраженной коэффициентом детерминации, равной 0,9387.

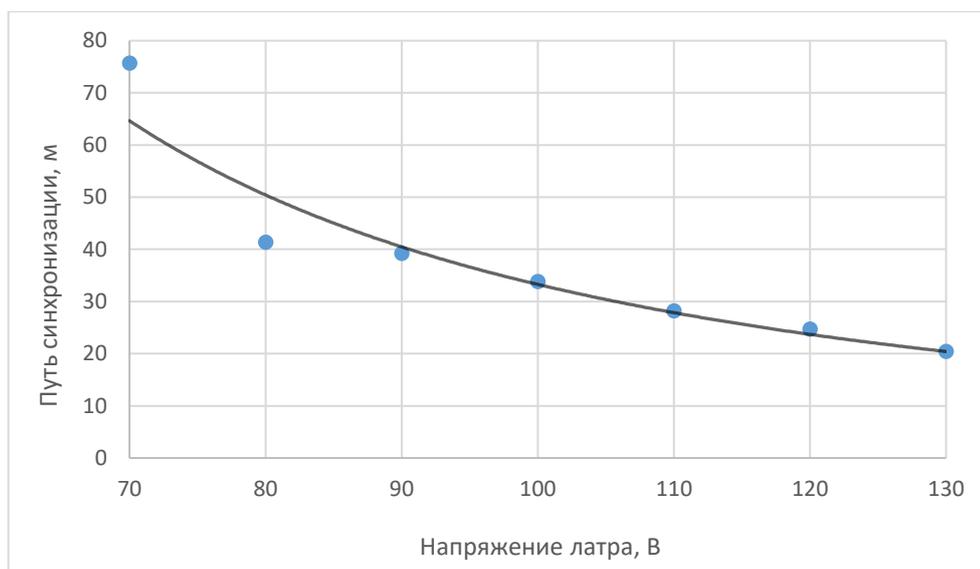


Рисунок 3.4. График зависимости пути синхронизации от напряжения ЛАТРа

### 3.3. Исследование времени задержки в снятии показаний

По формуле  $t = \frac{V}{L} \cdot \ln\left(\frac{dV}{V}\right)$ ,  $V$  – измеренная скорость ветра (м/с),  $L$  – путь синхронизации (м). Вычислим время задержки в снятии показаний анемометра при различных скоростях ветра. Начальную скорость вертушки примем нулевой, т.е. в воздушный поток вносим неподвижную вертушку. Она начинает вращаться с увеличивающейся угловой скоростью. Считаем концом задержки достижение анемометром значения  $V_{уст} - \Delta V$ ,  $\Delta V$  принята 0,1 м/с. На рисунке 3.5 показан график зависимости времени задержки от скорости ветра. Заметно нелинейное уменьшение времени задержки в снятии показаний от повышении измеряемой скорости. Скорость ветра 5.5 м/с можно измерять через 7 с после внесения вертушки в поток, а скорость ветра 3 м/с – уже через 28 с.

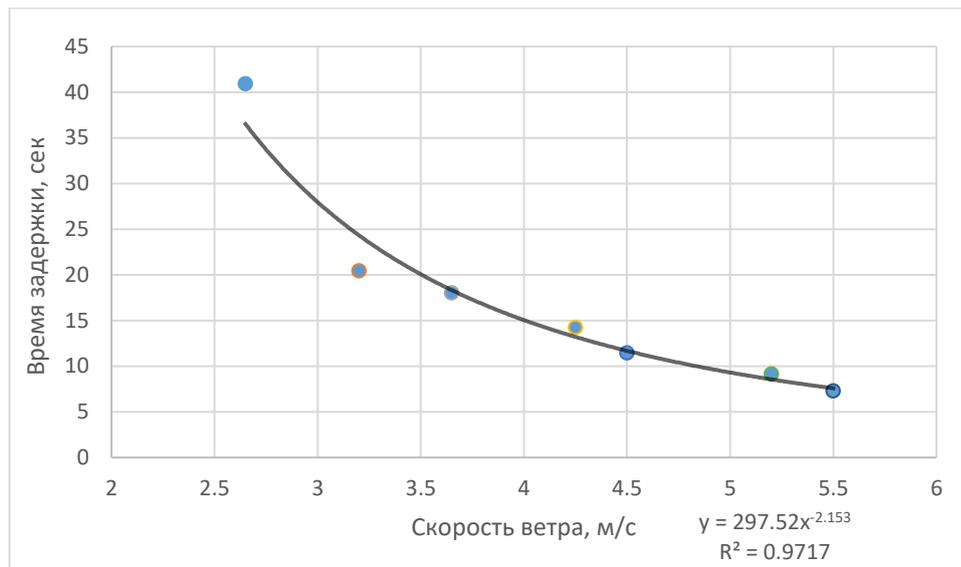


Рисунок 3.5. График зависимости времени задержки от скорости ветра

Экспериментальные данные удалось аппроксимировать степенной зависимостью

$$t = 297,5 \cdot v^{-2,15}$$

где  $t$  – период времени от внесения вертушки в поток со скоростью ветра  $v$  до снятия показаний, с;

$v$  – измеряемая скорость ветра, м/с.

Полученное уравнение достоверно, что подтверждает высокое значение коэффициента детерминации ( $R^2 = 0,9717$ ).

Полученное уравнение дает возможность предположить время до снятия показаний при скорости ветра 2 м/с – оно составит около 60 с.

## Глава 4. Исследование влияния погрешности измерения скорости ветра на точность его прогноза

### 4.1. Влияние погрешности измерения скорости ветра на точность определения шквала

Известно, что допустимая погрешность измерения скорости ветра анемометром, зависит от скорости ветра и вычисляется по формуле:

$$\Delta V = 0,5 \pm 0,05 \cdot V, (4.1)$$

где  $V$  – измеряемая скорость ветра, м/с.

Вычислим погрешность  $\Delta V$  для всех скоростей ветра от 20 м/с до 80 м/с, представленных в методике «Возможности определения шквала», предложенной Б.Е. Песковым и А.И. Ситниковым описанной в разделе 2.2. настоящей ВКР. Полученные результаты приведем в таблице 4.1.

Таблица 4.1. - Погрешность измерения скорости ветра ротоанемометром и скорректированные значения скорости ветра

Скорость ветра, м/с	$dH$ , гПа	Погрешность, м/с	Скорость ветра с учетом погрешности, м/с	Суммарная скорость, м/с
20	725	1,5	15,5	4,5
30	590	2	24	6
40	525	2,5	32,5	7,5
50	475	3	41	9
60	450	3,5	49,5	10,5
70	435	4	58	12
80	425	4,5	66,5	13,5

В последнем столбце таблицы 4.1. представлены скорректированные на погрешность значения скорости ветра  $V-\Delta V$ . Нанесем их на график 4.1. определения возможности шквалов.

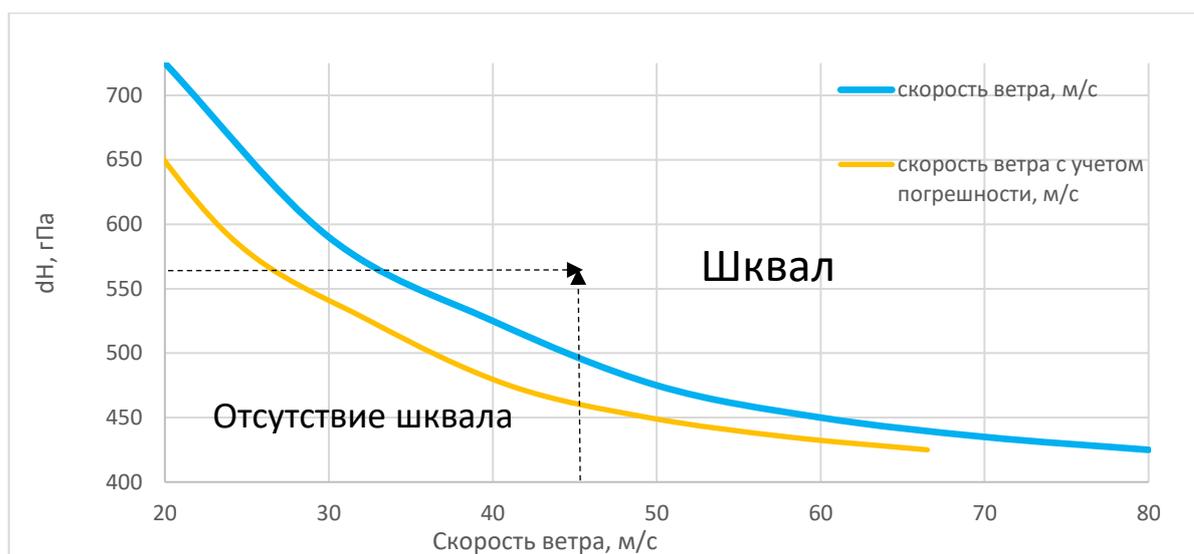


Рисунок 4.1. Определение возможности шквала

Видно расхождение между линиями, определяющими границу шквалов в методике «Возможности определения шквалов» и нашими значениями – это расхождение является зоной возможной ошибки. Эта зона увеличивается с уменьшением скорости ветра. При суммарной скорости ветра на высотах при скорости ветра 20 м/с ширина зоны ошибки составляет 5 м/с, а при 60 м/с - 9 м/с.

Если наши значения скорости ветра попадают в зону шквала, то максимальная скорость ветра определяется по рисунку 4.2. График «Определение максимальной скорости ветра при шквале» предложен Б.Е. Песковым и А.И. Ситниковым, взят из раздела 2.2.

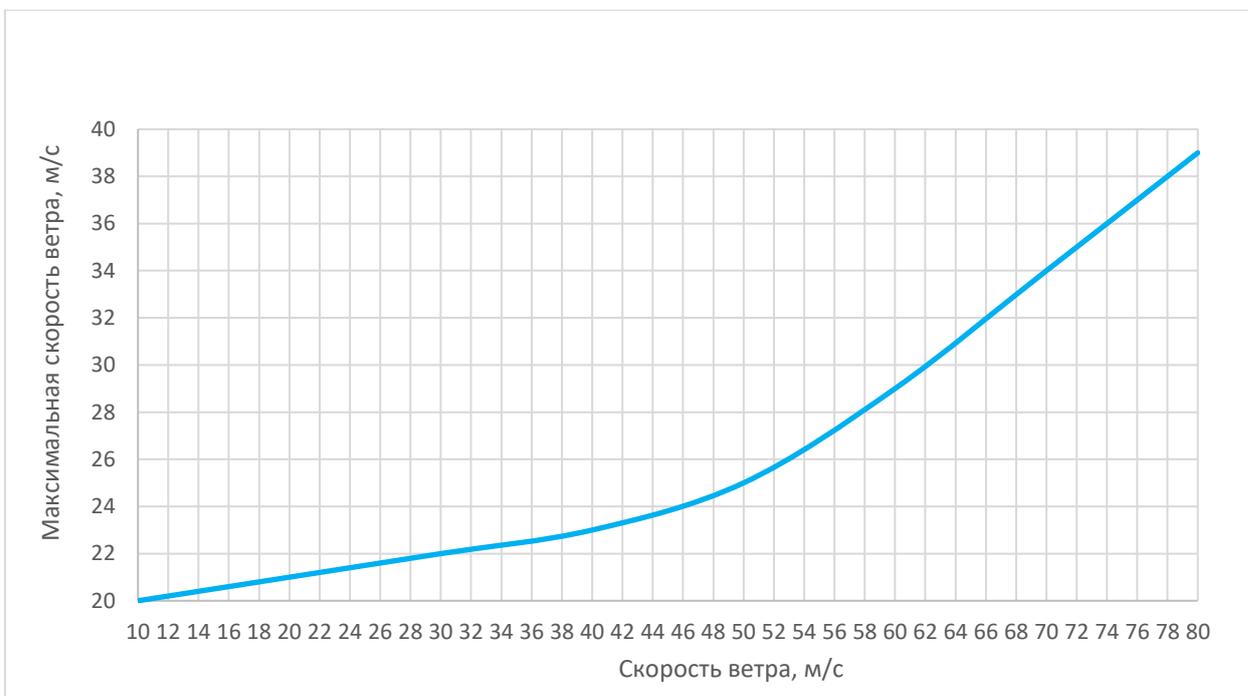


Рисунок 4.2. Определение максимальной скорости ветра при шквале [1].

По формуле 4.1 сосчитали погрешность для максимальных скоростей ветра в диапазоне от 20 м/с до 39 м/с. Вычислили скорость ветра с учетом погрешности, получили - завышенные и заниженные значения максимальной скорости. По графику 4.2. определили возможную ошибку для этих значений. Полученные результаты занесены в таблицу 4.2.

Таблица 4.2. – Погрешности, полученные при максимальной скорости ветра и скорректированные значения скорости ветра

Макс. скорость ветра, м/с	Скорость ветра, м/с	Погрешность, м/с	Скорость ветра с учетом погрешности, м/с	Завышение, м/с	Макс. при погрешности, м/с	Ошибка при занижении, м/с	Макс. при завышении, м/с	Ошибка при завышении, м/с
20	10	1	9	11	19,5	0,5	20,1	0,1
21	20	1,5	18,5	21,5	20,8	0,2	21,2	0,2
22	30	2	28	32	21,8	0,2	22,2	0,2
23	40	2,5	37,5	42,5	22,7	0,3	23,4	0,4
25	50	3	47	53	24,4	0,6	26,4	1,4
29	60	3,5	56,5	63,5	27,5	1,5	30,7	1,7
34	70	4	66	74	32	2	36,5	2,5
39	80	4,5	75,5	84,5	36,8	2,2	42	3

По данным полученным после использования графика 4.2. была построена зависимость возможных ошибок при определении максимальной

скорости ветра при шквале от скорости ветра. В диапазоне скорости ветра 20 – 35 м/с ошибка при занижении и завышении одинакова. С увеличением максимальной скорости ветра возрастает и погрешность ее определения.

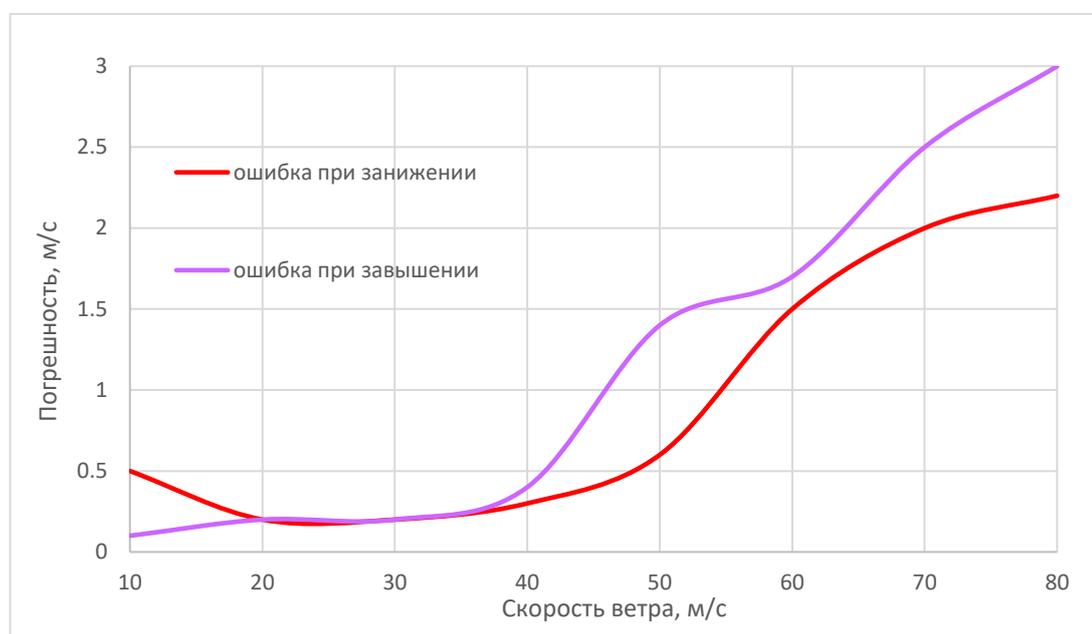


Рисунок 4.3. Зависимость ошибок от скорости ветра

#### 4.2. Влияние погрешности измерения скорости ветра на точность определения бокового ветра

По номограмме [4] определили ошибочные значения скорости ветра. Пример определения скорости бокового ветра при занижении и завышении скорости ветра приведен на рисунке 4.4. Эти значения сведем в таблицы 4.3. – 4.9.

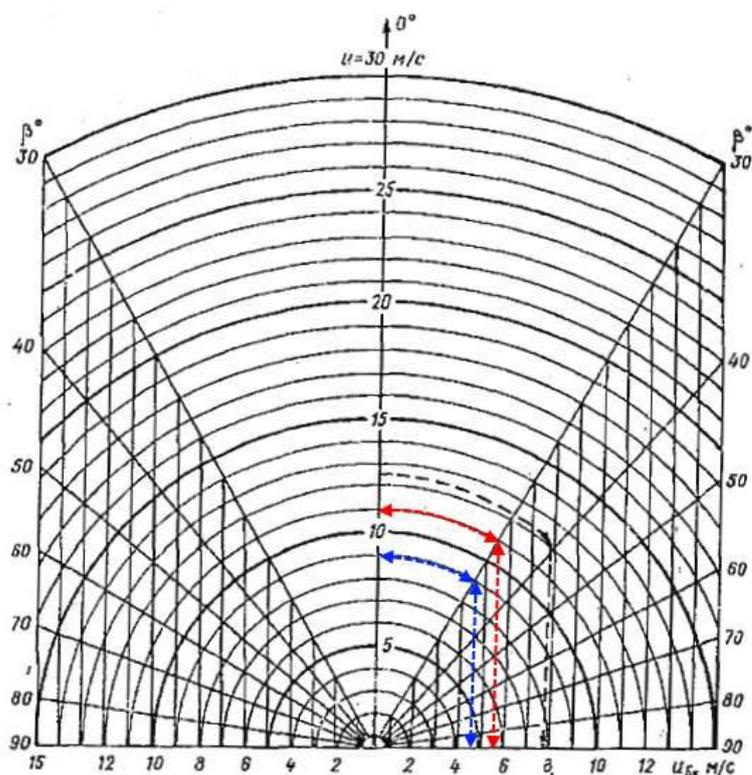


Рисунок 4.4. Номограмма для определения боковой составляющей ветра по скорости ветра  $U$  и углу  $\beta$  между направлением ветра и направлением ВПП. Синяя стрелка – занижение скорости ветра, красная стрелка – завышение скорости ветра.

В таблицах 4.3. – 4.9. при разных скоростях ветра относительно направления ВПП погрешность была найдена по формуле 4.1 для диапазона скоростей 10 – 30 м/с, так же была найдена скорость при завышении погрешностей и занижении, рассчитана их разность.

Таблица 4.3. Определение скорости бокового ветра при угле его направления относительно ВПП  $30^\circ$

Скорость, м/с	Погрешность, м/с	При завышении, м/с	При занижении, м/с	Разность, м/с
10	1	5,6	4,6	1
15	1,25	8,1	6,8	1,3
20	1,5	10,8	9,3	1,5
25	1,75	13,4	11,6	1,8
30	2	-	14	-

Таблица 4.4. Определение скорости бокового ветра при угле его направления относительно ВПП 40°

Скорость, м/с	Погрешность, м/с	При завышении, м/с	При занижении, м/с	Разность, м/с
10	1	7,4	5,9	1,5
15	1,25	10,8	9,1	1,7
20	1,5	14,1	12,3	1,8
25	1,75	-	-	-
30	2	-	-	-
30	2	-	-	-

Таблица 4.5. Определение скорости бокового ветра при угле его направления относительно ВПП 50°

Скорость, м/с	Погрешность, м/с	При завышении, м/с	При занижении, м/с	Разность, м/с
10	1	8,7	7	1,7
15	1,25	12,6	10,8	1,8
20	1,5	-	14,5	-
25	1,75	-	-	-

Таблица 4.6. Определение скорости бокового ветра при угле его направления относительно ВПП 60°

Скорость, м/с	Погрешность, м/с	При завышении, м/с	При занижении, м/с	Разность, м/с
10	1	9,6	8	1,6
15	1,25	14,3	12,1	2,2
20	1,5	-	-	-
25	1,75	-	-	-
30	2	-	-	-

Таблица 4.7. Определение скорости бокового ветра при угле его направления относительно ВПП 70°

Скорость, м/с	Погрешность, м/с	При завышении, м/с	При занижении, м/с	Разность, м/с
10	1	10,5	8,5	2
15	1,25	15,2	13	2,2
20	1,5	-	-	-
25	1,75	-	-	-
30	2	-	-	-

Таблица 4.8. Определение скорости бокового ветра при угле его направления относительно ВПП 80°

Скорость, м/с	Погрешность, м/с	При завышении, м/с	При занижении, м/с	Разность, м/с
10	1	10,9	8,9	2
15	1,25	-	13,8	-
20	1,5	-	-	-
25	1,75	-	-	-
30	2	-	-	-

Таблица 4.9. Определение скорости бокового ветра при угле его направления относительно ВПП 90°

Скорость, м/с	Погрешность, м/с	При завышении, м/с	При занижении, м/с	Разность, м/с
10	1	11	9	2
15	1,25	-	13,8	-
20	1,5	-	-	-
25	1,75	-	-	-
30	2	-	-	-

Значения разностей занесены в таблицу 4.10. и по ним построен график 4.5.

Таблица 4.10. Доверительный интервал определения скорости бокового ветра при разных направлениях ВПП

Скорость, м/с	Погрешность, м/с	30°	40°	50°	60°	70°	80°
10	1	1	1,5	1,7	1,6	2	2
15	1,25	1,3	1,7	1,8	2,2	2,2	-
20	1,5	1,5	1,8	-	-	-	-
25	1,75	1,8	-	-	-	-	-

На графике 4.5 видно, что с увеличением погрешности анемометра возрастает погрешность определения скорости бокового ветра. Так, при направлении ветра относительно ВПП 30° погрешность определения бокового ветра может достигнуть значения 1,0 м/с - 1,8 м/с при изменении скорости ветра от 1 м/с до 2,2 м/с. А при направлении ветра относительно ВПП 70°

погрешность определения бокового ветра может составить диапазон 2,0 м/с - 2,2 м/с при изменении скорости ветра от 1 м/с до 2,2 м/с.

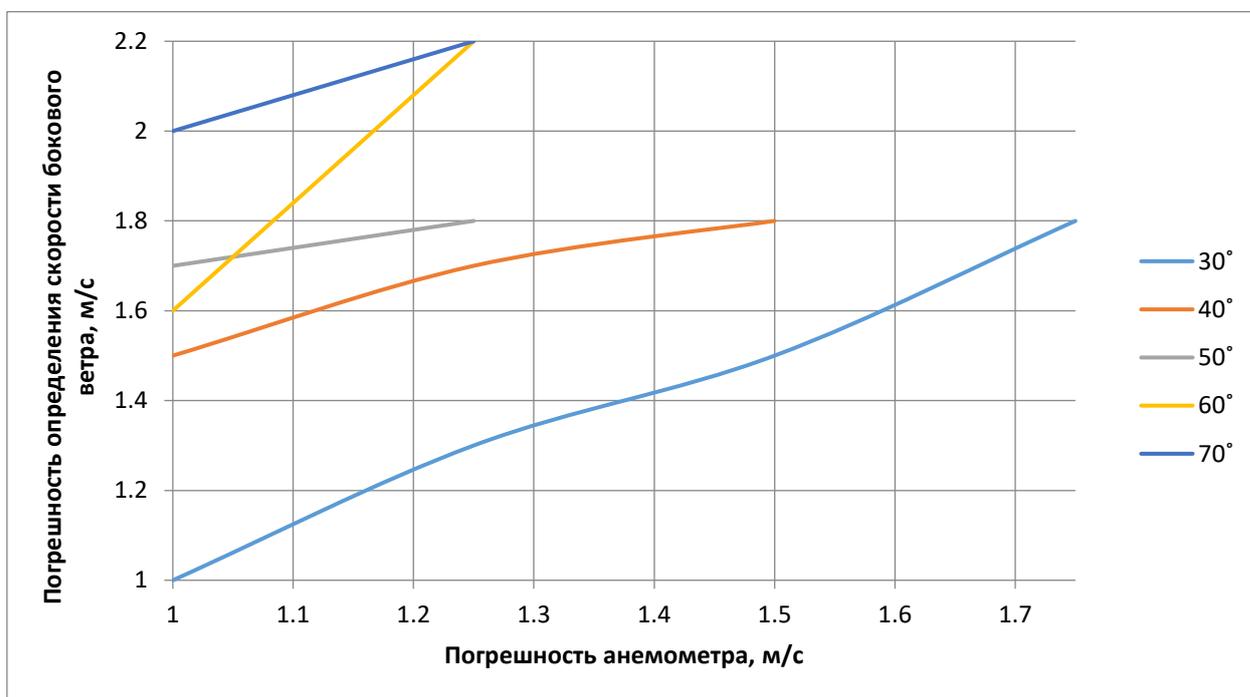


Рисунок 4.5. График зависимости погрешности определения скорости бокового ветра от погрешности анемометра при разных направлениях ветра относительно ВПП

#### 4.3. Влияние погрешности измерения скорости ветра на точность его восстановления по высотам

Для решения различных прикладных задач - ветроэнергетика, проектирование и строительство различных сооружений, перенос примесей и др. - необходимо знание характеристик скорости ветра в нижнем пограничном и приземном слое атмосферы. Зачастую характеристики ветра требуется определить в регионах, где отсутствуют аэрологические наблюдения и профилометры, но имеются наземные метеорологические станции, сеть которых значительно шире, чем сеть аэрологических станций. Тогда средние скорости ветра в приземном слое до нескольких десятков метров восстанавливают по приземным измерениям по различным эмпирическим зависимостям – логарифмической или степенной. Эти зависимости позволяют

оценить скорость ветра  $V$  на высоте  $H$ , если известна скорость ветра  $V_f$  на высоте  $H_f$ .

$$V = V_f \cdot \left(\frac{H}{H_f}\right)^\alpha,$$

$$V = V_f \cdot \frac{\ln\left(\frac{H}{k_0}\right)}{\ln\left(\frac{H_f}{k_0}\right)}$$

где  $V$  – скорость ветра на высоте  $H$ ;  $V_f$  – скорость ветра на высоте флюгера  $H_f$ ;  $\alpha$  – показатель степени;  $k_0$  – параметр шероховатости. [8]

Значения показателя степени  $\alpha$  обычно принимают в пределах значений от 0,2 до 0,4. Величина параметра шероховатости зависит от характера подстилающей поверхности и локализации точки: от миллиметров для гладкой песчаной поверхности, до 2 – 3 м – в центрах больших городов.

Погрешность измерения ветра на уровне флюгера будет влиять на правильность определения скоростей ветра по высотам. Вычислим погрешность, возникающую вследствие этого влияния. Для восстановления скорости ветра на высотах будем использовать степенной закон изменения скорости ветра с высотой. Прослеживаем изменение начальной скорости ветра для двух случаев: 5 м/с и 15 м/с до высоты 300 метров, с учетом завышения или занижения скорости при погрешности. Погрешность измерения ветра на уровне флюгера найдена по формуле 4.1.

1 случай при  $V_0=5$  м/с. После нахождения погрешности была рассчитана скорость ветра с учетом ее погрешности, результаты занесены в таблицу 4.11.

*Таблица 4.11. Значения исходных данных, погрешность и значение скорости ветра с учетом погрешности*

$v_0$ , м/с	$h_0$ , м	Погрешность, м/с	Скорость с учетом погрешности, м/с	Погрешность - $v_0$ , м/с
5	10	0,75	4,25	5,75

Далее восстанавливаем скорость ветра по высотам в случае заниженной и завышенной вследствие погрешности измерения скорости ветра на уровне флюгера по формулам:

$$\text{Заниженная скорость ветра: } V = 4,25 * \left(\frac{h}{h_0}\right)^\alpha$$

$$\text{Завышенная скорость ветра: } V = 5,75 * \left(\frac{h}{h_0}\right)^\alpha$$

$h$  – высота от 10 до 300 метров,

$h_0$  – начальная высота = 10 м,

$\alpha$  – коэффициент = 0,33.

Результаты расчетов представлены в таблице 4.12.

Таблица 4.12. Восстановленная скорость ветра при  $V_0 = 5$  м/с.

h, м	Восстановленная скорость ветра $V_f$ , м/с,		
	Без учета погрешности, м/с	При $V_0 = 4.25$ м/с	При $V_0 = 5.75$ м/с
10	5,00	4,25	5,75
15	5,72	4,86	6,57
20	6,29	5,34	7,23
25	6,77	5,75	7,78
30	7,18	6,11	8,26
35	7,56	6,43	8,69
40	7,90	6,72	9,09
45	8,21	6,98	9,45
50	8,50	7,23	9,78
55	8,78	7,46	10,09
60	9,03	7,68	10,39
65	9,27	7,88	10,66
70	9,50	8,08	10,93
75	9,72	8,26	11,18
80	9,93	8,44	11,42
85	10,13	8,61	11,65
90	10,32	8,78	11,87
95	10,51	8,93	12,09
100	10,69	9,09	12,29
105	10,86	9,23	12,49
110	11,03	9,38	12,69
115	11,19	9,52	12,87
120	11,35	9,65	13,06

h, м	Восстановленная скорость ветра $V_f$ , м/с,		
	Без учета погрешности, м/с	При $V_0 = 4.25$ м/с	При $V_0 = 5.75$ м/с
125	11,51	9,78	13,23
130	11,66	9,91	13,41
135	11,80	10,03	13,57
140	11,95	10,15	13,74
145	12,08	10,27	13,90
150	12,22	10,39	14,05
155	12,35	10,50	14,21
160	12,48	10,61	14,36
165	12,61	10,72	14,50
170	12,74	10,83	14,65
175	12,86	10,93	14,79
180	12,98	11,03	14,92
185	13,10	11,13	15,06
190	13,21	11,23	15,19
195	13,33	11,33	15,32
200	13,44	11,42	15,45
205	13,55	11,52	15,58
210	13,66	11,61	15,70
215	13,76	11,70	15,83
220	13,87	11,79	15,95
225	13,97	11,87	16,07
230	14,07	11,96	16,18
235	14,17	12,05	16,30
240	14,27	12,13	16,41
245	14,37	12,21	16,52
250	14,46	12,29	16,63
255	14,56	12,38	16,74
260	14,65	12,45	16,85
265	14,74	12,53	16,96
270	14,84	12,61	17,06
275	14,93	12,69	17,17
280	15,02	12,76	17,27
285	15,10	12,84	17,37
290	15,19	12,91	17,47
295	15,28	12,98	17,57
300	15,36	13,06	17,67

2 случай при  $V_0=15$  м/с. Прослеживаем изменение начальной скорости ветра 15 м/с до высоты 300 метров, с учетом завышения или занижения скорости ветра при погрешности - таблица 4.13.

Таблица 4.13. Значения исходных данных, погрешность и значение скорости ветра с учетом погрешности

$V_0$	$h_0$	Погрешность, м/с	Скорость с учетом погрешности, м/с	Погрешность - $V_0$ , м/с
15	10	1,25	13,75	16,25

Далее по результатам таблицы 4.13. находим заниженную и завышенную скорости ветра. Для этого используем формулы:

$$\text{Заниженная скорость ветра: } V = 13,75 * \left(\frac{h}{h_0}\right)^\alpha$$

$$\text{Завышенная скорость ветра: } V = 16,25 * \left(\frac{h}{h_0}\right)^\alpha$$

$h$  – высота от 10 до 300 метров,

$h_0$  – начальная высота = 10 м,

$\alpha$  – коэффициент = 0,33.

Результаты расчетов представлены в таблице 4.14.

Таблица 4.14. Восстановленная скорость ветра при  $V_0 = 15$  м/с.

h, м	Восстановленная скорость ветра $V_f$ , м/с,		
	Без учета погрешности, м/с	При $V_0 = 13,75$ м/с	При $V_0 = 16,25$ м/с
10	15,00	13,75	16,25
15	17,15	15,72	18,58
20	18,86	17,28	20,43
25	20,30	18,60	21,99
30	21,55	19,76	23,35
35	22,68	20,79	24,57
40	23,70	21,73	25,68
45	24,64	22,59	26,69
50	25,51	23,39	27,64
55	26,33	24,13	28,52
60	27,09	24,84	29,35
65	27,82	25,50	30,14
70	28,51	26,13	30,88
75	29,16	26,73	31,60
80	29,79	27,31	32,28
85	30,39	27,86	32,93
90	30,97	28,39	33,55
95	31,53	28,90	34,16

h, м	Восстановленная скорость ветра $V_f$ , м/с,		
	Без учета погрешности, м/с	При $V_0 = 13,75$ м/с	При $V_0 = 16,25$ м/с
100	32,07	29,40	34,74
105	32,59	29,87	35,31
110	33,09	30,34	35,85
115	33,58	30,78	36,38
120	34,06	31,22	36,90
125	34,52	31,64	37,40
130	34,97	32,06	37,88
135	35,41	32,46	38,36
140	35,84	32,85	38,82
145	36,25	33,23	39,27
150	36,66	33,61	39,72
155	37,06	33,97	40,15
160	37,45	34,33	40,57
165	37,83	34,68	40,98
170	38,21	35,02	41,39
175	38,57	35,36	41,79
180	38,93	35,69	42,18
185	39,29	36,01	42,56
190	39,64	36,33	42,94
195	39,98	36,64	43,31
200	40,31	36,95	43,67
205	40,64	37,25	44,03
210	40,97	37,55	44,38
215	41,29	37,84	44,73
220	41,60	38,13	45,07
225	41,91	38,42	45,40
230	42,21	38,70	45,73
235	42,52	38,97	46,06
240	42,81	39,24	46,38
245	43,10	39,51	46,70
250	43,39	39,78	47,01
255	43,68	40,04	47,32
260	43,96	40,29	47,62
265	44,23	40,55	47,92
270	44,51	40,80	48,22
275	44,78	41,05	48,51
280	45,05	41,29	48,80
285	45,31	41,53	49,09
290	45,57	41,77	49,37
295	45,83	42,01	49,65

h, м	Восстановленная скорость ветра $V_f$ , м/с,		
	Без учета погрешности, м/с	При $V_0 = 13,75$ м/с	При $V_0 = 16,25$ м/с
300	46,08	42,24	49,92

Результаты таблиц 4.12. и 4.14. были нанесены на рисунок 4.5.

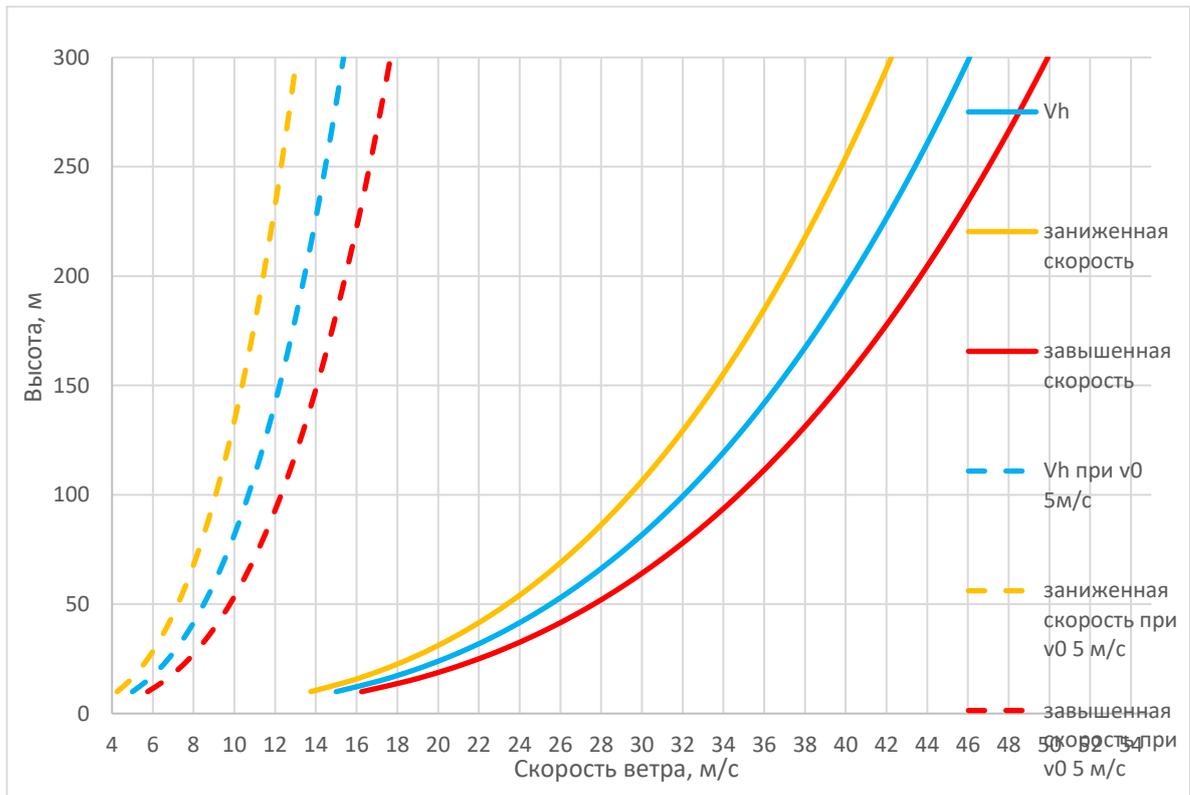


Рисунок 4.5. Изменение скоростей ветра по высотам по степенному закону

Таким образом, в обоих случаях ( $V_0 = 5$  м/с и  $15$  м/с) с увеличением высоты монотонно возрастает возможная неопределенность восстановленной скорости ветра. В первом случае на высоте  $50$  м при приземной скорости ветра  $8,5$  м/с возможная погрешность составит  $1,27$  м/с. А уже на высоте  $300$  м при приземной скорости ветра  $15,36$  м/с погрешность составляет  $2,3$  м/с. Во втором случае на  $50$  м приземная скорость ветра равна  $25,51$  м/с возможная погрешность составляет  $2,13$  м/с, на высоте  $300$  м приземная скорость ветра  $46,08$  м/с возможная погрешность  $3,84$  м/с. Чем больше скорость ветра у Земли, тем больше увеличивается возможная погрешность с высотой.

## Заключение

Несомненно, спрогнозированный с погрешностью ветер является опасным погодным явлением, он предоставляет угрозу для многих сфер человеческой деятельности.

1. В данной работе были рассмотрены методы измерения и прогнозирования скорости ветра.
2. Рассмотрены виды современных анемометров, так же проанализированы факторы, влияющие на их инерционность.
3. Проведен эксперимент по измерению пути синхронизации индукционного анемометра переменного тока, по завершению которого можно отметить, что, при увеличении скорости ветра, уменьшается путь синхронизации. Рассчитана инерционная погрешность индукционного анемометра и задержка в снятии его показаний при различной скорости ветра. Показано, что время до снятия показаний при скорости ветра 2 м/с может составить одну минуту.
4. Исследовано влияние погрешности измерения скорости ветра на точность его прогноза по разным методикам.
  - 4.1. При определении скорости бокового ветра по номограмме в разделе погрешность, при разных скоростях ветра относительно ВПП может составить от 1 м/с до 2 м/с.
  - 4.2. При определении возможности шквала по методике Б.Е. Пескова и А.И. Ситникова, представленном в разделе 4.1. погрешность может составить от 1,5 м/с до 4,5 м/с. При определении максимальной скорости ветра при шквале по методике Б.Е. Пескова и А.И. Ситникова погрешность измерений может составить от 1 м/с до 4,5 м/с.
5. Исследовано влияние погрешности наземного измерения скорости ветра на точность его восстановления с помощью степенного

закона. Показано, что при скорости ветра на уровне флюгера 5 м/с погрешность восстановления на высоте 300 м может достигнуть значения 2,3 м/с. При скорости ветра на уровне флюгера 15 м/с погрешность восстановления на высоте 300 м может достигнуть значения 3,8 м/с.

## Литература

1. Абрамович К. Г., Васильев А. А., Булдовский Г. С. Борисова В. В., Глазунов В. Г., Горлах И. А., Лешкевич Т. В., Ляхов А. А., Рацимор М. Я., Решетов Г. Д., Рубинштейн М. В., Шакина Н. П. Руководство по прогнозированию метеорологических условий для авиации. Госкомгидромет, Москва 1985 - 308 с.
2. Богаткин О. Г. Авиационная метеорология. Учебник. – СПб: РГГМУ 2005 – 328 с.
3. Богаткин О. Г. Основы авиационной метеорологии. Учебник. – СПб: изд. РГГМУ, 2009 – 339 с.
4. Богаткин О. Г. Информационно – справочная книга авиационного метеоролога. Книга 1. Учебник. – СПб, 2010 – 194 с.
5. Воробьев В. И. Синоптическая метеорология. Учебник/ В. И. Воробьев – Л.: Гидрометеиздат 1991 – 616 с.
6. Григоров Н.О; А.Г. Саенко, К.Л. Восканян. Методы и средства гидрометеорологических измерений. Метеорологические приборы. Учебник. – СПб: изд. РГГМУ, 2012 – 306 с.
7. Зверев А.С. Синоптическая метеорология. Учебник/ А. С. Зверев. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Гидрометеиздат 1968 - 776 с.
8. Калашников В.И. Определение параметров ветра. Научная статья – 7 с.
9. Переведенцев Ю.П; Мохов И.И; Елисеев Теория общей циркуляции атмосферы. Изд. Казанский университет 2013 – 224.
10. Хохлов А.В. Определение климатических характеристик скорости ветра на высотах до 600 – 650 метров по приземным измерениям. Труды ВНИИГМИ – МЦД, выпуск 185.
11. Анемометр [Электронный ресурс] URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BD%D0%B5%D0%BC%D0%BE%D0%BC%D0%B5%D1%82%D1%80> (дата обращения 17.05.2023)
12. Ветер [Электронный ресурс] URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Ветер> (дата обращения 13.04.2023)
13. Причины возникновения ветра и его элементы [Электронный ресурс] URL: <https://crewtraffic.com/posts/149may.html> (дата обращения 24.03.2023)
14. Ветер на картах погоды [Электронный ресурс] URL: <https://flot.com/publications/books/shelf/vasiliev/8.htm?print=Y> (дата обращения 16.05.2023)
15. Измерение приземного ветра [Электронный ресурс] URL: [https://library.wmo.int/doc\\_num.php?explnum\\_id=3724](https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=3724) (дата обращения 12.05.2023)