

*Sergin V.Ya., Sergin S.Ya.* Sistemniy analiz problemi bolshix kolebaniy klimata i oledneniya Zemli [Systematic analysis of the problem of large climate fluctuations and glaciation of the Earth]. – L.: Gidrometeoizdat, 1978. – 280 p. (in Russian)

*Yasamanov N.A.* Drevniye klimati Zemli [Ancient climates of the Earth]. – L.: Gidrometeoizdat, 1985. – 295 p. (in Russian)

*Electronic resources:*

*Pronin Ye.N.* Paradoksi borbi za chistiy vozdux [The paradoxes of the struggle for clean air]. 15.06.2014 g. <https://gazpronin.ru/GazPronin2013.shtml> (in Russian)

Mirovoye proizvodstvo stali v 2018 godu uvelichilos na 4,6% [Global steel production in 2018 increased by 4.6%]. 25.01.2019 g. <https://metallurgprom.org/main/19-mirovoe-proizvodstvo-syroj-stali-v-2018-godu-uvelichilos-na-46.html> (in Russian)

WSA: mirovoye proizvodstvo chuguna za 2018 god viroslo na 5,5% [global pig iron production grew by 5.5%]. 08.02.2019. <https://www.metalbulletin.ru/news/black/10143489/> (in Russian)

УДК 551.510.42

## РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ВЕТРА

В.С. НИКИТИНА<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Российский государственный гидрометеорологический университет, victoriaflint01@gmail.com

**Аннотация:** В работе приводится методика расчета инерционных погрешностей ротоанемометров. Показано, что ротоанемометры завышают среднюю скорость ветра, причем это завышение зависит как от конструкции анемометра, так и от параметров ветра. Расчеты показывают, что ошибка в измерении средней скорости ветра может составлять несколько метров в секунду и должна учитываться при измерениях. По разработанной методике проведено исследование инерционных погрешностей ротоанемометров, установленных на морских буйковых станциях и даны рекомендации по увеличению точности данных приборов.

**Ключевые слова:** анемометры, инерционная погрешность, скорость ветра, буйковые метеорологические станции.

**Введение.** Роторные (чашечные) анемометры являются одними из самых распространённых приборов для измерения скорости ветра. Принцип их действия основан на преобразовании средней скорости ветра в угловую скорость вращения вертушки прибора. Однако, известно, что ротоанемометры завышают истинную среднюю скорость ветра и это превышение носит название инерционной погрешности ротоанемометров [Григоров и др., 2012]. До сих пор в литературе отсутствуют исследования этих погрешностей и рекомендации по их уменьшению. В данной работе предложена методика расчёта инерционных погрешностей ротоанемометров, в основе которой лежат известные законы аэродинамики. Представлено также исследование инерционных погрешностей ротоанемометров, установленных на морских буйковых метеостанциях, проведённое по разработанной методике, и даны рекомендации по автоматизации процесса измерения и усовершенствованию конструкции прибора с целью уменьшения погрешностей.

Данное исследование представляет актуальность возможностью использования полученных результатов для совершенствования конструкции прибора и для автоматизации процесса измерения скорости ветра с учётом погрешностей измерения.

В работе ставится **цель** – рассчитать величины погрешностей вертушки ротоанемометра в зависимости от конструктивных особенностей прибора и параметров скорости ветра.

В данной работе **объектом исследования** выступают ротоанемометры – приборы для измерения скорости ветра. **Предметом исследования** является инерционная погрешность приборов при флуктуациях средней скорости ветра.

**Методика исследования.** Для удобства расчётов инерционной погрешности ротоанемометров флуктуации скорости ветра были приняты прямоугольными. На рис. 1  $V_1$  и  $V_2$  представляют собой крайние значения прямоугольных флуктуаций скорости ветра от меньшего к большему соответственно. Осреднение этих значений ведёт к завышению показаний анемометра  $V_a$  относительно истинной средней скорости ветра  $\bar{V}$ . Разность между показаниями ротоанемометра и истинной средней скоростью ветра в момент измерения принято называть инерционной погрешностью прибора.

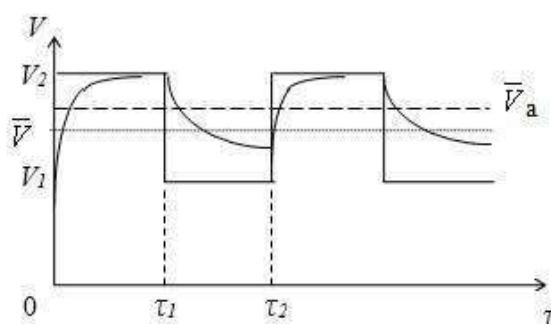


Рис. 1. Восприятие вертушкой прямоугольных флуктуаций скорости ветра

Fig. 1. Device's perception of rectangular fluctuations in wind speed

Расчёты внутри каждого интервала производились по формуле [Григоров и др., 2012]:

$$V = V_{уст} + (V_0 - V_{уст}) \cdot e^{-\frac{V_{уст} \cdot \tau}{L}}, \quad (1)$$

где

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

$V$  – текущие показания анемометра (внутри интервала);

$V_0$  – начальная скорость ветра для каждого интервала;

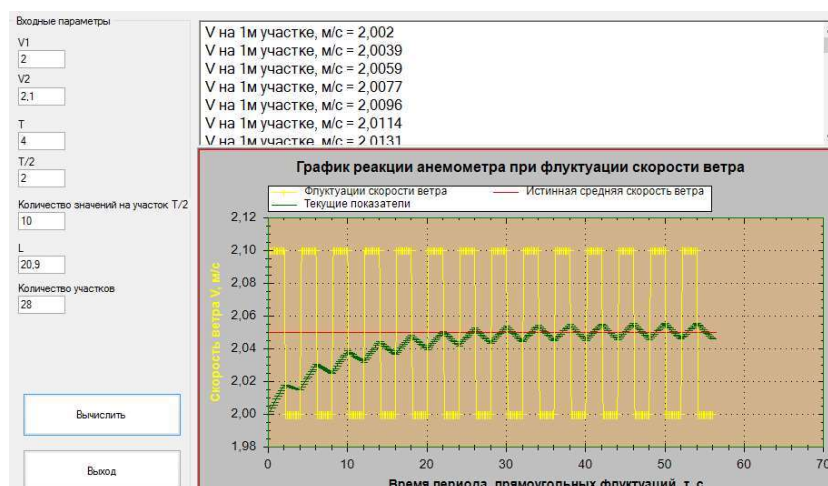
$L$  – путь синхронизации анемометра – величина, представляющая собой путь, проходимый воздушным потоком за время, в течение которого разность между угловой скоростью вращения вертушки и установившейся угловой скоростью уменьшается в  $e$  раз. Данная величина зависит от конструкции прибора и связана с ней следующим соотношением:  $L = (n \cdot m \cdot R) / (k \cdot \sigma)$  (здесь  $n$  – количество чашек,  $m$  – масса одной чашки,  $R$  – радиус вертушки,  $k$  и  $\sigma$  – постоянные константы);

$\tau$  – время.

С целью оптимизации расчётов использовалась написанная автором на языке программирования C# программа для ЭВМ (рис. 2).

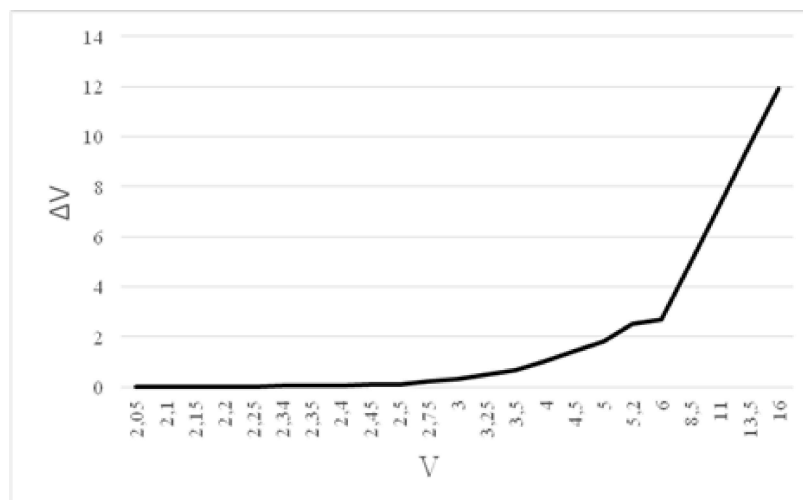
**Основные результаты.** В результате расчётов были установлены и проанализированы следующие зависимости.

1. С увеличением скорости ветра инерционная погрешность ротоанемометра увеличивается (рис. 3). Следует отметить, что при средней скорости ветра менее 3 м/с данное превышение незначительно и им можно пренебречь. Однако, при скоростях ветра более 3 м/с это превышение становится значительным (может достигать нескольких метров в секунду) и требует обязательного учёта [Григоров, Никитина, 2018].



**Рис. 2. Рабочее окно рассчитывающей программы**

**Fig. 2. Working window of the calculating program**



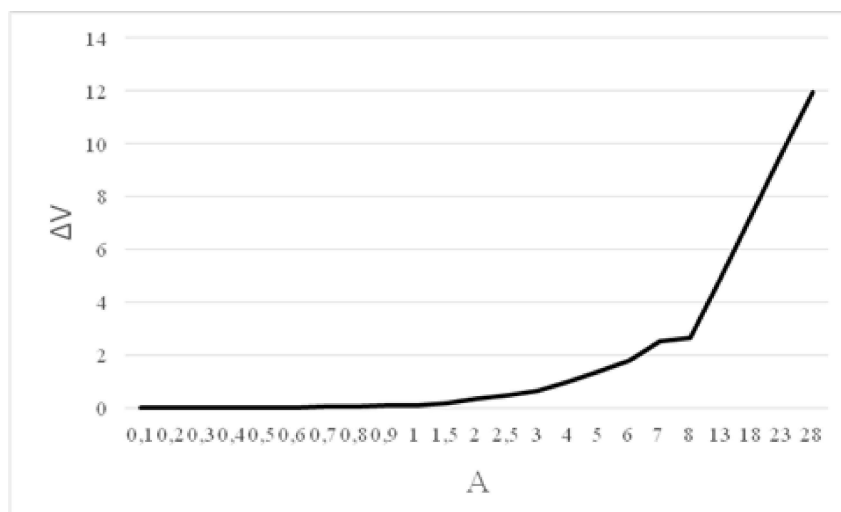
**Рис. 3. Инерционная погрешность ротоанемометра как функция средней скорости ветра**

**Fig. 3. Inertia error of windmill anemometer as a function of average wind speed**

2. При увеличении амплитуды флуктуаций скорости ветра инерционная погрешность ротоанемометра увеличивается (рис. 4). Иными словами, чем больше флуктуации, тем сильнее анемометр завышает скорость ветра. Если при амплитуде ниже 1,5 м/с это превышение можно не учитывать, то при амплитуде более 2,5 м/с оно становится достаточно значительным (около 2 м/с при амплитуде флуктуаций 7 м/с) [Григоров, Никитина, 2018].

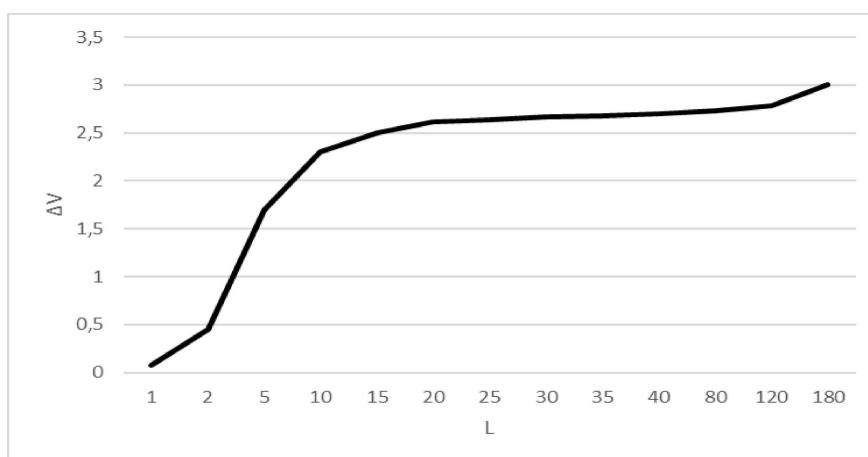
3. С увеличением пути синхронизации инерционная погрешность ротоанемометра увеличивается, и время достижения стабильных показаний также увеличивается (рис. 5 и б). Данная зависимость представляет особый интерес, поскольку по ней можно судить о желательном изменении конструкции самого прибора. Поскольку погрешность возрастает при возрастании пути синхронизации, то можно сделать вывод о том, что малоинерционный анемометр должен иметь малый путь синхронизации, для достижения

чего целесообразно уменьшать радиус вертушки, массу и количество чашек [Григоров, Никитина, 2018].



**Рис. 4. Инерционная погрешность ротоанемометра как функция амплитуды флуктуаций скорости ветра**

**Fig. 4. Inertia error of windmill anemometer as a function of wind speed fluctuations amplitude**



**Рис. 5. Инерционная погрешность ротоанемометра как функция пути синхронизации**

**Fig. 5. Inertia error of windmill anemometer as a function of constant distance**

4. Время достижения стабильных показаний уменьшается при увеличении скорости ветра (рис. 7). Можно сказать, что чем больше скорость ветра, тем быстрее она воспринимается анемометром [Григоров, Никитина, 2018].

5. Период флуктуаций также влияет и на инерционную погрешность, и на время достижения анемометром стабильных показаний (рис. 8 и 9). При удлинении периода флуктуаций время достижения стабильных показаний увеличивается, инерционная погрешность тоже возрастает [Григоров, Никитина, 2018].

6. Амплитуда флуктуаций оказывает влияние на время достижения анемометром стабильных показаний (рис. 10). 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 [Григоров, Никитина, 2018].

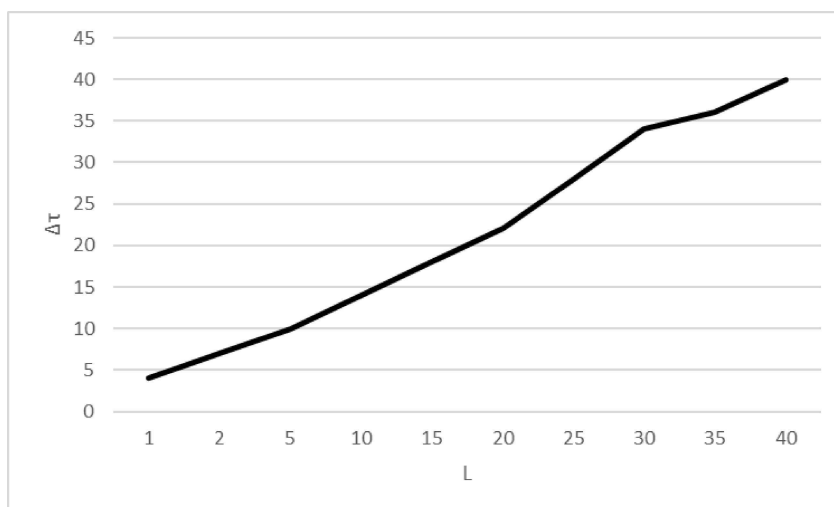


Рис. 6. Время достижения ротоанемометром стабильных показаний как функция пути синхронизации

Fig. 6. Time for windmill anemometer to reach stable readings as a function of constant distance

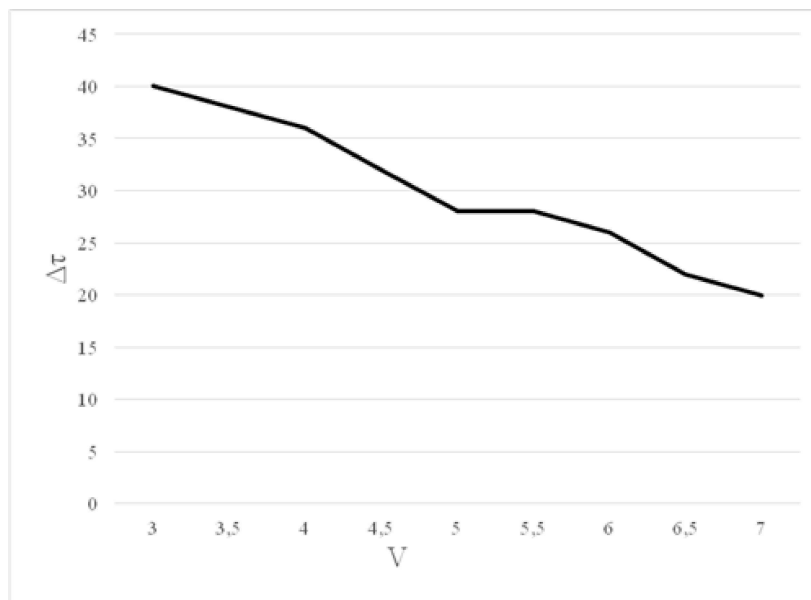


Рис. 7. Время достижения ротоанемометром стабильных показаний как функция скорости ветра

Fig. 7. Time for windmill anemometer to reach stable readings as a function of wind speed

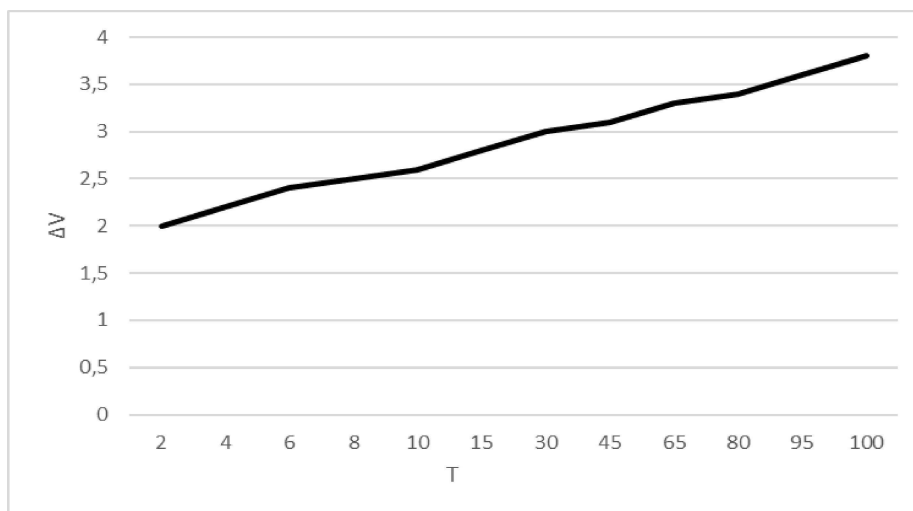


Рис. 8. Инерционная погрешность ротоанемометра как функция периода флуктуаций скорости ветра

Fig. 8. Inertia error of windmill anemometer as a function of wind speed fluctuation period

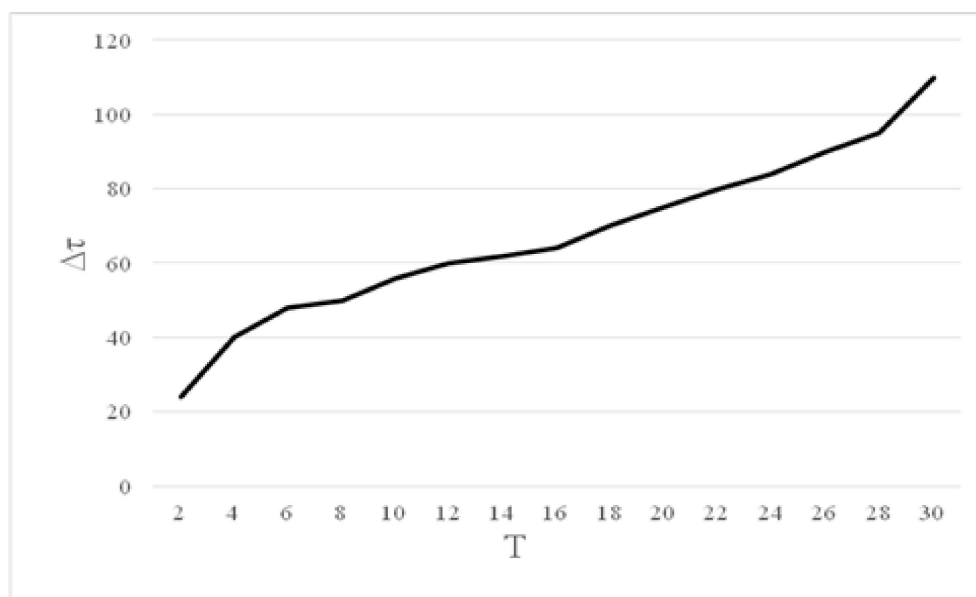
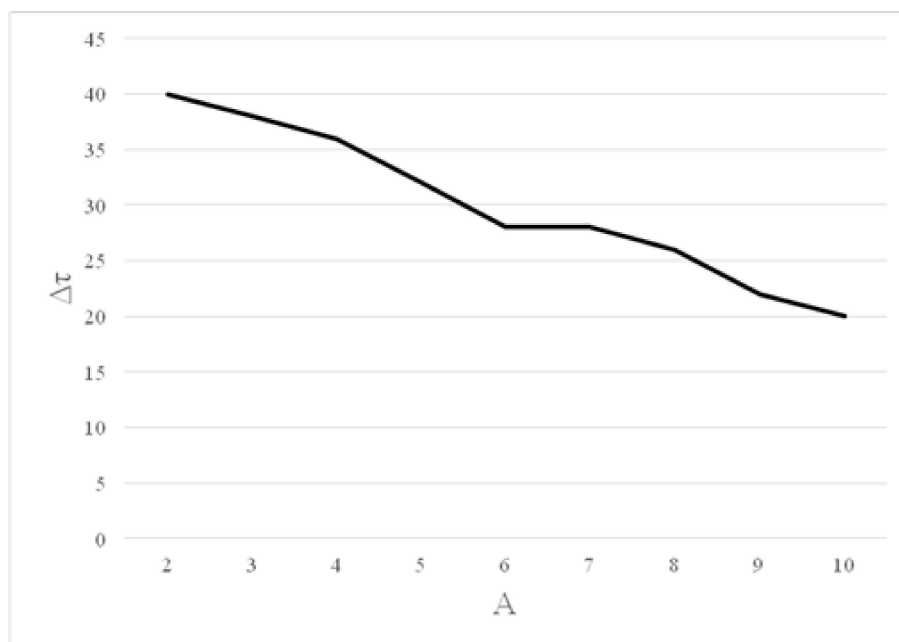


Рис. 9. Время достижения ротоанемометром стабильных показаний как функция периода флуктуаций скорости ветра

Fig. 9. Time for windmill anemometer to reach stable readings as a function of wind speed fluctuation period

7. Также было установлено, что при возрастании показаний анемометра от нижнего предела или при убывании их от верхнего предела инерционная погрешность остаётся постоянной. Но при убывании показаний время их стабилизации уменьшается. Это говорит о том, что при флуктуациях скорости ветра от больших значений к меньшим прибор быстрее воспринимает происходящие изменения, чем при обратной ситуации [Григоров, Никитина, 2018].



**Рис. 10. Время достижения ротоанемометром стабильных показаний как функция амплитуды флуктуаций скорости ветра**

**Fig. 10. Time for windmill anemometer to reach stable readings as a function of wind speed fluctuation amplitude**

**Прикладное применение результатов.** Методика, разработанная в настоящей работе, была использована для исследования инерционных погрешностей ротоанемометров, установленных на морских буйковых метеорологических станциях. Получение точных данных о значениях скорости ветра над поверхностью моря является важной задачей, поскольку от этого зависит безопасность передвижения морских судов, функционирование морских нефтяных платформ и т.д. Буйковые метеорологические станции являются автоматическими и устанавливаются в океане в труднодоступных местах; они представляют собой один или несколько буйев с автоматическими метеодатчиками [Восканян и др., 2016]. Морской буй подвержен влиянию волнения моря, поэтому установленный на нём датчик скорости ветра (ротоанемометр) совершает колебания в направлении скорости ветра. Следовательно, средняя скорость ветра будет определяться с ошибкой, равной инерционной погрешности прибора.

Расчёт инерционных погрешностей ротоанемометров, установленных на морском буйе производился при разных значениях скорости ветра, высоты датчика, частот и углов раскачки буйа. Для проведения расчёта были взяты значения высот датчика над уровнем моря  $H_1 = 2,9$  м,  $H_2 = 3,5$  м [Капустин, Сторожук, 2005]. 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:

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

где  $l$  – длина дуги, на которую опирается угол  $\alpha$ ;  $f$  – частота колебаний (Гц).

Длина дуги определяется по формуле:

$$l = \alpha H, \quad (3)$$

где  $\alpha$  – угол раскачки буя в радианах.

Для характерных значений величин  $f$ ,  $T$  и  $\alpha$ , рассчитывались скорости движения датчика при разных значениях  $\alpha$  и  $f$  для двух значений высоты датчика и по результатам были построены графики зависимости  $V(\alpha)$  для трёх крайних значений частот  $f_1=0,011$  Гц,  $f_2=0,5$  Гц,  $f_3=1,25$  Гц [Буйковые ..., 2021]. Далее на основании полученных данных по формуле (1) рассчитывались погрешности.

| T, с   | $\alpha$ , ° | Скорость движения датчика, м/с | Скорость ветра, м/с | Погрешность, м/с |          |
|--------|--------------|--------------------------------|---------------------|------------------|----------|
| 2      | 40°          | ±2 м/с                         | 5 м/с               | 1,45 м/с         |          |
|        |              |                                | 10 м/с              | 0 м/с            |          |
|        |              |                                | 20 м/с              | 0 м/с            |          |
|        | 60°          | ±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           | ±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°                            | ±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°    |              | ±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    |

Рис. 11. Фрагмент таблицы результатов расчёта погрешностей ротоанемометра

Fig. 11. A part of the table for results of windmill anemometer error calculations

**Выводы.** Анализ результатов показывает, что величина инерционной погрешности становится значительной при малых скоростях ветра. Это следует из того, что в этом случае скорость раскачки буя сопоставима со скоростью ветра, а иногда может даже превышать её. При большой скорости ветра влияние скорости раскачки снижается, и инерционная погрешность стремится к нулю. Также можно сделать вывод о том, что при одинаковых условиях инерционная погрешность возрастает с увеличением высоты датчика. Это объясняется тем, что при увеличении высоты датчика увеличивается линейная скорость движения датчика. Учитывая это, можно порекомендовать уменьшать высоту датчика для получения более точных данных. Результаты проделанной работы могут быть использованы для автоматической обработки результатов измерений. Известно, что океанографические буи оснащены датчиком частоты и угла раскачки [Ковчин, Степанюк, 2002]. Знание этих величин позволит применить разработанную

методику при определении истинной средней скорости ветра, заложив её в программу обработки измерений.

**Благодарности.** Автор выражает глубокую благодарность доценту Николаю Олеговичу Григорову за оказанную помощь в проведении данного исследования и публикации результатов.

## ЛИТЕРАТУРА

Восканян К.Л., Кузнецов А.Д., Сероухова О.С. Автоматические метеорологические станции. Часть I. Тактико-технические характеристики. – С-Пб.: РГГМУ, 2016. – 165 с.

Григоров Н.О., Никитина В.С. Инерционные погрешности ротоанемометров / Труды II Всероссийской конференции «Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития» имени Л. Н. Карлина. 19-20 декабря 2018 г. Санкт-Петербург, 2018. – С. 204-205.

Григоров Н.О., Саенко А.Г., Восканян К.Л. Методы и средства гидрометеорологических измерений. Метеорологические приборы. – С-Пб.: РГГМУ, 2012. – 306 с.

Капустин А.В., Сторожук Н.Л. Технические средства гидрометеорологической службы. – С-Пб., 2005. – 283 с.

Ковчин И.С., Степанюк И.А. Методы специальных океанологических измерений. – С-Пб., 2002. – 263 с.

*Электронный ресурс:*

Буйковые метеорологические станции URL: [www.pmel.noaa.gov](http://www.pmel.noaa.gov). (дата обращения 23.09.2021).

## ШАМОЛ ТЕЗЛИГИНИ ЎЛЧАШ АНИҚЛИГИНИ БАҲОЛАШ УСУЛИНИ ИШЛАБ ЧИҚИШ ВА ҚЎЛЛАШ

В.С. НИКИТИНА<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Россия давлат гидрометеорология университети, victoriaflint01@gmail.com

**Аннотация:** Мақолада ротоанемометрларнинг инерцион хатолигини ҳисоблаш усули баён қилинган. Ротоанемометрлар шамол ўртача тезлиги қийматини ошириб ўлчаши, тезлик қийматининг оширилиши анемометрнинг тузилиши ҳамда шамол параметрларига боғлиқ эканлиги кўрсатиб берилган. Ҳисоблашларга мувофиқ, шамол ўртача тезлигини ўлчаш хатолиги секундига бир неча метрни ташиқил этиши мумкин ва бу хатолик ўлчашларни амалга оширишда эътиборга олиниши керак. Ишлаб чиқилган усул асосида денгиз буй метеорологик станцияларидаги ротоанемометрларнинг инерцион хатолиги тадқиқ этилган ва асбобларнинг ўлчаш аниқлигини ошириш бўйича тавсиялар берилган.

**Калит сўзлар:** анемометрлар, инерцион хатолик, шамол тезлиги, буй метеорологик станциялари.

## DEVELOPMENT AND APPLICATION OF THE METHOD FOR ASSESSING THE ACCURACY OF MEASURING THE WIND SPEED

V.S. NIKITINA<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Russian State Hydrometeorological University, victoriaflint01@gmail.com

**Abstract:** The method of anemometer inertia errors calculations is described in this work. It's shown that windmill anemometer overread average wind speed, and this overreading depends both of anemometer construction and wind speed. The calculations show that this error can be as high as some meters a second, so it must be taken into account during measurements. The investigation of inertia errors for buoy sea stations according written method is done and the recommendations to rise accuracy for anemometers are given.