

МАТЕРИАЛЫ XIII МЕЖДУНАРОДНОЙ СТУДЕНЧЕСКОЙ НАУЧНОЙ  
КОНФЕРЕНЦИИ «СТУДЕНЧЕСКИЙ НАУЧНЫЙ ФОРУМ 2021»

## ВОЗМОЖНОСТИ УЧЁТА ПОГРЕШНОСТЕЙ РОТОАНЕМОМЕТРОВ, УСТАНОВЛЕННЫХ НА МОРСКИХ БУЙКОВЫХ СТАНЦИЯХ

Восканян К.Л., Григоров Н.О., Никитина В.С.

ФГБОУ ВО Российский государственный гидрометеорологический университет (РГГМУ),  
Санкт-Петербург, e-mail: kvosia@mail.ru, grigorov46@mail.ru, victoriaflint01@gmail.com

В работе приводится расчёт инерционных погрешностей ротоанемометров, установленных на морских буйковых метеорологических станциях в зависимости от параметров ветра и технических параметров самого прибора. Показано, что при колебаниях анемометра на морских волнах измеренная величина превышает истинную среднюю скорость ветра. На основе ранее опубликованной методики разработан способ учета инерционной погрешности анемометров при колебаниях станции на волнах в море. Рассчитана погрешность анемометра при разных параметрах – скорости ветра, частоты и амплитуды колебания, а также высоты установки анемометра. Показано, что при большой скорости ветра инерционная погрешность пренебрежимо мала, а при малой скорости ветра её необходимо учитывать. При частоте колебания меньше 0,1 Гц инерционную погрешность можно не учитывать, а при частотах 0,5 Гц и выше она становится значительной. Установлено, что при прочих равных условиях инерционная погрешность возрастает с увеличением высоты датчика. Результаты могут быть использованы при автоматической обработке данных измерений скорости ветра на буйковых метеостанциях. Особенно актуальными результаты работы являются для Санкт-Петербурга – крупного морского порта и транспортного узла.

**Ключевые слова:** буйковые метеостанции, скорость ветра, ротоанемометры, погрешности, инерция, автоматическая обработка

## POSSIBILITIES TO TAKE INTO ACCOUNT SOURCES OF ERRORS FOR WINDMILL ANEMOMETERS STAYED AT SEA STATIONS

Voskanyan K.L., Grigorov N.O., Nikitina V.S.

Russian State Hydrometeorological University (RSHU), Saint-Petersburg,  
e-mail: kvosia@mail.ru, grigorov46@mail.ru, victoriaflint01@gmail.com

Calculations of inertia errors of windmill anemometers, placed at buoy meteorological stations are given in this work. It is shown, that during anemometer oscillations on sea waves measured wind speed is more than natural wind speed. Basing on works, published before, the authors suggest method to take into account inertia errors of anemometer during oscillations on sea waves. Inertia errors are calculated versus some parameters – wind speed, frequency and amplitude of oscillations, and altitude of anemometer above sea level. If wind speed is high, inertia error is negligible, but if wind speed's low it must be taken into account. If frequency is less than 0,1 Hz inertia error is negligible, if frequency is more than 0,5 Hz inertia error must be taken into account. Inertia error rises if anemometer altitude rises. The results can be used in automatic calculations of measure results. These results are particularly actual for Saint-Petersburg – large harbour, transport and trade centre.

**Keywords:** buoy meteorological stations, errors, inertia, wind speed, windmill anemometers, automatic calculations

Погода и её прогноз, в частности знание скорости ветра, над морскими акваториями приобретает особое значение для крупных транспортных узлов, в которых водный транспорт занимает не последнее место: приходят круизные лайнеры, паромы, сухогрузы; транзитом проходят целые караваны судов. Чем точнее будут проведены измерения скорости ветра и оперативно обработаны данные, тем точнее будет составлен прогноз. В свою очередь, своевременный и точный прогноз угрозы возникновения сгонно-нагонных явлений, приводящих к наводнениям, позволяет сократить простой судов, минимизировать финансовые потери и возможные риски, возникающие при приостановке навигации. Таким образом, качество и своевременность прогноза напрямую зависит от точности измерений и результатов обработки полученных данных. Кроме того, следует учесть, что потре-

бителями метеорологической информации о скорости ветра являются и другие субъекты хозяйственной деятельности: строительные и спортивные объекты, отрасли дорожного, железнодорожного, водного и воздушного сообщения и другие [1, 2, 3].

Получить точные, репрезентативные данные о погодных условиях над морской поверхностью достаточно сложно. Ликвидировать пробелы в поступающей метеорологической информации может использование буйковых автоматических метеорологических станций, оборудованных необходимым комплектом датчиков. Такие станции устанавливаются непосредственно на водной поверхности в местах, где сложно получить информацию непосредственно контактными измерениями. Станции фиксируются с помощью специальных якорей и оснащаются блоком долговременного электропитания [4, 5, 6]. В то же время

известно, что датчики скорости ветра (ротоанемометры), установленные на морских буйковых метеорологических станциях, обладают определёнными погрешностями, среди которых одна из основных – инерционная погрешность (завышение значения средней скорости ветра, измеряемой прибором, при колебании его под действием волнения поверхности моря) [7].

**Цель исследования** выявление и учёт инерционной погрешности ротоанемометров в зависимости от конструкции измерителя скорости ветра, буйковой станции, а также от параметров ветра, частоты и амплитуды волнения поверхности моря.

Для достижения поставленной цели необходимо решить ряд задач:

Провести расчёт инерционной погрешности ротоанемометров, установленных на морских буйковых метеорологических станциях, в зависимости от параметров ветра при определённых значениях высоты установки датчика;

Рассчитать инерционную погрешность ротоанемометров, установленных на морских буйковых метеорологических станциях, в зависимости от частоты и амплитуды волнения водной поверхности при заданных значениях скорости ветра и высоты установки датчика;

Подготовить рекомендации для автоматической компьютерной обработки результатов измерений скорости ветра с учётом инерционной погрешности.

#### Материалы и методы исследования

При проведении исследования использован математический аппарат с составлением программы для персонального компьютера.

#### Результаты исследования и их обсуждение

Буйковые автоматические метеорологические станции (АМС) представляют собой один или несколько буюв с автоматическими метеорологическими датчиками для измерения скорости и направления ветра, температуры и влажности воздуха, атмосферного давления, количества осадков и облачности. Такие станции также измеряют характеристики водной среды – скорость течения, солёность, мутность и т.д. Очевидно, что буйковые АМС не дают полных сведений о погоде, а передают только информацию о состоянии атмосферы вблизи водной поверхности. Однако, эти станции очень важны, поскольку данные, полученные с них, позволяют заполнить пробелы в информации, приходящей с остальных средств наблюдений в море. [4, 5, 6].

Как видно из рис. 1, датчик скорости ветра устанавливается на некоторой высоте над поверхностью моря для того, чтобы исключить забрызгивание насколько это возможно. Однако, морской буй подвержен влиянию волнения моря. Легко понять, что датчик при этом совершает колебания в направлении скорости ветра. Таким образом, при движении датчика в направлении скорости ветра он регистрирует заниженную скорость, а при движении в направлении против скорости ветра – завышенную скорость. Следовательно, средняя скорость ветра будет определена с ошибкой, которую можно рассчитать, используя методику, разработанную и развитую в работе [8].



Рис. 1. Буйковая метеорологическая станция PIRATA (США, Франция, Бразилия)

Для проведения расчёта необходимо знать несколько величин – высоту датчика над уровнем моря, угловую амплитуду и частоту колебаний датчика. На рис. 2 представлено схематичное изображение колебания датчика под действием морских волн.

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:

$$V = \frac{2l}{T} = 2lf, \quad (1)$$

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

$f$  – частота колебаний (Гц).

Длину дуги определим по формуле:

$$l = \alpha H, \quad (2)$$

где  $\alpha$  – угол в радианах.

Согласно теоретическим сведениям, частотный диапазон морских волн может варьироваться от 0,07 до 8 рад/с, т.е. от 0,011 до 1,25 Гц. Соответственно период колебаний буя составляет от 0,5 до 10 с. Углы отклонения, согласно [9], могут изменяться в пределах от 40° до 68°, т.е. от 0,7 до 1,2 рад.

При установке датчика параметров ветра на буйковую автоматическую метеорологическую станцию используются две стандартные высоты  $H_1 = 2,9$  м,  $H_2 = 3,5$  м. Значения высоты установки датчика  $H$  приводятся в [10]. Эти значения и были использованы при расчётах погрешностей.

В первую очередь необходимо рассчитать скорость движения датчика при разных значениях  $\alpha$  и  $f$  для двух значений высоты датчика. Расчёты выполнялись по формуле (1) с учётом (2). Далее на основании полученных данных рассчитывались погрешности.

Для удобства расчётов флуктуации ветра были приняты прямоугольными. Расчёты производились по формуле (3) [7, 8]:

$$V = V_{\text{уст}} + (V_0 - V_{\text{уст}}) e^{-\frac{V_{\text{уст}} * \tau}{L}}. \quad (3)$$

По методике, развитой в работе [8], определялась инерционная погрешность при заданных значениях скорости ветра, периода и амплитуды флуктуаций скорости ветра, пути синхронизации анемометра, который, как известно [7], характеризует инерцию анемометра и зависит от массы и радиуса чашек вертушки.

По результатам расчетов были построены графики зависимостей  $V(\alpha)$  для трёх крайних значений частот  $f_1 = 0,011$  Гц,  $f_2 = 0,5$  Гц,  $f_3 = 1,25$  Гц [4]. Расчёты были выполнены для стандартных высот  $H_1 = 2,9$  м,  $H_2 = 3,5$  м. Результаты выполненной серии расчетов представлены на рис. 3 и 4.

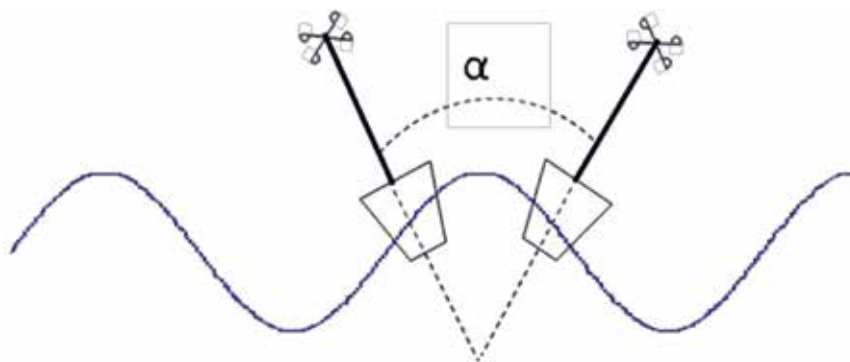


Рис. 2. Схематическое изображение колебаний датчика параметров ветра под действием волнения моря

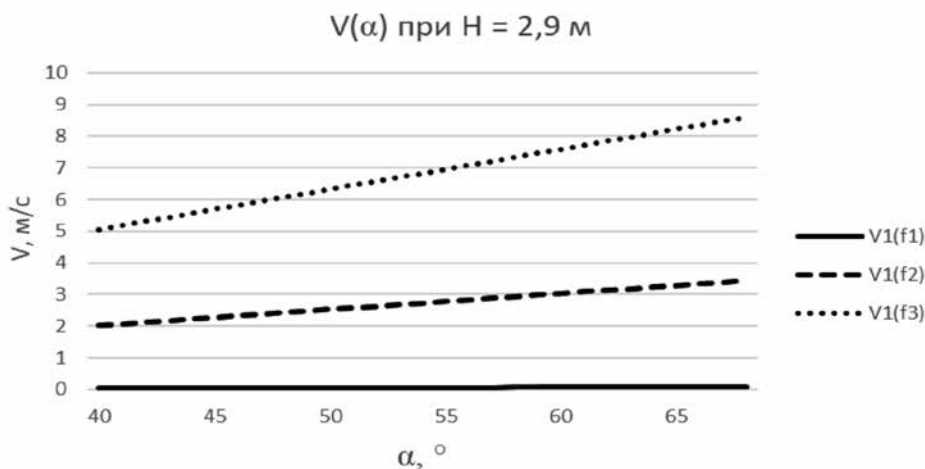


Рис. 3. График зависимости скорости движения датчика при разных значениях частот и углов раскачки буйковой станции

Прежде всего стоит отметить, что в случае  $f_1 = 0,011$  Гц (сплошная кривая на рис. 3 и 4) скорости движения датчика оказались столь малыми, что рассчитанное значение погрешности для всех углов составляет доли см/с. Эта величина может считаться пренебрежимо малой, поэтому результаты расчёта для этого случая не включались в итоговую таблицу.

Для двух других случаев при частоте колебаний датчика параметров ветра  $f_2 = 0,5$  Гц,  $f_3 = 1,25$  Гц погрешности оказались достаточно значимыми (табл. 1 и 2).

Анализируя данные табл. 1 и 2, необходимо отметить, что в них отражены все возможные комбинации углов отклонения буя, скорости ветра и периода раскачки (или частоты). Поэтому в таблице могут встречаться явно нереальные случаи – например, при малой скорости ветра период колебаний не может быть очень большим из-за ма-

лой высоты волн, и, наоборот, при большой скорости ветра период колебаний не может быть малым.

Погрешность измерения, указанная в последнем столбце табл. 1 и 2, всегда означает превышение показаний анемометра над истинной средней скоростью ветра. Причина появления этого превышения указана в работе [8]. Разумеется, на эту погрешность накладываются другие погрешности анемометров, которые остаются за рамками данной работы.

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

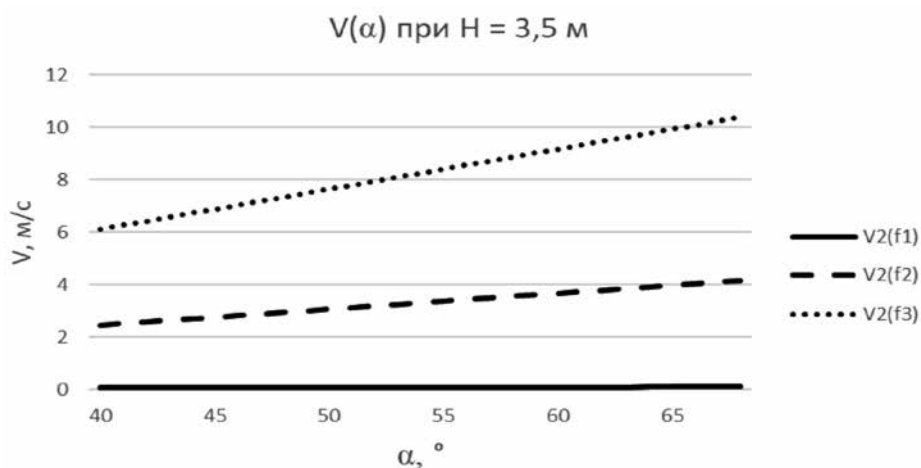


Рис. 4. График зависимости скорости движения датчика при разных значениях частот и углов раскачки буйковой станции

Таблица 1

Результаты расчётов погрешностей для высоты датчика  $H = 2,9$  м

$T, \text{с}$	$\alpha, ^\circ$	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	

Окончание табл. 1				
T, с	$\alpha, ^\circ$	Скорость движения датчика, м/с	Скорость ветра, м/с	Погрешность, 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
	68°	±8,6 м/с	9 м/с	7,8 м/с
			10 м/с	6,3 м/с
			15 м/с	2,3 м/с
			20 м/с	0,8 м/с
			25 м/с	0,3 м/с
			30 м/с	0 м/с

Таблица 2

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

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

Из табл. 1 и 2 также видно, что при прочих одинаковых условиях погрешность возрастает при увеличении высоты установки датчика. Это легко объяснить, т.к. с увеличением высоты увеличивается скорость раскачки буя. Таким образом, можно рекомендовать уменьшение высоты положения датчика. Впрочем, это может привести к забрызгиванию датчика водой и искажению показаний из-за измерения скорости ветра вблизи уровня шероховатости.

### Заключение

Результаты проведенных расчетов могут быть использованы для автоматической обработки результатов измерений. В самом деле, океанографические буи оснащены датчиком частоты и угла раскачки [10]. Знание этих величин позволит применить разработанную методику при определении истинной средней скорости ветра, заложив её в программу автоматической обработки измерений.

### Список литературы

1. Атаджанова О.А. Исследование короткопериодных внутренних волн и малых вихревых структур на акватории Белого моря по спутниковым данным / О.А. Атаджанова, А.В. Зимин, Д.А. Романенков, И.Е. Козлов // Труды IV Научнотехнической конференции молодых ученых «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб., 2015а. С. 225–228.
2. Ожигин В.К. Воды Баренцева моря: структура, циркуляция, изменчивость / В.К. Ожигин, В.А. Ившин, А.Г. Трофимов, А.Л. Карсаков, М.Ю. Анциферов. Мурманск: ПИНРО, 2016. 260 с.
3. Justin J.H. Buck1, Scott J. Bainbridge, Eugene F. Burger, Alexandra C. Kraberg, Matthew Casari, Kenneth S. Casey, Louise Darroch1, Joaquin Del Rio6, Katja Metfies, Eric Delory, Philipp F. Fischer, Thomas Gardner1, Ryan Heffernan, Simon Jirka, Alexandra Kokkinaki1, Martina Loebl, Pier Luigi Buttigieg, Jay S. Pearlman and Ingo Schewe12 (2019): Ocean data product integration through innovation—The next level of data interoperability. *Front. Mar. Sci.*, 6, 32, Oceanobs19: An Ocean of Opportunity. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00032>.
4. Буйковые метеорологические станции. [Электронный ресурс]. URL: [www.pmel.noaa.gov](http://www.pmel.noaa.gov) (дата обращения 20.05.2021).
5. Булгаков К.Ю. Расчёты эволюции верхнего слоя океана, основанные на теории подобия. Санкт-Петербургский филиал Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН. *ОКЕАНОЛОГИЯ*. 2012. Т. 52. № 3. С. 335–347.
6. Kozlov I.E. Characteristics of short-period internal waves in the Kara Sea inferred from satellite SAR data / I.E. Kozlov, V.N. Kudryavtsev, E.V. Zubkova, A.V. Zimin, B. Chapron // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2015. Vol. 51, issue 9. P. 1073–1087.
7. Григоров Н.О., Саенко А.Г., Восканян К.Л. Методы и средства гидрометеорологических измерений. Метеорологические приборы. СПб.: РГМУ, 2012. 306 с.
8. Григоров Н.О., Никитина В.С. Инерционные погрешности ротоанемометров // *Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития: труды II Всероссийской конференции имени Л.Н. Карлина (Санкт-Петербург, 19-20 декабря 2018 г.)*. СПб., 2018. С. 204–205.
9. Гульков В.Н., Зайцев В.А., Кропоткин М.А., Пашенко Е.Г., Тихонов В.В. Оптико-физические средства исследования океана. Л.: Судостроение, 1984. 264 с.
10. Ковчин И.С., Степанюк И.А. Методы специальных океанологических измерений. СПб., 2002. 263 с.