

УДК 519.688

М.С. Ермаков

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВЕТРА УЛЬТРАЗВУКОВЫМ МЕТОДОМ

Ермаков Михаил Сергеевич, кандидат физико-математических наук, окончил инженерно-физический факультет высоких технологий Ульяновского государственного университета. Инженер 1 категории ФНПЦ АО «НПО «Марс». Специализируется в области создания и развития автоматизированных измерительных систем. Имеет статьи и другие публикации в области анализа полупроводниковых приборов. [e-mail: ermakov@pisem.net].

Аннотация

В работе рассматривается вариант построения ультразвукового датчика скорости и направления ветра, функционирующего на изменении времени прохождения звука в атмосфере, в зависимости от скорости и направления движения среды. Предложен вариант размещения ультразвуковых излучателей и приемников, позволяющий исключить влияние температуры, влажности воздуха и атмосферного давления на скорость звука. В статье описывается алгоритм, позволяющий из данных о времени прохождения звука найти скорость и направление ветра. Рассматриваемый вариант построения датчика позволяет определять скорость и направление ветра с одинаковой точностью независимо от направления воздушного потока. Датчик, описанный в статье, не имеет подвижных частей, что повышает его надежность, а исключение влияния параметров атмосферы на скорость звука дает возможность применять такой прибор в различных климатических условиях и получать скорость и направление ветра с одинаковой точностью.

Ключевые слова: ультразвук, датчик ветра, скорость ветра, направление ветра.

DEVELOPMENT OF THE ALGORITHM FOR DEFINING WIND PARAMETERS ULTRASONICALLY

Mikhail Sergeevich Ermakov, Candidate of Physics and Mathematics; graduated from the Faculty of Physics and High Technology Engineering of Ulyanovsk State University; Engineer at Federal Research-and-Production Center Joint Stock Company 'Research-and-Production Association 'Mars'; specializes in the field of building and developing automated measuring systems; an author of articles and papers in the field of semiconductor devices analysis. e-mail: ermakov@pisem.net.

Abstract

This paper considers the option of constructing an ultrasonic sensor of wind speed and direction with changing the operating time of sound passage in the atmosphere, depending on the speed and direction of motion of the medium. The variant of placing ultrasonic emitters and receivers allowing to exclude affect of temperature, humidity and atmospheric pressure at the speed of sound is proposed. The paper describes the algorithm which allows to find the wind speed and direction from the data on sound propagation time. The algorithm also allows to determine the wind speed and direction with the same accuracy regardless of the direction of air flow. The sensor described in the article has not any moving parts which improves its reliability and excludes the influence of atmospheric parameters on the speed of sound, that makes it possible to use such device in a variety of climatic conditions and obtain wind speed and direction with the same accuracy.

Key words: ultrasound, wind sensor, wind speed, wind direction.

ВВЕДЕНИЕ

Надежная и оперативная метеорологическая информация – один из важных элементов, гарантирующих безопасность морской навигации. Влияние ветра на судоходство огромно: это и безопасность мореплавания (ухудшение остойчивости, управляемости и маневрен-

ности при сильных ветрах), и экономические показатели [1–6].

Выполнение важнейших функций порта, нефтяных и газовых платформ, например, швартовка и обслуживание судов, обеспечивается только при наличии точной и достоверной метеорологической информации [7–9].

Выделяют несколько отдельных разновидностей устройств, способных производить расчет скорости ветра [10–15]:

1. Вращательные анемометры эксплуатируются метеорологами по всему миру [10, 11].
2. Вихревые анемометры используются для измерения скорости воздушных потоков в вентиляционных системах и трубопроводах [10–14].
3. Тепловые анемометры применяются для измерения показателей медленных воздушных потоков [10–14].
4. Динамометрические анемометры применяются не только в метеорологии, но и вентиляционных системах и газоходах [15].

5. Ультразвуковые анемометры. Устройства данной категории основываются на определении скорости звука на приемнике в зависимости от показателей потока воздушных масс [10–14]. Здесь представлены наиболее высокоточные, современные устройства, которые также позволяют фиксировать направление ветровых потоков. Выделяют трехмерные и двухмерные ультразвуковые приборы. Первые дают возможность получать показатели направления перемещения потоков в трех компонентах. В свою очередь, двухмерный метеорологический прибор позволяет измерять направление и скорость ветра лишь в горизонтальной плоскости [10–14].

Ультразвуковой датчик фирмы «Vaisala» оснащен антенной из трех равноудаленных друг от друга ультразвуковых преобразователей, расположенных в горизонтальной плоскости. Скорость и направление ветра определяются по времени, за которое ультразвук проходит от одного преобразователя до двух других. Датчик ветра измеряет время прохождения звука (в обоих направлениях) по трем сторонам треугольника из преобразователей. Время прохождения зависит от скорости ветра на пути ультразвука. При нулевой скорости ветра время прохождения ультразвука в обоих направлениях будет одинаковым. При наличии ветра вдоль траектории распространения ультразвука время прохождения изменяется: увеличивается при движении против направления ветра и уменьшается при движении по направлению ветра [16]. Подобная схема позволяет избавиться от внесения поправок в скорость звука на атмосферное давление, температуру и влажность воздуха.

Таким образом, для измерения скорости и направления ветра в морских условиях наиболее подходящим будет датчик на ультразвуковых принципах.

ОПИСАНИЕ ДАТЧИКА ВЕТРА WMT700

Датчик ветра WMT700 [16] использует технологию ультразвуковых датчиков Vaisala WINDCAP для измерения характеристик ветра. Датчик имеет встроенный микроконтроллер, который фиксирует и обрабатывает данные, а затем передает их через последовательные интерфейсы. Датчик ветра оснащен антенной из трех равноудаленных друг от друга ультразвуковых преобразователей, расположенных в горизонтальной плоско-

сти. Скорость (*WS*) и направление (*WD*) ветра определяются по времени, за которое ультразвук проходит от одного преобразователя до двух других. Датчик ветра измеряет время прохождения звука (в обоих направлениях) по трем сторонам треугольника из преобразователей. Время прохождения зависит от скорости ветра на пути ультразвука. При нулевой скорости ветра время прохождения ультразвука в обоих направлениях будет одинаковым. При наличии ветра вдоль траектории распространения ультразвука время прохождения изменяется: увеличивается при движении против направления ветра и уменьшается при движении по направлению ветра.

Микропроцессор микроконтроллера вычисляет скорость ветра на основе измеренного времени прохождения ультразвука по следующей формуле [16]:

$$V_w = 0,5 \cdot L \cdot (1/t_f - 1/t_r), \text{ где } V_w - \text{ скорость ветра; } L - \text{ расстояние между двумя преобразователями, } t_f - \text{ время прохождения ультразвука в прямом направлении, } t_r - \text{ время прохождения ультразвука в обратном направлении.}$$

Шестикратное измерение времени прохождения ультразвука позволяет вычислить скорость ветра для каждой из трех траекторий. Значений скорости ветра на двух траекториях массива достаточно для определения скорости и направления ветра. Вычисленные скорости ветра не зависят от высоты над уровнем моря, температуры и влажности. Значение этих факторов сводится на нет при измерении времени прохождения ультразвука в обоих направлениях, хотя время прохождения ультразвука в одном направлении зависит от этих параметров [16].

Треугольная геометрия сенсора преобразуется в ортогональные координаты для получения компонентов *x* и *y*. Затем датчик преобразует векторы направления ветра в полярные координаты. Датчик ветра WMT700 фиксирует скорость ветра (*x*, *y*) как две скалярные скорости, одна из которых параллельна направлению север-юг (*x*), а вторая – направлению запад-

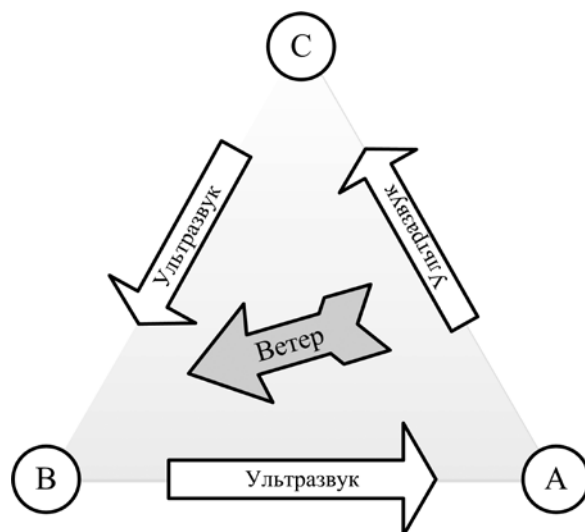


Рис. 1. Схема датчика ветра

восток (y). Единицами измерения скорости могут быть метры в секунду, узлы, мили в час и километры в час. $x = WS \cdot \cos WD$, $y = WS \cdot \sin WD$. Датчик ветра WMT700 фиксирует полярную скорость ветра в виде скалярной величины в выбранных единицах (метры в секунду, узлы, мили в час и километры в час). Полярное направление ветра выражается в градусах ($^\circ$). Датчик ветра WMT700 указывает направление, откуда дует ветер. Север обозначается как 0° , восток – как 90° , юг – как 180° , запад – как 270° [16].

ОПИСАНИЕ СХЕМЫ РАБОТЫ ПРЕДЛОЖЕННОГО ДАТЧИКА

Для построения датчика была выбрана треугольная схема расположения 3 пар излучателей и приемников ультразвука, в отличие от датчиков фирмы «Vaisala», где используется 6 пар. Схема расположения ультразвуковых излучателей, а также путей и направлений распространения звука, показанная на рисунке 1, где А, В, С – это излучатели и приемники ультразвука, расположенные по углам равностороннего треугольника. Время прохождения звука между точками В и А обозначим t_x , А и С обозначим t_y , С и В обозначим t_z . Длину стороны треугольника обозначим через l . Преобразуем эту схему (рис. 2) для удобной записи системы уравнений, где вектор между точками OW – это вектор скорости ветра, δ – угол между скоростью ветра и вектором OA будем отсчитывать от OA по ходу часовой стрелки.

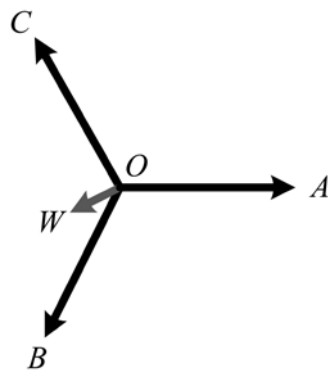


Рис. 2. Приведенная схема датчика

Угол между векторами OA и OB $2/3\pi$, а между OA и OC – $4/3\pi$. Учитывая доплеровский эффект от прохождения звука через движущиеся среду, запишем систему уравнений (1).

$$\begin{cases} \frac{l}{t_x} = v_{36} + v_6 \cos \delta, \\ \frac{l}{t_y} = v_{36} + v_6 \cos \left(\frac{4\pi}{3} + \delta \right), \\ \frac{l}{t_z} = v_{36} + v_6 \cos \left(\frac{2\pi}{3} + \delta \right), \end{cases} \quad (1)$$

где v_{36} – скорость звука при данной температуре и влажности воздуха, атмосферном давлении, v_6 – скорость ветра. Решая систему, мы находим скорость звука:

$$v_{36} = \frac{l(t_x t_y + t_x t_z + t_y t_z)}{3t_x t_y t_z}. \quad (2)$$

И скорость ветра:

$$v_6 = \frac{2l \sqrt{t_x^2 t_y^2 + t_x^2 t_z^2 + t_y^2 t_z^2 - t_x t_y t_z (t_x + t_y + t_z)}}{3t_x t_y t_z}. \quad (3)$$

Зная скорость звука, найденную по формуле 2, можно найти t_0 – время прохождения звука без влияния ветра:

$$t_0 = l/v_{36}. \quad (4)$$

Из системы (1) угол δ также определяется как функция $arctg$ (соответствующее выражение не приводится в данной работе, так как слишком громоздкое), но так как область значения tg от $(-\pi/2; \pi/2)$, то возникает необходимость переписать систему уравнений (1).

$$\begin{cases} \frac{l}{t_x} = v_{36} + v_6 \cos(\alpha), \\ \frac{l}{t_y} = v_{36} + v_6 \cos(\beta), \\ \frac{l}{t_z} = v_{36} + v_6 \cos(\gamma), \end{cases} \quad (5)$$

где α – угол между OW и вектором OA , β – угол между OW и OC , а γ – угол между OW и OB . Тогда

$$\alpha = \pi - \arccos \left(\frac{v_{36} \cdot t_x - l}{v_6 \cdot t_x} \right), \quad (6)$$

$$\beta = \pi - \arccos \left(\frac{v_{36} \cdot t_y - l}{v_6 \cdot t_y} \right), \quad (7)$$

$$\gamma = \pi - \arccos \left(\frac{v_{36} \cdot t_z - l}{v_6 \cdot t_z} \right). \quad (8)$$

Треугольная геометрия датчика преобразуется в полярные координаты для получения угла δ , вектор OA выбирается направленным на север – обозначается как 0° , запад – как 90° , юг – как 180° , восток – как 270° .

Так как область определения $arccos$ от 0 до π необходимо сравнить t_x, t_y, t_z с t_0 , а затем найти угол δ :

$$\delta = \begin{cases} 1/6 \pi, t_y = t_0, t_x > t_0, t_z < t_0; \\ 1/2 \pi, t_x = t_0, t_y > t_0, t_z < t_0; \\ 5/6 \pi, t_z = t_0, t_y > t_0, t_x < t_0; \\ 7/6 \pi, t_y = t_0, t_z > t_0, t_x < t_0; \\ 3/2 \pi, t_x = t_0, t_z > t_0, t_y < t_0; \\ 11/6 \pi, t_z = t_0, t_x > t_0, t_y < t_0. \end{cases} \quad (9)$$

Если условия из формулы (9) не выполняются, то

$$\delta = \begin{cases} \alpha, t_x > t_0, t_y > t_0, t_z < t_0; \\ \alpha, t_x < t_0, t_y > t_0, t_z < t_0; \\ \beta + 5/6 \pi, t_x < t_0, t_y > t_0, t_z > t_0; \\ \beta + 5/6 \pi, t_x < t_0, t_y < t_0, t_z > t_0; \\ \gamma + 3/2 \pi, t_x > t_0, t_y < t_0, t_z > t_0; \\ \gamma + 3/2 \pi, t_x > t_0, t_y < t_0, t_z < t_0. \end{cases} \quad (10)$$

АЛГОРИТМ НАХОЖДЕНИЯ СКОРОСТИ И НАПРАВЛЕНИЯ ВЕТРА

На рисунке 3 представлен алгоритм нахождения скорости звука.

Затем можно найти скорость ветра и углы α , β , γ (рис. 4).

Зная α , β , γ , можно определить угол δ ветра (рис. 5).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Датчик, описанный в статье, не имеет подвижных частей, что повышает его надежность, а исключение влияния параметров атмосферы на скорость звука дает возможность применять такой прибор в различных климатических условиях. Предложенный вариант размещения ультразвуковых излучателей и приемников позволяет упростить конструкцию прибора из-за меньшего количества ультразвуковых преобразователей и, соответственно, уменьшить его стоимость. Описанный алгоритм позволяет отказать от перехода в ортогональную систему координат, а затем из неё в полярную, как в датчике ветра WMT700, а сразу находить скорость и направление ветра в полярной системе координат, что повышает точность определения направления ветра.

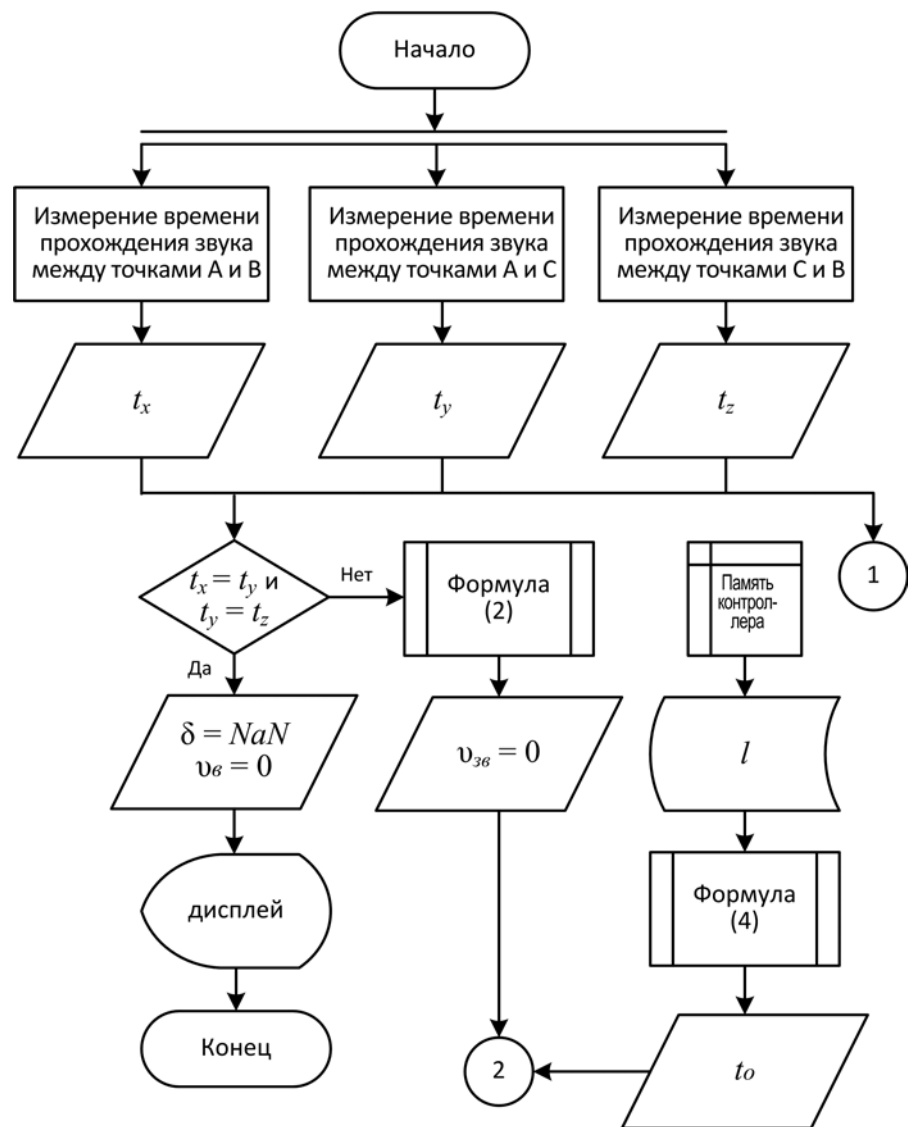


Рис. 3. Алгоритм нахождения скорости звука

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Семенченко Б.А. Физическая метеорология. – М. : Аспект Пресс, 2002. – 415 с.
2. Хромов С.П., Петросянец М.А. Метеорология и климатология. – М. : Изд-во МГУ, 2001. – 528 с.
3. Морозов А.Е. Метеорология и климатология : учеб. пособие. – Изд. 2-е перераб. и допол. – Екатеринбург, 2011. – 204 с.
4. Захаровская Н.Н., Ильинич В.В. Метеорология и климатология. – М. : «КолосС», 2005. – 127 с.
5. Киселев В.Н., Кузнецов А.Д. Методы зондирования окружающей среды (атмосферы). – СПб. : РГГМУ, 2004. – 429с.
6. Городецкий О.А. Метеорология, методы и технические средства наблюдений. – Л. : Гидрометеиздат, 1991. – 336 с.
7. Судовые гидрометеорологические приборы и инструменты. – URL: [http://seaman-sea.ru/upravlenie-](http://seaman-sea.ru/upravlenie-sudnom/536-sudovye-gidrometeorologicheskie-pribory-i-instrumenty.html)

[sudnom/536-sudovye-gidrometeorologicheskie-pribory-i-instrumenty.html](http://seaman-sea.ru/upravlenie-sudnom/536-sudovye-gidrometeorologicheskie-pribory-i-instrumenty.html).

8. Против ветра, или все тайны анеморумбометра. – URL: http://www.yachtrussia.com/articles/2016/05/26/articles_337.html.

9. Гордиенко А.И., Дремлюг В.В. Гидрометеорологическое обеспечение судовождения. – М. : Транспорт, 1989. – 240 с.

10. Сравнительный анализ приборов и методов измерения скорости и направления ветра / А.Д. Плотников [и др.] // Ползуновский альманах. – 2010. – № 2. – С. 119–122.

11. Анемометры Актаком: новые возможности работы с программным обеспечением. – URL: http://www.eliks.ru/upload/kipis_articles/article_anemometer_software.pdf.

12. Анемометры – разработчики и изготовители. – URL: <http://www.anemometers.ru>.

13. Анемометры. Применение различных видов анемометров. – URL: http://ecounit.com.ua/artikle_102.html.

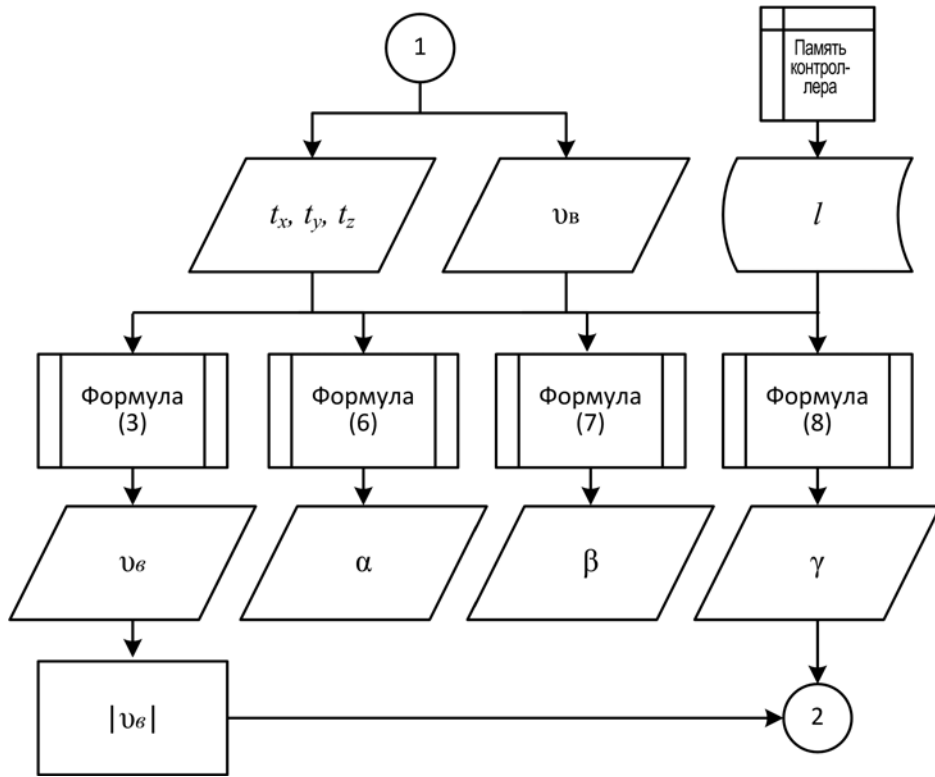


Рис. 4. Алгоритм нахождения скорости ветра

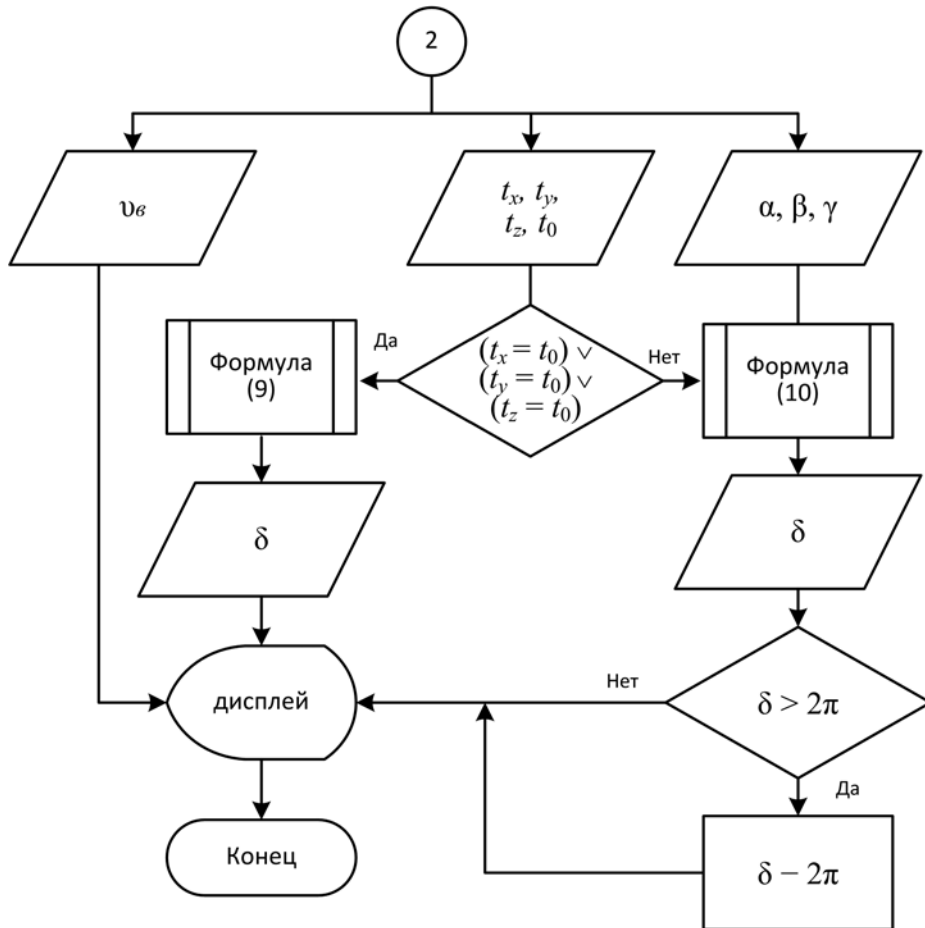


Рис. 5. Алгоритм нахождения направления ветра и отображения данных на дисплей

14. Виды анемометров. – URL: http://www.devicesearch.ru/article/vidy_anemometrov.

15. Измерение воздушного потока. – URL: <http://kipinfo.ru/info/stati/?id=105>.

16. Руководство пользователя Vaisala WINDCAP Ultrasonic. Датчик ветра серии WMT700. – URL: <http://www.vaisala.ru/Vaisala%20Documents/User%20Guides%20and%20Quick%20Ref%20Guides/WMT700%20User's%20Guide%20in%20Russian.pdf>.

REFERENCES

1. Semenchenko B.A. *Fizicheskaja meteorologija Ucheb.* [Physical Meteorology. Tutorial]. Moscow, Aspect Press Publ., 2002. 415 p.

2. Khromov S.P., Petrosiants M.A. *Meteorologija i klimatologija* [Meteorology and Climatology]. Moscow, Moscow University Publ., 2001. 528 p.

3. Morozov A.E. *Meteorologija i klimatologija Ucheb. posobie. Izd. 2-e pererab. i dopol.* [Meteorology and Climatology. Textbook. the 2nd Edition revised and enlarged]. Ekaterinburg, 2011. 204 p.

4. Zakharovskaia N.N. and Iliinich V.V. *Meteorologija i klimatologija* [Meteorology and Climatology]. Moscow, Colossus Publ., 2005. 127 p.

5. Kiselev V.N. Kuznetsov A.D. *Metody zondirovaniia okruzhaiushchei sredy (atmosfera)* [Sounding Methods of Environment (Atmosphere)]. St. Petersburg, Russian State Hydrometeorological University Publ., 2004. p. 429.

6. Gorodetskii O.A. *Meteorologija, metody i tekhnicheskie sredstva nabliudeniia* [Meteorology, Methods and Technical Means of Observation]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1991. 336 p.

7. *Sudovye gidrometeorologicheskie pribory i instrumenty* [Ship Meteorological Instruments and Tools]. Available at: <http://seaman-sea.ru/upravlenie-sudnom/536-sudovye-gidrometeorologicheskie-pribory-i-instrumenty.html>.

8. *Protiv vetra, ili vse tainy anemorumbometra* [Against the Wind or All the Secrets of Recording Directional Anemometer]. Available at: http://www.yachtrussia.com/articles/2016/05/26/articles_337.html.

9. Gordienko A.I., Dremlig V.V. *Gidrometeorologicheskoe obespechenie sudodvizheniia* [Hydrometeorological Support of Navigation]. Moscow, Transport Publ., 1989. 240 p.

10. Plotnikov A.D. et al. *Sravnitelnyi analiz priborov i metodov izmereniia skorosti i napravleniia vetra* [A Comparative Analysis of Devices and Methods for Measuring the Speed and Direction of Wind]. *Polzunovskii almanakh* [Polzunovsk Yearbook], 2010, no.2, pp. 119–122.

11. *Anemometry Aktakom: novye vozmozhnosti raboty c programmym obespecheniem* [Anemometers Aktakom: New Software Features] Available at: http://www.eliks.ru/upload/kipis_articles/article_anemometer_software.pdf.

12. *Anemometry – razrabotchiki i izgotoviteli.* [Anemometers – Developers and Manufacturers]. Available at: <http://www.anemometers.ru>.

13. *Anemometry. Primenenie razlichnykh vidov anemometrov* [Anemometers. The Use of Different Types of Anemometers]. Available at: http://ecounit.com.ua/artikle_102.html.

14. *Vidy anemometrov* [Types of Anemometers]. Available at: http://www.devicesearch.ru/article/vidy_anemometrov.

15. *Izmerenie vozdušnogo potoka* [Airflow Measurement]. Available at: <http://kipinfo.ru/info/stati/?id=105>.

16. *Rukovodstvo polzovatelia Vaisala WINDCAP Ultrasonic. Datchik vetra serii WMT700* [User Manual. Vaisala WINDCAP Ultrasonic. The Wind Sensor of WMT700 Series]. Available at: <http://www.vaisala.ru/Vaisala%20Documents/User%20Guides%20and%20Quick%20Ref%20Guides/WMT700%20User's%20Guide%20in%20Russian.pdf>.