

# ТЕРМОАНЕМОМЕТРИЧЕСКИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ СКОРОСТИ И НАПРАВЛЕНИЯ ТЕЧЕНИЯ

**A. В. Клименко, К. А. Кузьмин,  
О. Ф. Дмитриев**

Морской гидрофизический институт  
НАН Украины,  
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2  
*E-mail: oaoimhi@inbox.ru*

*В статье описан метод измерения направления и скорости течения термоанемометрическим датчиком. Приведены характеристики термоанемометрического измерителя скорости и направления течения.*

В отделе автоматизации океанографических исследований МГИ НАНУ ведётся разработка термоанемометрического измерителя скорости и направления (ИСНТ). На рис. 1 представлен общий вид датчика измерителя.

Датчик содержит контактирующий с исследуемым потоком и выполненный из алюминия тонкостенного корпуса 1 в виде цилиндра, посадочное место которого установлено в корпусе 2. Полость корпуса 1 наполнена теплоизоляционным наполнителем 3, в качестве которого использован пенопласт для придания жесткости конструкции. В заданной по перечной плоскости корпуса 1, на двух ортогональных осях расположены две пары датчиков температуры 4 – 7, которые имеют непосредственный тепловой контакт с внутренней стенкой корпуса 1. Выводы датчиков 4 – 7 подключены к измерительному блоку прибора. Датчик содержит проволочный нагреватель 8, который непосредственно намотан на корпусе 1.

Цилиндр 1 закрыт крышкой 9, которая выполнена куполообразной для ослабления температурного шунтирования, вызванного паразитной траекторией потока поверх крышки. Ее наличие приводит к увеличению разницы температур в парах подогреваемых датчиков 4, 6 и 5, 7, а, следовательно, к увеличению чувствительности. С этой же целью и для уменьшения температурного шунтирования датчиков 4 – 7 крышка 9 изготовлена из теплоизоляционного материала –

оргстекла. В центре крышки 9 установлен контактирующий с исследуемым потоком датчик температуры 10, выводы которого подключены к измерительному блоку прибора.

Принцип работы ИСНТ основан на измерении разницы температур диаметрально противоположных датчиков и её зависимости от скорости и направления потока. Температура цилиндра в каждой точке поверхности контактируемой с потоком вследствие теплообмена зависит от скорости и направления движения среды.

Модули векторов  $\bar{a}$ ,  $\bar{b}$ ,  $\bar{c}$  и  $\bar{d}$  соответствуют температурам двух пар датчиков, а угол поворота направлению потока.

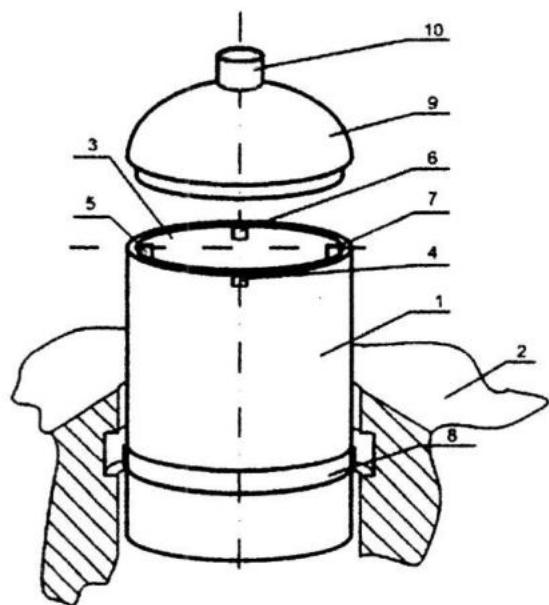


Рис. 1. Общий вид датчика термоанемометрического измерителя скорости и направления течения

Как видно из рис. 2, данные вектора с изменением угла поворота, изменяют и длину.

Эта зависимость однозначна от  $0^\circ$  до  $180^\circ$  относительно данной плоскости и, принципиально, её достаточно для вычисления направления и скорости течения, однако в этом случае чувствительность устройства крайне низка. Для повышения соотношения сигнал-шум целесообразно взять разницы температур диаметрально противоположных датчиков 1, 3 и 2, 4 (рис. 2).

На рис. 3 представлены значения разности температур по модулю в круговых координатах. Каждый из четырех лепестков геометрически представляют собой фигуру близкую по форме к окружности и получаются путем вычитания противоположных диаграмм датчиков, представленных на рис. 2. Для  $\Delta T_1$  верхняя полуплоскость больше нуля,

нижняя меньше нуля, а для  $\Delta T_2$  правая больше, левая меньше. Так исключается ошибка в определении направления из-за симметричности значений.

Вектора  $\overline{OA}$  и  $\overline{OB}$  численно равны значению  $\Delta T_1$  и  $\Delta T_2$ , а угол их поворота  $\alpha$  соответствует направлению потока.

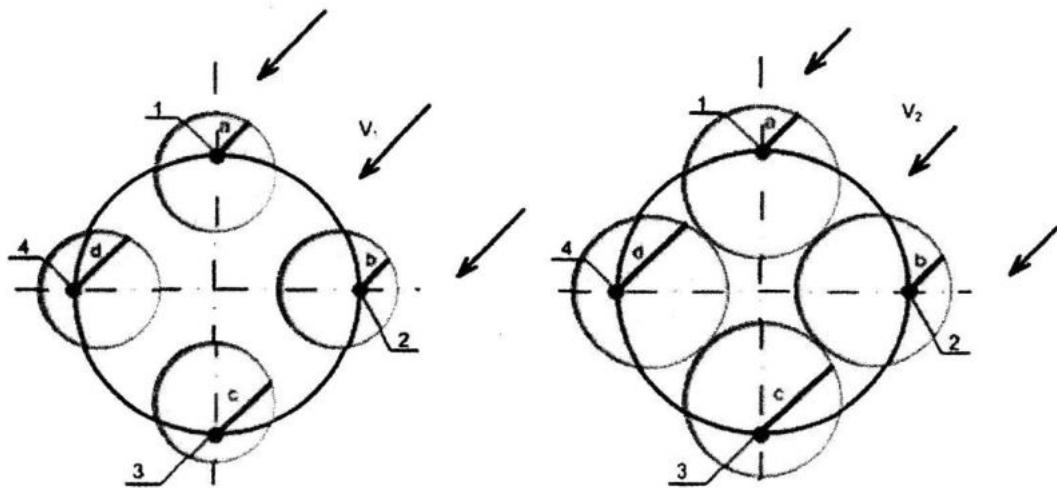


Рис. 2. Диаграммы направленности датчиков температуры 1, 2, 3, 4 и соответствующие им значения температур в зависимости от направления и скорости течения  $V_1 > V_2$

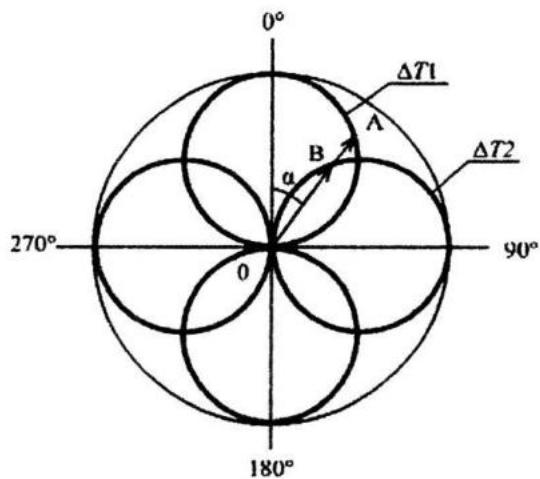
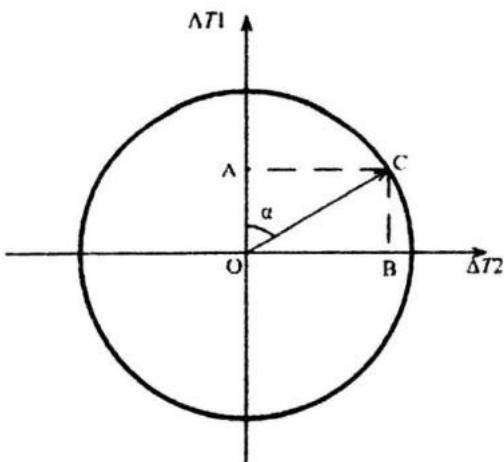


Рис. 3. Диаграммы направленности двух пар датчиков в круговых координатах

На рис. 4 представлен способ построения направления течения в декартовых координатах, здесь угол  $\alpha$  результирующего вектора  $\overline{OC}$  является углом направления потока относительно выбранной оси координат, например, оси  $\Delta T_1$ ,  $OA$  и  $OB$  проекции вектора  $\overline{OC}$  численно равные  $\Delta T_1$  и  $\Delta T_2$ , соответ-

ственно. Таким образом, зная значения  $OA$  и  $OB$  можно однозначно определить угол  $\alpha$

На рис. 4 показана схема измерения направления течения идеальным датчиком, за который можно принять датчик выполненный с абсолютной точностью.



Р и с. 4. Зависимость направления потока  $\alpha$  от  $\Delta T_1$  и  $\Delta T_2$

$$\alpha = \arccos \left( \frac{\Delta T_1}{\sqrt{\Delta T_1^2 + \Delta T_2^2}} \right), \quad (1)$$

при  $\Delta T_2 > 0$ ,  $\alpha = 0^\circ - 180^\circ$ ;  
при  $\Delta T_2 < 0$ ,  $\alpha = 180^\circ - 360^\circ$ .

Любые нарушения местоположения, адгезии термодатчиков по ортогональным плоскостям приводят к искажению идеальной диаграммы направленности датчика. Кроме того, неравномерность натяжения и асимметрия намотки проволочного нагревателя вызывают неравномерный нагрев рабочей поверхности цилиндра 1, а, следовательно, к дополнительной деформации диаграммы направленности датчика измерителя, следствием чего, будет увеличение погрешности в вычислении направления течения  $\alpha$ .

Для компенсации искажения в реальном датчике и оценки величины прошёдём нормировку, заключающуюся в экспериментальном исследовании зависимости температур  $\Delta T_1$  и  $\Delta T_2$  от угла обтекания  $\alpha$ . Для этого в экспериментальном лотке (рис. 6) зададим постоянную скорость и снимем зависимость  $\Delta T_1$  и  $\Delta T_2$  от угла поворота оси измерителя.

На рис. 5 представлена экспериментальная зависимость направления потока от разниц температур  $\Delta T_1$  и  $\Delta T_2$  измерительных датчиков. Координаты точки  $O'$  на этом рисунке численно равны значениям нормировочных коэффициентов  $A$  и  $B$ , тогда выражение (1) примет вид

$$\alpha = \arccos \left( \frac{\Delta T_1 + A}{\sqrt{(\Delta T_1 + A)^2 + (\Delta T_2 + B)^2}} \right), \quad (2)$$

где  $\Delta T_1$  и  $\Delta T_2$  – разницы температур двух пар датчиков.

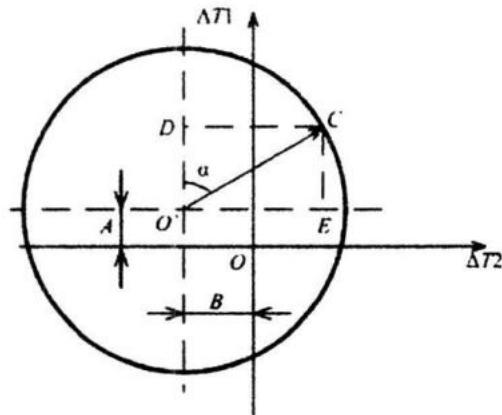
Для определения скорости потока фиксируют значения  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ ,  $T_4$  температуры корпуса четырьмя нагревыми датчиками и значение  $T_5$  температуры среды, окружающей среды, неподогреваемым датчиком.

Разница между среднеарифметическим значением температур  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ ,  $T_4$  и температурой  $T_5$  является информативным параметром, необходимым для вычисления скорости  $V$  обтекающего потока, причем, чем выше скорость обтекания, тем меньше эта разность

$$V = f \left( \frac{T_1 + T_2 + T_3 + T_4}{4} - T_5 \right). \quad (3)$$

Применяемый в ОАОИ гидролоток, с учётом порога трогания измерительной вертушки, позволяет проградуировать измеритель ИСНТ в диапазоне 0,2–1 м/с.

Для градуировки ИСНТ в диапазоне малых скоростей была разработана специальная установка, представленная на рис. 6.



Р и с. 5. Измерение направления течения реальным датчиком

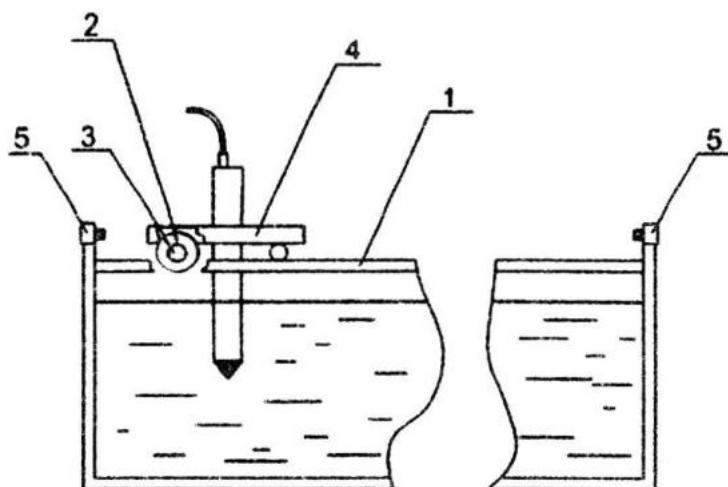


Рис. 6. Установка для градуировки прибора на малых скоростях

В верхней части установки по направляющим 1 с помощью микромотора 2, установленного на оси колёс 3, перемещается каретка 4, скорость которой регулируется в диапазоне 0 – 50 мм/с. На торцах установлены концевые переключатели, позволяющие автоматически переключать направление движения каретки. Через штуцер расположенный на верхней крыше каретки в воду входит измерительный прибор. Вокруг штуцера нанесён лимб с градусной сеткой, позволяющей градуировать прибор по направлению потока. Минимальная равномерная скорость, которую удалось задавать, составляет 3 мм/с. Задавать скорости более 50 мм/с не представляется целесообразным из-за недостаточной длины установки, не позволяющей температурным датчикам прибора успеть войти в насыщенный режим из-за относительно большой тепловой инерции. Таким образом, увеличение длины установки в четыре раза позволит увеличить верхнюю границу задаваемого диапазона скоростей, примерно, до 0,2 м/с, что приведёт к снижению погрешности градуировки.

По результатам градуировки в обоих гидролотках была получена формула для расчёта скорости течения

$$V = a + \frac{b}{\left( \frac{T_1 + T_2 + T_3 + T_4}{4} - T_5 \right)} + c, \quad (4)$$

где  $a, b, c$  – градуировочные коэффициенты.

Для определения произвольной ориентации горизонтальной оси прибора в абсолютных географических координатах и последующего вычисления направления течения, в измерителе используется компас на микросхеме НМС6352. Натурные испытания прибора проводились в ЭО МГИ п. Каивели. При установке прибора на океанографической была обнаружена погрешность, возникающая вследствие влияния массивных металлических элементов конструкции платформы.

На рис. 7 представлены показания компаса в сравнении с реальными значениями, измеренными по градуировочному лимбу. Проверка погрешности показаний компаса в точке постановки ИСНТ проводилась путём поворота оси измерителя на  $90^\circ$  в горизонтальной плоскости. Как видно из рис. 7, максимальное отклонение измеренного значения угла поворота от реального в районе  $330^\circ$  достигает, примерно,  $20^\circ$ .

На рис. 8 изображено изменение показаний компаса, полученных при удалении прибора от платформы.

По мере удаления прибора заметны значительные колебания показаний компаса, достигающие  $25^\circ$ . Что говорит о неоднородности магнитного поля, возникшей из-за массивных металлических элементов конструкции платформы.

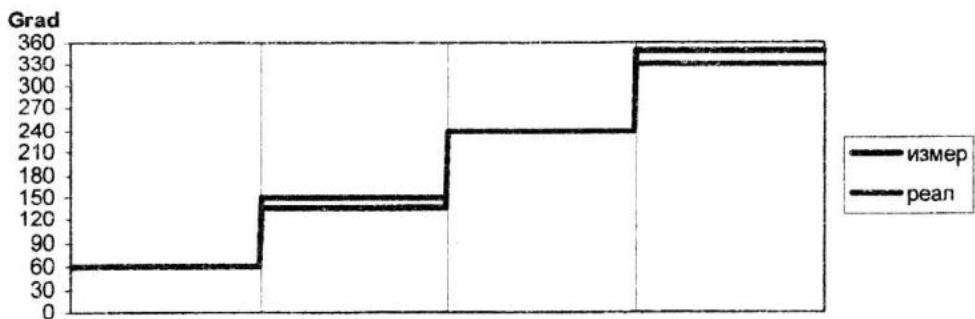


Рис. 7. Показания компаса и реального угла поворота

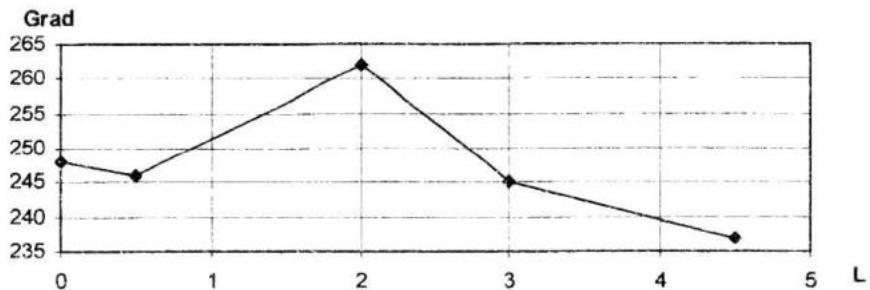


Рис. 8. Влияние местоположения компаса на его показания при одинаковой ориентации относительно сторон света

Погрешность, вызванную влиянием массивных частей платформы на показания компаса, возможно уменьшить путём градуировки компаса в точке постановки измерителя и дальнейшей алгоритмической коррекцией его характеристики.

Прибор на кабель-тросе опускался на глубину 7 м. Регистрация информации с частотой 0,8 Гц осуществлялась на ноутбук. Для уменьшения рыскания прибора в горизонтальной плоскости, а соответственно уменьшению зашумленности информации, он снабжался стабилизатором. Внешний вид ИСНТ представлен на рис. 9. Весогабаритные параметры прибора следующие: длина 420 мм, диаметр 40 мм, вес 400 г.

В результате лабораторных испытаний прибор показал следующие характеристики:

- температура 0 – 35 °C, с абсолютной погрешностью 0,07 °C;
- скорость течения 0,05 – 1,0 м/с, с относительной погрешностью 5 %;
- направление течения 0 – 360°, с абсолютной погрешностью ± 5°;
- глубина 0 – 50 м, с абсолютной погрешностью ± 2 м.

Эксплуатация ИСНТ возможна как в стационарном, в составе гидрологиче-

ского комплекса (станции), так и в переносном режимах. Во втором случае питание прибора осуществляется от аккумулятора напряжением 12 В. При ёмкости аккумулятора 4000 А/ч, продолжительность непрерывной работы измерителя составит порядка одних суток. При частоте опроса один раз в 10 мин, продолжительность работы ИСНТ составит, примерно, 20 суток. Дальнейшая эксплуатация прибора в автономном режиме не представляется целесообразной, ввиду возможного обрастания сенсорной головки прибора микроорганизмами, приводящего к потере работоспособности прибора.

На рис. 11 – 13 представлены результаты семичасового измерения на глубине 7 м, проведённого с борта океанографической платформы. Из которых видно, что диапазон скоростей за указанный период составлял 0,14 – 0,28 м/с, диапазон направления течения 0° – 230°. Вращение горизонтальной оси прибора лежало в диапазоне 260° – 330°.

Объяснением полученной информации может быть сравнение с показаниями каналов станции "Бриз", работающей в это время на глубине 10 м.

На рис. 13 представлена зависимость измеренной температуры станцией

"Бриз" от времени, которая в большей мере повторяет эту же зависимость, полученную ИСНТ за тот же отрезок времени (рис. 14).

На рис. 15 провал глубины в течение второго часа можно объяснить подъёмом

погружной части станции "Бриз" примерно на 7 см за счёт возрастания скорости течения. Это же усиление скорости течения зафиксировано и ИСНТ (рис. 10) с 0,18 до 0,27 м/с.

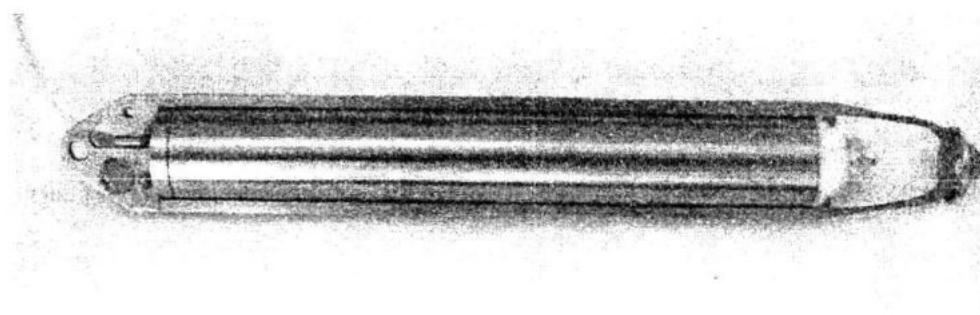


Рис. 9. Внешний вид ИСНТ

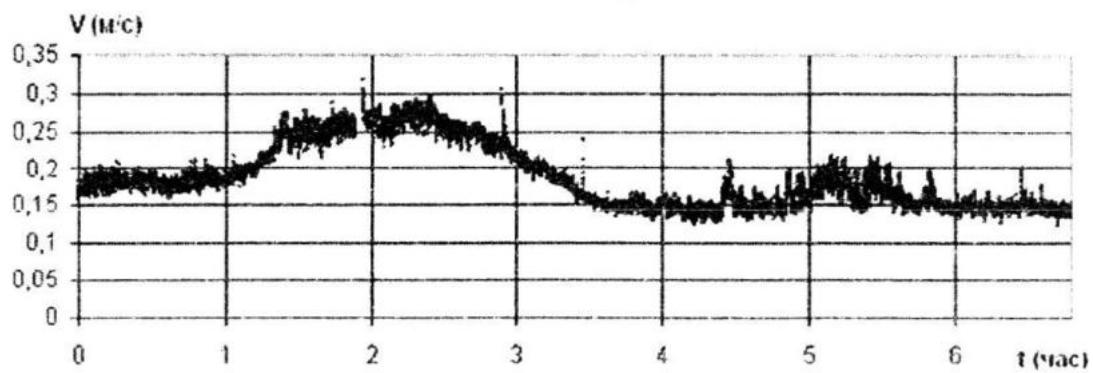


Рис. 10. Зависимость скорости течения от времени

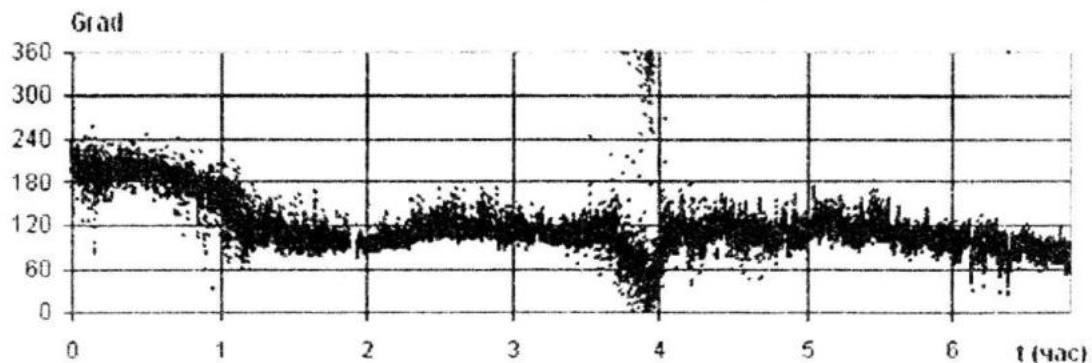


Рис. 11. Зависимость направления течения от времени

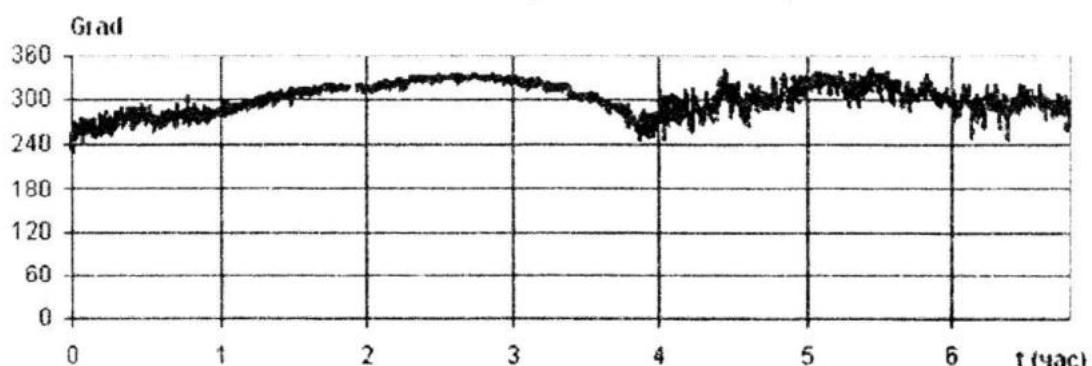
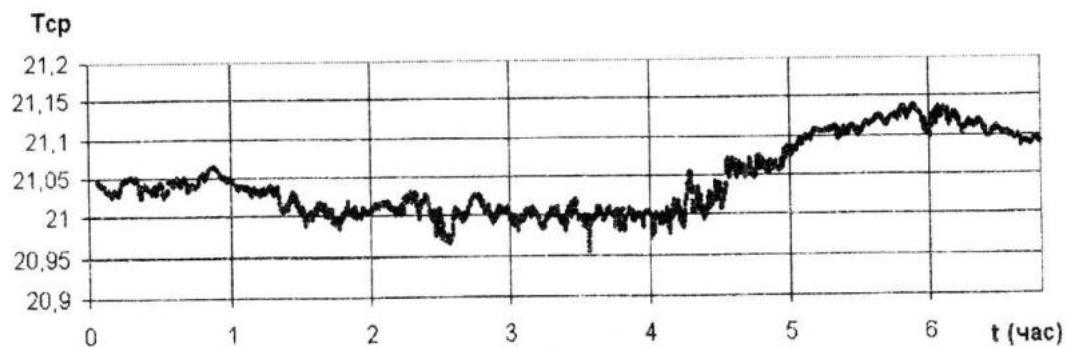
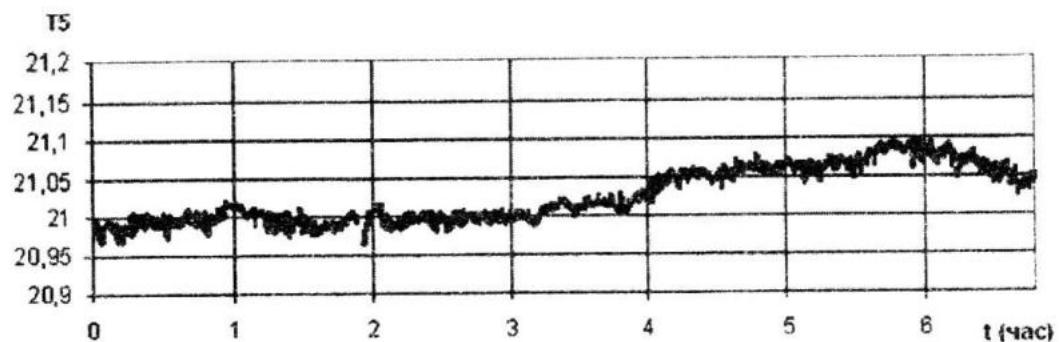


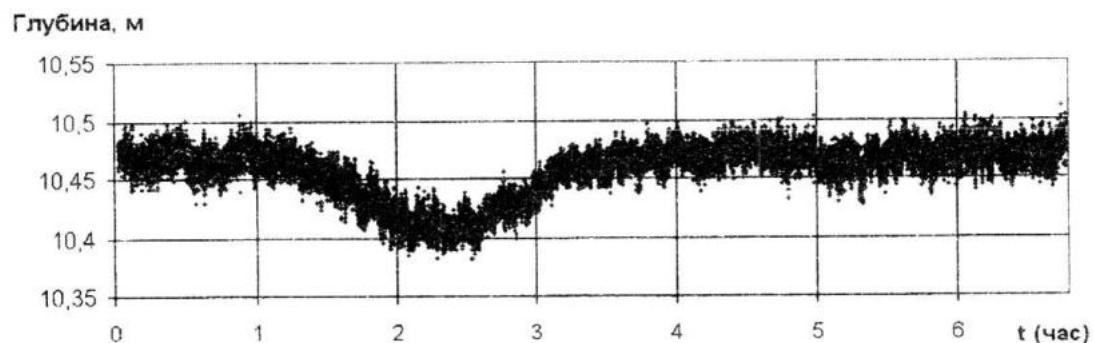
Рис. 12. Зависимость ориентации горизонтальной оси прибора от времени



Р и с. 13. Зависимость температуры среды по показаниям станции "Бриз" от времени



Р и с. 14. Зависимость температуры среды по данным ИСНТ от времени



Р и с. 15. Зависимость глубины станции "Бриз" от времени

**Заключение.** Проведённые лабораторные и натурные испытания ИСНТ показали его работоспособность (особенно на низких скоростях), а также удобство эксплуатации. Отсутствие механических вращающихся частей, малые габариты и вес, низкое энергопотребление делают термоанемометрический измеритель скорости и направления течения конкурентоспособным прибором как для мобильного, так и стационарного применения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гайский П.В., Клименко А.В., Забурдаев В.И., Пеньков М.Н., Греков А.Н. Предварительные результаты опытной эксплуатации морской прибрежной станции "Бриз-1" // Системы контроля окружающей среды. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2009. – С. 27 – 36.