

Автоматизация научных исследований морей и океанов

УДК 532.574.6

Н.А. Греков, А.Н. Греков

Измерители скорости течения для морских и речных условий ИСТ-1 и ИСТ-1М

Дается критический анализ используемых измерителей скорости течений воды ведущих мировых компаний. Формулируется задача создания прибора, соответствующего современным требованиям и обеспечивающего преемственность уже применяемых и вновь разработанных методик измерения и интерпретации данных. Дается краткое описание приборов ИСТ-1 и ИСТ-1М, созданных в МГИ НАН Украины, и алгоритмов работы их измерительных каналов. Приведены метрологические характеристики прибора ИСТ-1 по данным Государственных приемочных испытаний и результаты исследования показателя воспроизводимости для опытной партии этих приборов.

Введение. В реках, морях и океанах течения водных масс вызваны разными явлениями и имеют сложный характер. Основные параметры течения – скорость и направление – характеризуются большой пространственно-временной изменчивостью, и измерять их современными техническими средствами довольно сложно. Трудности связаны не только с недостаточно совершенными методами измерения скорости течения, но и с ограниченной оснащенностью прибора дополнительными вспомогательными измерительными каналами, позволяющими корректировать пространственное расположение прибора.

В настоящее время создано довольно много различных измерителей скорости течений для морских и речных условий. В зависимости от используемого первичного преобразователя они подразделяются на тахометрические, электромагнитные, меточные, термогидрометрические, электрохимические, акустические, обтекания и т.д. [1].

Анализ современных измерителей скорости течения. Проанализируем характеристики измерителей скорости течения ведущих мировых компаний. Основным критерий анализа – это универсальность прибора (способность работать в морских и речных условиях), а также преемственность методик измерения и постановок приборов, которые формировались десятилетиями.

Большинство современных анализируемых приборов работают по принципу доплеровского сдвига частоты акустического сигнала. Исключение составляют измерители *Valeport-106*, *-108*, *-308* (гидрологические вертушки) и *Valeport Midas ECM* с электромагнитным первичным преобразователем.

Измерители компании *Falmouth Scientific, Inc.* [2] предназначены для буйковых постановок и имеют хорошие метрологические характеристики. В них универсальная акустическая головка с шириной базы 14 см устанавливается в различных измерительных системах, включающих *CTD*- и оптические

© Н.А. Греков, А.Н. Греков, 2010

каналы. Указанный диапазон измерения скорости течения от 0 до 6 м/с, но из-за необтекаемости формы этих приборов способы их использования при скорости потока 6 м/с в реальных экспедиционных условиях сомнительны.

Из группы измерителей компании *Nortek AS* [3] прибор *Vector* при измерительной базе порядка 15 см имеет те же недостатки, что и измерители предыдущей группы. Прибор *Vectrino* этой же группы имеет измерительную базу 6 см и предназначен для установки на жесткой платформе и в лабораторных условиях. Прибор *Aquadop* этой компании можно применять при скорости потока до 3 м/с, однако он требует серьезных доработок в части крепления и обеспечения обтекаемости, т.е. фактически ему необходимо создать соответствующий носитель.

Приборы компании *SonTek/YSI* [4] аналогичны приборам фирмы *Nortek*: внешне и по техническим характеристикам они очень похожи. Видимо, эти приборы предназначены для установки на жесткую платформу.

Группа приборов компании *Aanderaa Data Instruments AS* при своих технических характеристиках [5] может быть использована для различных способов постановки. Разработанная акустическая измерительная головка диаметром 120 мм измеряет скорость течения в ближней зоне порядка 2 м при области тени 0,4 м. Однако для малых глубин применять эти приборы не представляется возможным.

Приборы компании *Valeport* (модели 106, 108 и 308) [6] можно использовать при речных и морских измерениях вместо уже существующих механических вертушек. Однако сами эти приборы и являются механическими вертушками, но с дополнительными датчиками определения температуры, глубины и направления течения. Прибор *Midas ECM* этой компании является электромагнитным измерителем скорости течения и предназначен только для морских измерений на соответствующих платформах.

Прибор *ADC* компании *OTT Messtechnik* [7] является измерителем с акустической головкой корреляционного типа. При хороших метрологических характеристиках у прибора есть ряд недостатков, заключающихся в том, что он обязательно должен быть установлен на жесткой платформе или штанге, глубина его погружения не более 10 м, т.е. фактически его можно использовать только на мелководье. Прибор *SLD* этой же компании аналогичен прибору *ADV Ocean* компании *SonTek/YSI*.

Постановка задачи. Из представленного анализа следует, что все приборы, кроме приборов фирмы *Valeport* (модели 106, 108 и 308), не могут применяться взамен гидрометрических вертушек, так как они не соответствуют всем диапазонам измерений разработанных и применяемых методик для определения скорости течения и расхода потока из-за своих конструктивных особенностей. Необходимы серьезные конструктивные доработки этих приборов и разработка новых методик проведения измерений. Игнорирование этого факта может привести к некорректным измерениям, и стыковать результаты новых измерений с архивными окажется невозможным из-за различий динамических характеристик, временного и пространственного усреднения.

Описание разработанных измерителей скорости течения. С учетом этих особенностей в отделе автоматизации МГИ НАН Украины были разработаны измерители скорости течения ИСТ-1 [8, 9] и ИСТ-1М векторного типа для применения в речных и морских условиях взамен гидрометрических вертушек.

Метрологические характеристики измерительных каналов скорости течения, температуры и давления прибора ИСТ-1 по данным Государственных приемочных испытаний представлены в таблице.

**Метрологические характеристики прибора ИСТ-1
по данным Государственных приемочных испытаний**

Измеряемый параметр	Диапазон измерения	Случайная погрешность	Погрешность
Гидростатическое давление, кПа (глубина, м)	0 – 50 (0 – 5) 0 – 100 (0 – 10) 0 – 250 (0 – 25)	$\pm 0,3\%$ ($\pm 0,4\%$)	$\pm 1,6\%$ ($\pm 2\%$)
Скорость течения, м/с	0,04 – 5,00	$\pm 0,04$ м/с	$\pm 5\%$
Температура воды, °С	-2 ... +35	$\pm 0,1$ °С	$\pm 0,6$ °С

В отличие от ИСТ-1 векторный прибор с акустическим каналом определения скорости ИСТ-1М, кроме измерения скорости и направления течения, температуры и глубины, позволяет измерять угол наклона и собственные движения прибора по показаниям установленных в нем акселерометров.

Основные способы использования этого измерителя скорости течения – это автономный вариант, например с постановкой на бую, или возможность работы прибора в телеметрическом режиме (с борта судна, гидрологических мостиков и на штанге).

Внешний вид погружного и бортового блоков прибора ИСТ-1М в варианте телеметрического режима работы представлен на рис. 1.

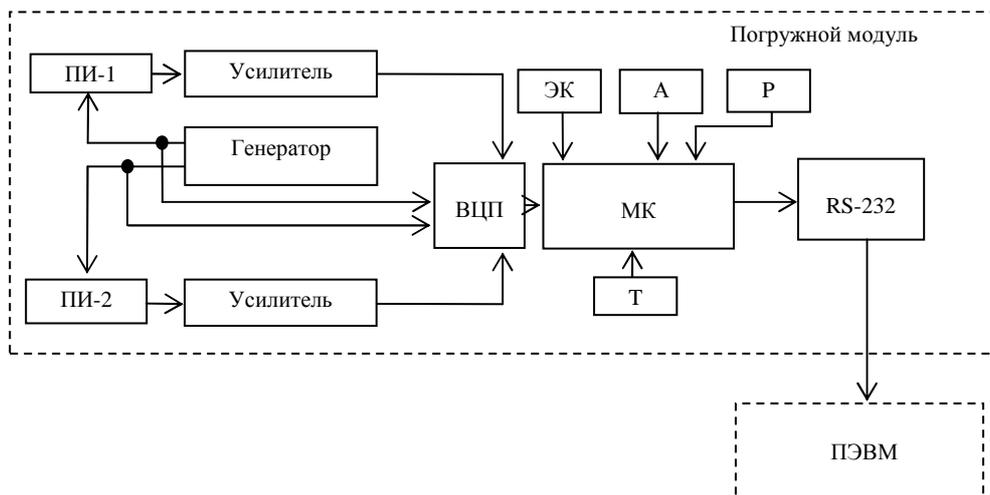


Р и с. 1. Внешний вид погружного и бортового блоков ИСТ-1М

В зависимости от установленного датчика давления глубина погружения прибора может достигать 1000 м.

Прибор имеет крепление для установки в разрез троса на вертлюге или на карданной подвеске, его можно устанавливать на штанге или подсоединять к тросу или кабель-тросу.

На рис. 2 представлена структурно-функциональная схема прибора ИСТ-1М в варианте подключения к ПЭВМ. Измерительный модуль состоит из микроконтроллера (МК); канала измерения скорости течения, в который входят время-цифровой преобразователь (ВЦП), генератор, усилители и пьезоизлучатели (ПИ-1, ПИ-2); канала измерения температуры на основе цифрового датчика температуры (T) компании *Dallas Semiconductor* [10]; канала измерения глубины на основе аналогового датчика абсолютного давления (P) компании *Freescale Semiconductor* [11]; канала определения собственных движений на основе акселерометра (A); канала определения направления течения на основе электронного компаса (ЭК) и преобразователя уровней ($RS-232$).



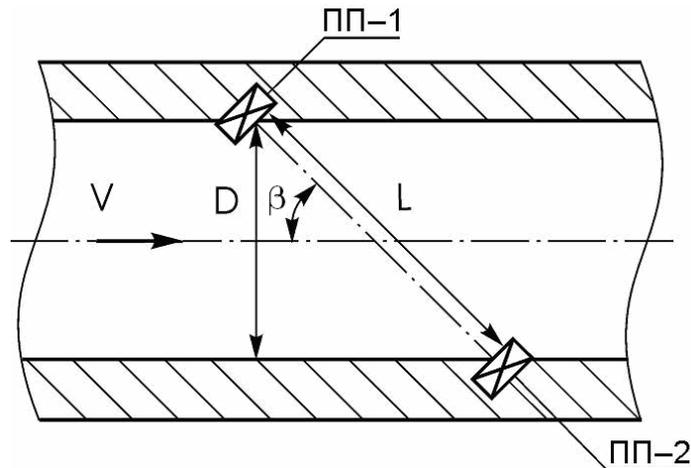
Р и с. 2. Структурно-функциональная схема прибора ИСТ-1М

Предварительная обработка собранных данных и пересылка их со всех измерительных каналов погружного модуля в ПЭВМ осуществляется микроконтроллером *MSP430* компании *Texas Instruments* [12]. Этот микроконтроллер обладает сверхнизким энергопотреблением при хорошем быстродействии (330 мкА на 1 *MIPS*), имеет встроенный 12-разрядный АЦП, соответствует требованиям температурного режима измерителя (от -50 до $+85^{\circ}\text{C}$), аппаратно поддерживает наиболее распространенные интерфейсы связи, которые используются для обмена данными с измерительными каналами и модулем хранения информации, имеет возможность внутрисхемного программирования *Flash*-памяти, что позволяет гибко изменять и обновлять программный код, производить регистрацию данных.

Схема способа измерения скорости течения представлена на рис. 3.

Канал измерения скорости течения прибора ИСТ-1М является каналом акустического типа с двумя пьезопреобразователями (ПП-1, ПП-2), расположенными в измерительной трубе прибора с диаметром D .

Сформированный импульс из МК последовательно подается на пьезопреобразователи ПП-1 и ПП-2, где преобразуется в акустический сигнал, который проходит через жидкость и вновь принимается этими пьезопреобразователями.



Р и с. 3. Схема способа измерения скорости течения

Учитывая, что пьезопреобразователи располагаются в канале диаметром D под некоторым углом β , уравнения для времени распространения ультразвуковых импульсов по направлению движения жидкости τ_1 и против него τ_2 запишем как

$$\tau_1 = \frac{D / \sin \beta}{C + V \cos \beta}, \quad \tau_2 = \frac{D / \sin \beta}{C - V \cos \beta}, \quad (1)$$

где V – скорость течения, C – скорость звука в воде.

Окончательно выражение для определения скорости течения можно записать так:

$$V = \frac{D (\tau_2 - \tau_1)}{\tau_1 \tau_2 \sin 2\beta}. \quad (2)$$

Одновременно можно рассчитать скорость распространения звука в воде:

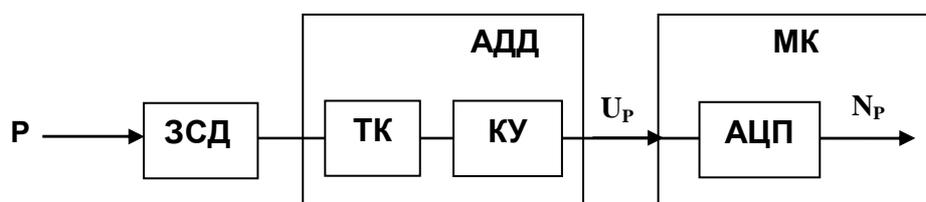
$$C = \frac{D (\tau_2 + \tau_1)}{\tau_1 \tau_2 \sin 2\beta}. \quad (3)$$

Для измерения глубины нахождения приборов используется канал измерения гидростатического давления, блок-схема которого представлена на рис. 4.

Связь давления P с глубиной выражается зависимостью

$$P = P_a + \rho g H, \quad (4)$$

где P – абсолютное давление на глубине H ; P_a – атмосферное давление; ρ – плотность жидкости; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$.



Р и с. 4. Блок-схема канала измерения гидростатического давления

Давление воды P воздействует через защитный согласователь давления (ЗСД) на абсолютный датчик давления (АДД), который имеет встроенный температурный компенсатор (ТК) и калибровочный усилитель (КУ). Напряжение U_p с АДД поступает на вход 12-разрядного АЦП, находящегося в МК, где преобразуется в последовательный код N_p .

Канал определения собственных движений прибора ИСТ-1М базируется на трехосевом акселерометре фирмы *STMicroelectronics* [13], представляющем собой микроэлектромеханическую систему.

Канал определения направления течения основан на интегрированном модуле компаса компании *Honeywell* [14]. В качестве датчика в нем используется двухосевой магнитно-резистивный сенсор.

Данный компас полностью удовлетворяет техническим требованиям нашего измерителя: рабочий диапазон температур от -20 до $+70^\circ\text{C}$, точность определения направления $2,5^\circ$, разрешение 1° . Приведенные паспортные характеристики обеспечиваются только при нахождении прибора в горизонтальной плоскости, при изменении его наклона точность ухудшается.

Для исключения ошибки определения направления течения из-за крена и тангажа прибора предложен следующий алгоритм [14]. Сначала по показаниям акселерометров рассчитываются углы тангажа и крена по следующим формулам:

$$\theta = \arctg \left[\frac{X_{\text{accel}}}{\sqrt{X_{\text{accel}}^2 + Z_{\text{accel}}^2}} \right], \quad (5)$$

$$\phi = \arctg \left[\frac{Y_{\text{accel}}}{\sqrt{Y_{\text{accel}}^2 + Z_{\text{accel}}^2}} \right],$$

где θ – угол тангажа; ϕ – угол крена; X_{accel} – ускорение вдоль прибора; Y_{accel} – ускорение поперек прибора в горизонтальной плоскости; Z_{accel} – ускорение поперек прибора в вертикальной плоскости.

Затем проводится расчет проекций магнитных векторов на горизонтальную плоскость по показаниям магнитных сенсоров с учетом известных углов наклона прибора [15]. По полученным значениям X и Y проекций векторов рассчитывается азимут направления течения:

$$\text{Azimuth} = \arctg(Y/X). \quad (6)$$

Поскольку на прибор может действовать линейное ускорение (что приведет к ошибке определения наклона прибора и, в свою очередь, к ошибке определения азимута), то дополнительно производится проверка на наличие этого ускорения, т. е. общее ускорение прибора должно быть близким к 1 g:

$$a_{\text{i\u0002}} = \sqrt{X_{\text{accel}}^2 + Y_{\text{accel}}^2 + Z_{\text{accel}}^2}. \quad (7)$$

Для опытной партии приборов ИСТ-1 исследовался также показатель воспроизводимости [16]. Среднее квадратическое значение показателя воспроизводимости в диапазоне скоростей течений 0,054 – 2,15 м/с вычислялось по формуле

$$\sigma_{\hat{a}} = \sqrt{\frac{\sum (\Delta V_{\hat{a}})_{i,j}^2}{n-1}} = 0,007, \quad (8)$$

где $n = 72$ – общее число отсчетов.

Показатель воспроизводимости для приборов с учетом нормального распределения при значениях доверительной вероятности $\alpha = 0,95$ и $\alpha = 0,997$ не превысит $\Delta V_{\hat{a}} = t\sigma_{\hat{a}}$, т.е. $\Delta V_{\hat{a}} = \pm 0,015$ м/с и $\Delta V_{\hat{a}} = \pm 0,023$ м/с при коэффициентах Стьюдента $t = 2,055$ и $t = 3,3$ соответственно.

Таким образом, составляющая погрешности измерителей скорости течения, вызванная показателем воспроизводимости в диапазоне скоростей течений от 0,054 до 2,15 м/с, не превышает $\Delta_{\hat{a}} = \pm 0,015$ м/с и $\Delta_{\hat{a}} = \pm 0,025$ м/с, что соответствует значениям относительной погрешности, приведенным к верхнему пределу измерений (2,15 м/с), $\delta_{\hat{a}} = \pm 0,7\%$ и $\delta_{\hat{a}} = \pm 1,2\%$ при доверительной вероятности $\alpha = 0,95$ и $\alpha = 0,997$ соответственно.

Выводы. В отделе автоматизации МГИ НАН Украины разработаны и созданы измерители скорости течения ИСТ-1 и его модификация для морских условий ИСТ-1М. Прибор ИСТ-1 прошел Государственные контрольные испытания и занесен в реестр измерительных средств Украины. Выпущена опытная партия этих измерителей (90 штук). Приборы ИСТ-1 несколько лет используются на сети гидрологических постов Государственной гидрометеорологической службы МЧС Украины, а также в Днепроводхозе и на заводе ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог».

Универсальность приборов ИСТ-1 и ИСТ-1М и преемственность методик измерения позволяют надеяться, что разработанные измерители скорости течения найдут широкое применение в практике гидрологических и гидрофизических исследований водных объектов окружающей среды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Степанюк И.А. Океанологические измерительные преобразователи. – Л.: Гидрометеоздат, 1986. – 270 с.
2. www.falmouth.com.
3. www.nortek-as.com.
4. www.sontek.com.
5. www.aadi.com.

6. www.valeport.co.uk.
7. www.ott-hydrometry.de.
8. Греков Н.А., Гайский П.В., Мишууров В.Ж. и др. Переносной измеритель скорости течения ИСТ-1 // Системы контроля окружающей среды. Средства и мониторинг. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2005. – С. 35 – 40.
9. Греков Н.А., Греков А.Н., Даниленко М.Я. и др. Исследование акустического канала измерителя скорости течения // Системы контроля окружающей среды. Средства, модели и мониторинг. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2007. – С. 28 – 31.
10. www.maxim-ic.com.
11. www.freescale.com.
12. www.ti.com.
13. [www.kionix.com / App-Notes / AN 005% 20 Tilt% 20Sensing. pdf](http://www.kionix.com/App-Notes/AN005%20Tilt%20Sensing.pdf).
14. www.honeywell.com.
15. Caruso M.J. Applications of magnetic sensors for low cost compass systems // www.honeywell.com.
16. Забурдаев В.И., Кучма А.Г., Каширин С.В. Результаты исследования воспроизводимости показаний измерительного канала скорости течения в опытной партии приборов ИСТ-1 // Системы контроля окружающей среды. Средства, информационные технологии и мониторинг. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2008. – С. 109 – 111.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,
Севастополь
E-mail: oaoimhi@inbox.ru

Материал поступил
в редакцию 05.02.09
После доработки 31.03.09

АНОТАЦІЯ Дається критичний аналіз використуваних вимірювачів швидкості течії води провідних світових компаній. Формулюється задача створення приладу, який відповідає сучасним вимогам і забезпечує спадкоємність вже вживаних і нових розроблених методик вимірювання та інтерпретації даних. Дається короткий опис приладів ВШТ-1 і ВШТ-1М, створених в МГІ НАН України, і алгоритмів роботи їх вимірювальних каналів. Наведені метрологічні характеристики приладу ВШТ-1 за даними Державних приймальних випробувань і результати дослідження показника відтворюваності для дослідної партії цих приладів.

ABSTRACT The applied at present water current meters produced by the leading world companies are critically analyzed. The task to create a device corresponding to modern requirements and providing succession of the already used and newly developed methods of measurements and data interpretation is formulated. The devices IST-1 and IST-1M developed in MHI of NASU and algorithms of operation of their measuring channels are briefly described. Based on the data of state acceptance tests, the results of study of reproducibility index of the pilot lot of these instruments and metrological characteristics of the device IST-1 are represented.