

ТЕРМОАНЕМОМЕТРИЧЕСКИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ СКОРОСТИ ТЕЧЕНИЯ ИСТ-2

*В.А.Гайский, П.В.Гайский,
А.В.Клименко, А.С.Бондаренко,
А.Ф.Урожай*

Морской гидрофизический институт
НАН Украины
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2
E-mail: oaoi@alpha.mhi.iuf.net

Приводится описание устройства, характеристик и методов использования нового термоанемометра для водных потоков.

Введение. В настоящее время измерение скорости течения в реках, водотоках и озерах в основном осуществляется электро-механическими гидрометрическими вертушками различных моделей. За 200 лет своего существования эти приборы конечно же достигли определенного совершенства и продолжают модернизироваться. Однако их конкурентоспособность по стоимости по сравнению с другими измерителями, не имеющими подвижной механики (электромагнитными, акустическими и термоанемометрическими), продолжает падать и они уступают по уровню автоматизации измерений и обработки, представления и регистрации данных, по удобствам использования и стоимости эксплуатации.

Одним из наиболее простых и дешевых приборов для измерения скорости потоков газов и жидкостей является термоанемометр. Термоанемометры для воздушных сред широко используются в промышленных установках, в системах кондиционирования помещений, на транспорте.

До настоящего времени термоанемометры не получили распространения в гидрометеорологии для массовых измерений скоростей ветра и течений. Основной причиной этого является низкая точность из-за зависимости градуировочной характеристики не только от скорости потока, но и от физических параметров среды, влияющих на теплообмен датчика со средой, плотности, теплопроводности, кинематической вязкости и удельной теплоемкости, которые в свою очередь зависят от температуры и давления. Кроме того, на градуировочную характеристику влияют режим обтекания потоком (ламинарный или турбулентный) и состояние поверхности датчика [1, 2, 3].

С другой стороны, развитие элементной базы электроники и возможностей цифровой обработки данных позволяют в значительной мере преодолеть эти трудности.

Общее описание измерителя. В отделе автоматизации океанографических исследований МГИ НАНУ разработан измеритель скорости течения переносной термоанемометрический ИСТ-2.

Измеритель предназначен для измерений, индикации и регистрации глубины, температуры воды и скорости течения в водотоках с индикацией даты и текущего времени. Измеритель может использоваться на гидрологических постах с берега, береговых сооружений, мостов, плавсредств и буйковых носителей. В применениях заменяет гидрометрическую вертушку.

Общий вид измерителя представлен на рисунке 1.

Измеритель может использоваться на штанге для глубин до 3 м, на тросе или кабеле для глубин до 25 м. Конкретная максимальная глубина определяется установленным датчиком давления.

Измерение производится в автономном режиме работы погружного блока с накоплением данных в энергонезависимой памяти или в телеметрическом режиме с отображением данных на дисплее бортового блока или ПЭВМ.

Встроенные в микроконтроллере программы обеспечивают управление измерениями и первичной обработкой данных.

Диалоговая система для ПЭВМ обеспечивает полную обработку и представление данных в графической форме в реальном масштабе времени.

Климатическое исполнение прибора согласно ГОСТ 15150-69, но в диапазоне рабочих температур для бортового блока от минус 30 до 50 °С на воздухе и для погружного блока от минус 2 до 35 °С в воде.

Степень защиты от влаги и пыли на воздухе – IP58 согласно ГОСТ 14254.

В состав измерителя входят:

- блок погружной БП;
- блок бортовой ББ;
- зарядное устройство ЗУ;
- персональная ЭВМ (ПЭВМ);
- кабель соединительный КС;
- кабель соединительный грузонесущий КСГ;
- программное обеспечение.

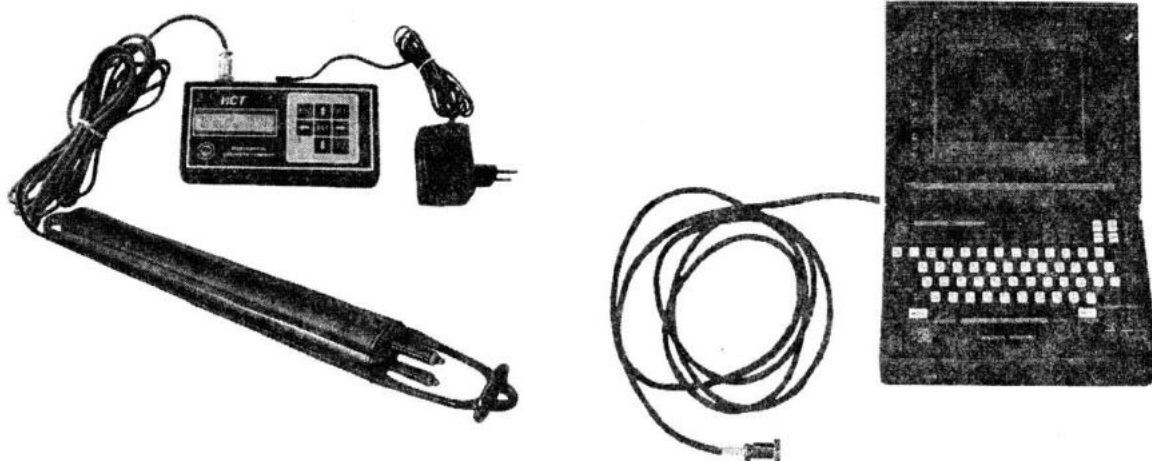


Рисунок 1 – Общий вид измерителя ИСТ-2

Измеритель комплектуется в двух вариантах:

- в состав варианта ИСТ-2-1 входят БП, ББ, ЗУ, КСГ;

- в состав варианта ИСТ-2-2 входят БП, ПЭВМ, ЗУ, КСГ, КС.

БП обеспечивает измерение на различных глубинах гидростатического давления, температуры воды и скорости течения, преобразование сигналов измерительных каналов в цифровую форму, первичную обработку данных по градуировочным характеристикам, осреднение на заданном интервале, регистрацию данных в энергонезависимой памяти и передачу данных в ББ или ПЭВМ.

ББ обеспечивает прием данных от блока погружного, отображение данных на жидко-кристаллическом дисплее, регистрацию

данных в энергонезависимой памяти, считывание данных из памяти в ПЭВМ или передачу в канал связи.

ЗУ обеспечивает заряд аккумуляторов модулей энергоснабжения БП и ББ от сети переменного тока напряжением (220 ± 22) В, частотой (50 ± 1) Гц.

Программное обеспечение содержит программы управления измерениями первичной обработки данных микроконтроллеров МПиУ БП и МУ ББ и диалоговую систему для ПЭВМ, которая обеспечивает:

- полную обработку данных с представлением результатов в графической форме;
- выдачу результатов измерений в стандартной форме.

Метрологические характеристики ИСТ-2 представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Метрологические характеристики ИСТ-2

Измеряемый параметр	Диапазон измерения	Случайная погрешность	Погрешность
Гидростатическое давление, кПа (глубина, м)	0 – 250	$\pm 0,3 \%$	$\pm 1,6 \%$
	(0 – 25)	$(\pm 0,4 \%)$	$(\pm 2 \%)$
Температура воды, °С	-2 – 35	$\pm 5 \cdot 10^{-4}$	$\pm 0,03$
Скорость течения, м/с	0,03 – 5,0	$\pm 0,5 \%$	$\pm 5 \%$
	0,03 – 2,0	$\pm 0,001$	$\pm 3 \%$
	2,0 – 5,0	$\pm 0,025$	$\pm 5 \%$

Устройство и работа измерителя.
Структурная схема измерителя представлена на рисунке 2.

GPS, ПЭВМ, канал связи

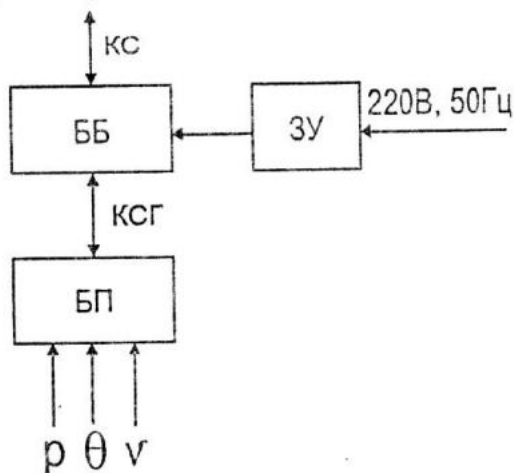


Рисунок 2 – Структурная схема ИСТ-2

На рисунке 3 представлена структурная схема блока погружного, в состав которого входят измерительные каналы гидростатического давления ИКГД, температуры ИКТ, скорости течения ИКСТ, ускорения ИКУ (типа ADXL311), модуль преобразования и управления МПИУ, модуль памяти МП1, таймер Т, модуль энергопитания МЭП.1, модем связи с бортовым блоком МС.1.

Все аналоговые измерительные каналы имеют выходы по напряжению, которые поданы на входы аналого-цифровых преобразователей в МПИУ.

ИКГД содержит чувствительный элемент (MPX4250DP фирмы Motorola) с усилителем.

ИКТ содержит резисторный датчик температуры В1, включенный последовательно с двумя образцовыми резисторами R_{01} и R_{02} (типа С2-29А) в цепь генератора тока ГТ, реализованного на транзисторе IRF 7309, операционном усилителе AD 8027 и источнике образцового напряжения REF 1004-1,2.

Для измерения температуры образцовых резисторов используется измерительный канал температуры цифровой ИКЦ (типа DS 18B20), выход которого подан на вход микропроцессора в МПИУ.

ИКСТ содержит резисторный датчик температуры В2 с нагревателем R_H , третий

образцовый резистор R_{03} и управляемый источник напряжения УИН, реализованный на микросхеме LT 1084 с цифровыми управляющими входами А1 и А2. Нагреватель R_H (выполненный из материала с малым ТКС ($9,3 \cdot 10^{-6}$) через образцовый резистор R_{03} подключен к выходу УИН.

Резисторные датчики В1 и В2 и образцовые резисторы R_{01} и R_{02} включены в измерительные цепи по четырехпроводной схеме и снимаемые с них напряжения подаются на дифференциальные входы аналого-цифрового преобразователя АЦП.1 в МПИУ.

Выходы ИКГД и акселерометра ИКУ поданы на входы аналого-цифрового преобразователя АЦП.2 (типа MCP 3208) в МПИУ.

МПИУ содержит микропроцессор МП (типа ATMEGA 8L), аналого-цифровой преобразователь АЦП.1 (типа ADS 1216) и аналого-цифровой преобразователь АЦП.2 (типа ИСР 3208). Цифровые выходы АЦП.1 и АЦП.2, а также ИКТЦ поданы на входы МП, другие входы которого соединены с таймером Т (PCF 8583), модулем памяти МП-2 (Flash 4Мбайт, типа AT45 DB 321), модемом связи МС-1 стандарта RS-232 (MAX 3232).

Модуль энергопитания МЭП.1 содержит источник напряжения на 7,2 В емкостью 2 А/ч.

В качестве чувствительных элементов в датчиках температуры используются платиновые датчики серии HEL фирмы Honeywell.

Микросхема ADS1216 является 8-канальным (4-дифференциальных канала) аналого-цифровым преобразователем, с максимальным разрешением 24 разряда, и обеспечивающим преобразование с разрешением 21 разряд при 10 преобразованиях в секунду.

Емкость модуля памяти МП.1 на микросхеме AT45DB321 номинально 4 Мбайта и может быть увеличена до 32 Мбайт.

Микросхема MCP3208 фирмы Motorola является 12 разрядным аналого-цифровым преобразователем, обслуживающим измерительные каналы гидростатического давления и ускорения.

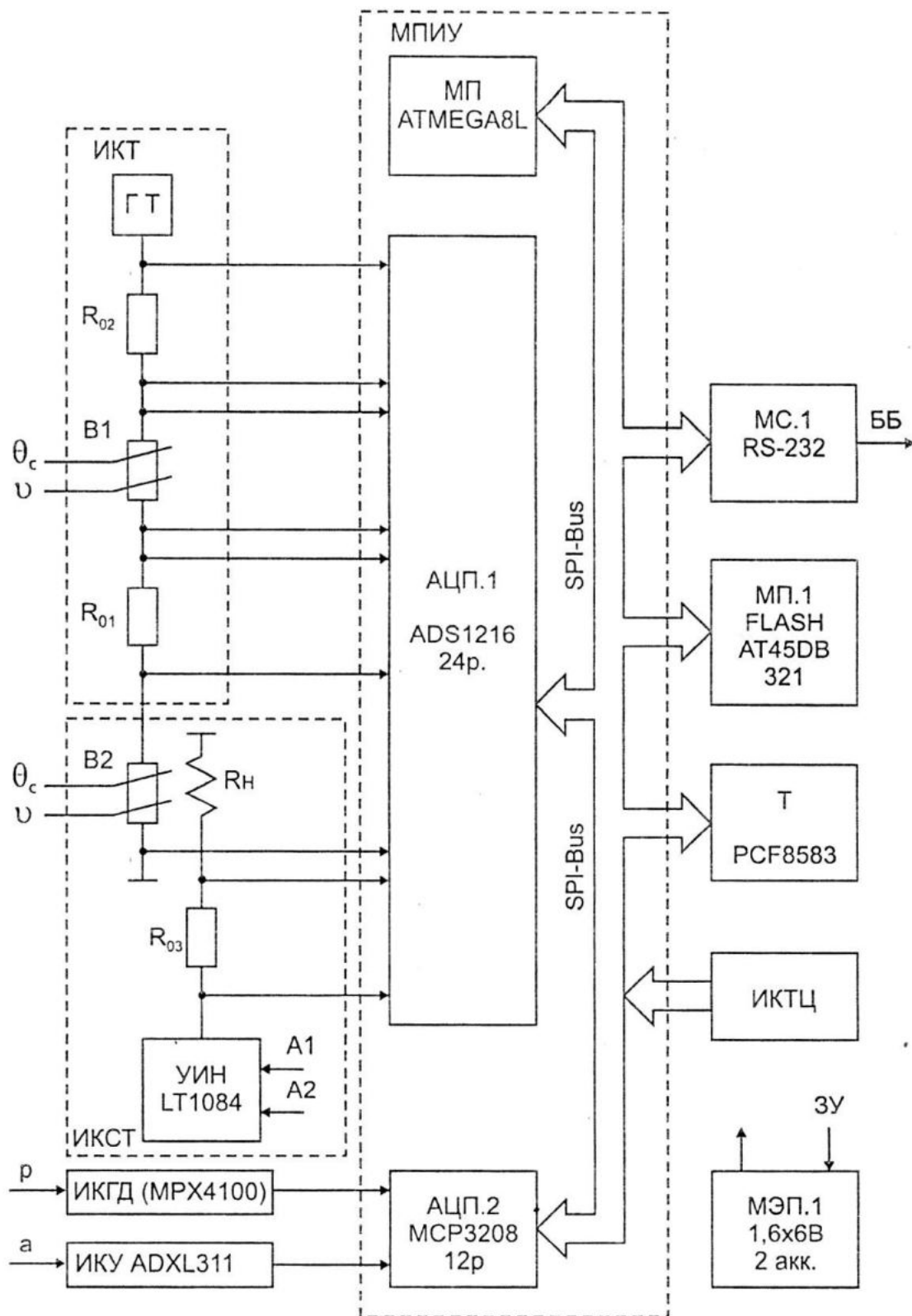


Рисунок 3 – Структурная схема БП ИСТ-2

Стандартный интерфейс RS-232 (до скорости 9600 бод) используется для связи БП и ББ.

Блок погружной БП измерителя работает следующим образом.

В память МП заносится программа опроса измерительных каналов, первичной обработки измерительных данных, включая вычисления измеренных величин по градуировочным характеристикам и осреднения, привязки данных ко времени, накопление данных в модуле памяти МП.1.

В автономном режиме работы БП, с целью экономии энергопитания и памяти измерения на воздухе не производятся. Для этого МПИУ периодически опрашивает каналы температуры и скорости течения и прекращает на некоторое время работу, если разность температур горячего и холодного датчиков температуры превышает 8°C, что свидетельствует о нахождении БП на воздухе.

При погружении БП в воду реализуется рабочая программа измерений и данные накапливаются в памяти МП.1. После окончания измерений БП подключается к ББ или ПЭВМ и данные из памяти МП.1 считываются.

В телеметрическом режиме работы БП управление измерениями осуществляется с ББ или ПЭВМ.

Структурная схема бортового блока представлена на рисунке 4.

В состав устройства управления и индикации информации ББ входят: модуль управления МУ, выполненный на микропроцессоре Atmega 16L и клавиатуре К типа Н11. Модуль индикации МИ (WH 1602 Б) – двухстрочный индикатор на 16 символов в строке. Накопление информации осуществляется в модуле памяти МП-2, реализованной на микросхеме AT 45DB081.

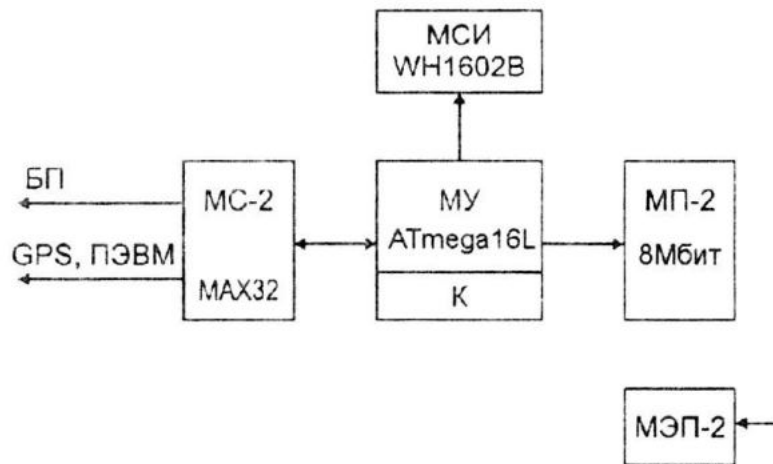


Рисунок 4 – Структурная схема ББ ИСТ-2

Модуль сопряжения МС-2 выполнен на микросхеме типа МАХ 2323.

Для электропитания и подзарядки служит модуль электропитания МЭП-2, в состав которого входят микросхемы RE7309, LM2931 и RE7309.

Принцип измерения скорости течения. В измерителе используются два разных по размерам и теплоемкости датчика

температуры, один из которых может подогреваться с разной мощностью. Для измерения скорости потока используется эмпирическая зависимость от нее коэффициента теплообмена. В общем случае уравнение теплового баланса для сосредоточенного датчика температуры, эквивалентного инерционному звену 1-го порядка по температуре, имеет вид

$$\theta_c(t) = \theta_i(t) + \frac{1}{\alpha_i(t)S_i} [m_i c_i \theta_i(t) - P_i(t)], \quad i = \overline{1, 2},$$

где $\theta_c(t)$ – температура среды;

$\theta_i(t)$ – температура i-го датчика;

$\theta'_i(t)$ – производная температуры i -го датчика;

$P_i(t)$ – мощность нагрева i -го датчика;

m_i, c_i, S_i – масса, удельная теплоемкость и площадь внешней поверхности теплообмена i -го датчика;

$\alpha_i(t)$ – коэффициент теплообмена i -го датчика со средой.

Кроме способа с использованием двух подогреваемых датчиков возможна реализация всех других способов определения потока теплообмена $\alpha_1 S_1$ нагретого датчика [4, 5]. В приборе для определения текущего $\alpha_1(t) S_1$ используется формула статического режима

$$\alpha_1(t) S_1 = \frac{P_1}{\theta_1(t) - \theta_2(t)},$$

где $P_1 = \text{const}$ – мощность нагрева 1-го датчика;

θ_1 и θ_2 – температуры 1 и 2 датчиков.

Градуировочная характеристика по каналу скорости имеет вид (один из вариантов)

$$V(t) = a_0 + a_1 \Delta\theta^k(t),$$

где a_0, a_1, k – градуировочные коэффициенты.

$$\Delta\theta(t) = \theta_1(t) - \theta_2(t)$$

Градуировочные коэффициенты определяются на гидродинамическом стенде

при поверке или в рабочем режиме по формулам

$$k = \frac{\ln[\Delta\theta'(t_2)g(t_1)] - \ln[\Delta\theta'(t_1)g(t_2)]}{\ln\Delta\theta(t_1) - \ln\Delta\theta(t_2)} + 1,$$

$$a_1 = \frac{g(t)}{K\Delta\theta^{k-1}(t)\Delta\theta'(t)},$$

$$a_0 = -a_1 \Delta\theta_0^k,$$

где $\Delta\theta'(t)$ – производная от разности температур датчиков;

$g(t)$ – ускорение прибора в момент времени t , вызванное собственным принудительным или свободным движением и регистрируемое акселерометром;

$\Delta\theta_0^k$ – разность температур датчиков при $V = 0$ при помещении датчиков в сосуд с водой среды без движения воды и датчиков.

Для достижения необходимой точности могут использоваться и другие градуировочные характеристики, в том числе учитывающие изменения температуры и давления среды [6].

Например, на рисунке 5 представлена градуировочная характеристика, аппроксимируемая полиномом 7-го порядка.



Рисунок 5 – Градуировочная характеристика канала скорости

Управление измерителем с ББ. На рисунке 6 изображена схема меню ББ. Все возможные направления перемещения изображены стрелками с указанием нажимаемых клавиш управления. Через все основные режимы навигация осуществляется стрелками «вверх» и «вниз».

Рассмотрим основные режимы управления измерителем с ББ.

Включение питания осуществляется клавишей SET. Из любого режима измеритель можно выключить нажатием клавиши ESC.

Поскольку контрастность экрана изменяется от температуры, то ее настройка осуществляется клавишами F1 и F2.

Возможны два режима измерения: режим с однократным выводом информации и режим с осреднением за заданное время.

В режиме измерения отображается следующая информация: скорость течения (м/с), температура воды (°C) и глубина погружения (м) (в 1 режиме); средняя скорость течения (м/с), средняя глубина погружения осреднения (с), средняя температура воды (°C), время осреднения (с).

В любом из режимов измерения можно активировать запись измерений в энергонезависимую память.

В режиме калибровки отображаются калибровочные коэффициенты канала измерения скорости. Калибровка обязательна при каждом новом выходе на полигон. Время осреднения устанавливается от 5 до 99 секунд и по умолчанию составляет 30 секунд.

В режиме отображения времени высвечиваются часы, минуты, год, месяц, день и возможна настройка.

В режиме работы с памятью возможны: выбор записи для просмотра, передача данных в компьютер, формирование памяти, управление записью в погружном блоке.

В режиме управления нагревателя можно установить четыре градации нагрева и выключить нагрев.

В режиме просмотра прошивки градуировочных коэффициентов канала скорости проводится контроль текущих значений коэффициентов, количество изменений и дата последнего изменения. Изменение градуировочных коэффициентов проводится на специальном стенде.

Программное обеспечение ПЭВМ.

Диалоговая система для ПЭВМ предназначена для съема, отображения, обработки и регистрации измерительной информации с ИСТ-2, поступающей через последовательный порт COM (интерфейс RS232) или из ранее записанного файла измерений, а также чтения флэш-памяти прибора. Во входных данных содержатся коды измерительных каналов датчиков давления, скорости течения и температуры.

В процессе обработки с помощью заданных градуировочных коэффициентов вычисляются физические значения давления (в МПа), глубины (в метрах), скорости течения (в м/с) и температуры среды измерения (в градусах Цельсия). На графики эти данные выдаются в соответствии с заданными параметрами осреднения и фильтрации.

Регистрация измерительной информации может осуществляться в файл кодов измерений (типа BYTE (*.byt)) без обработки и в текстовый файл результатов вычисленных физических величин с привязкой по времени, номеру измерений и глубине (типа TEXT (*.dat / *.txt)). При необходимости графики могут быть выведены с заданными установками на печать или в графические файлы стандартного формата.

Вид основного и дополнительных окон графического интерфейса программной системы представлен на рисунке 7.

Основное окно управления (1) предназначено для управления связью с измерителем, параметрами регистрации измерительной информации и отображением дополнительных окон и настроек программы.

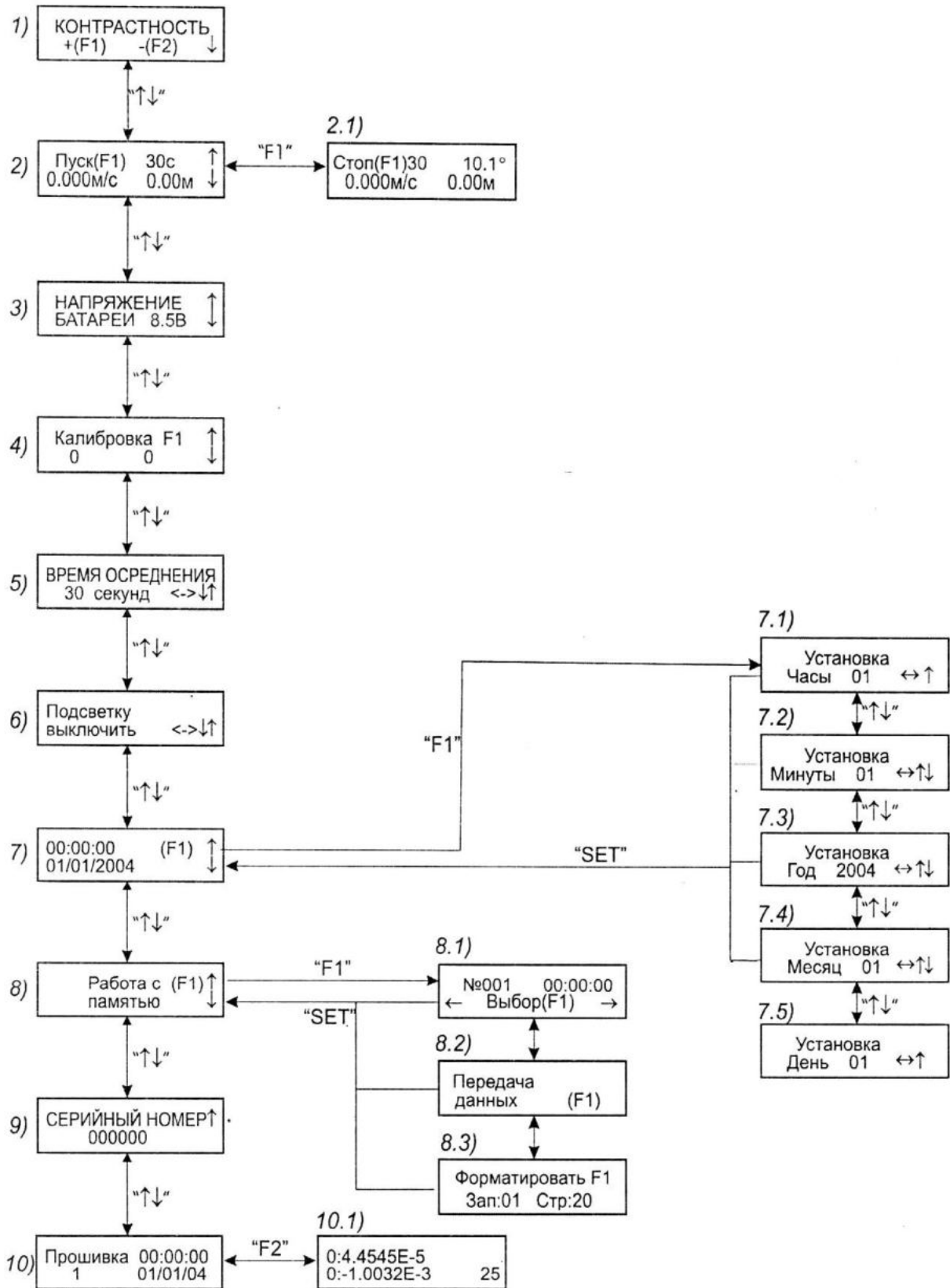


Рисунок 6 – Схема меню ББ ИСТ-2

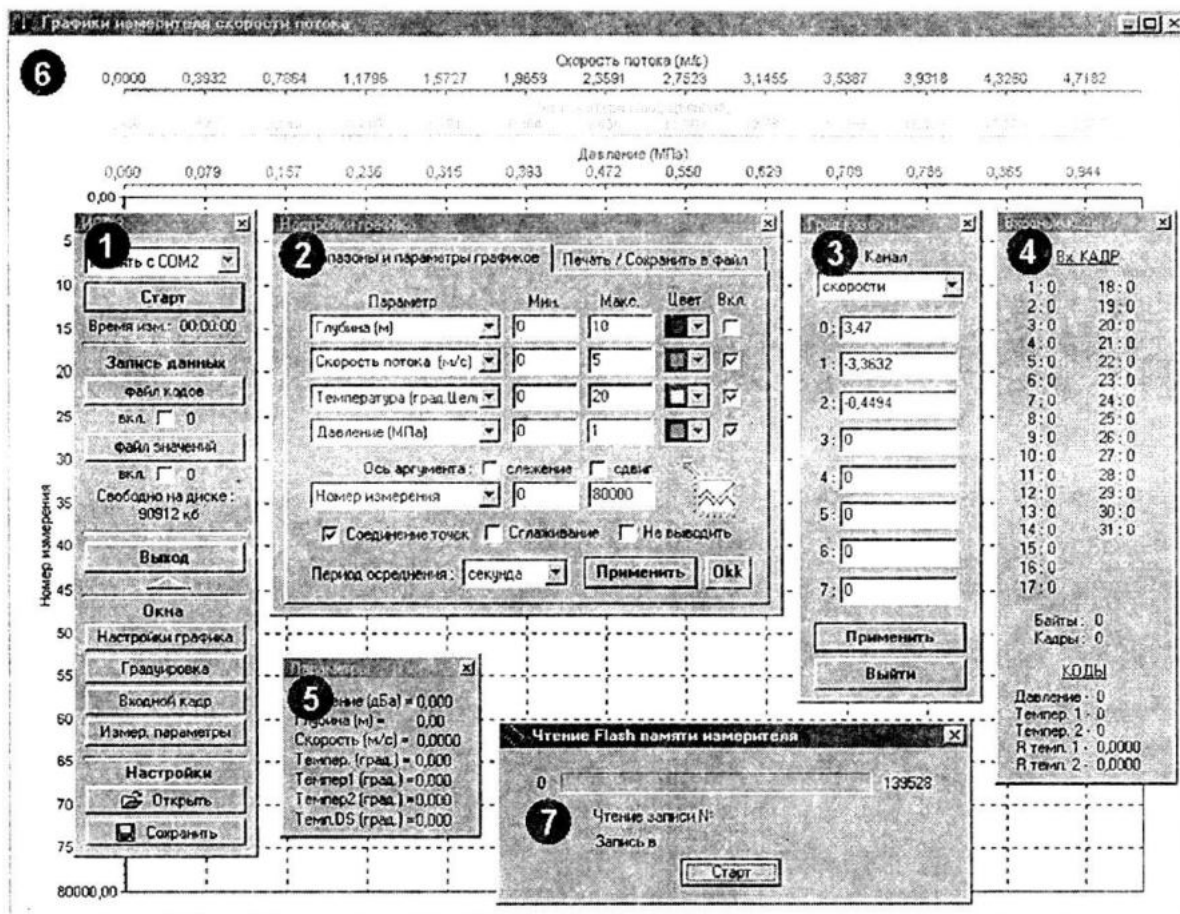


Рисунок 7 – Вид интерфейса диалоговой программной системы для работы с ИСТ-2

Окно (2) предназначено для настройки вывода графиков на экран дисплея, графический файл и печать. Окно (3) предназначено для ввода, редактирования и записи градуировочных коэффициентов измерительных каналов прибора. Окно (4) отображает состояние связи с измерителем по содержанию измерительного кадра и кодам измерительных каналов. Окно (5) отображает вычисленные значения физических величин. Окно (6) предназначено для вывода и масштабирования с помощью клавиатуры и мыши заданных графиков в зависимости от времени, номера измерений, давления или глубины. Окно (7) предназначено для работы с флэш-памятью БП или ББ (чтение и форматирование).

При расчете окончательных физических величин используются алгоритмы осреднения и фильтрации. Вычисление скорости

потока в соответствии с дополнительной градуировкой осуществляется с поправкой на температуру среды и давление.

Обобщенная блок-схема программы представлена на рисунке 8.

Использование измерителя. Блок погружной измерителя устанавливается в воде аналогично гидрометрическим вертушкам.

При работе со штангой для глубин до 3 м и малых скоростей течения схема постановки показана на рисунке 9.

БП перемещается на патрубке по штанге с помощью грузонесущего кабеля (в телеметрическом режиме) или троса в автономном режиме.

БП выдерживается на фиксированных горизонтах в течение 1 минуты.

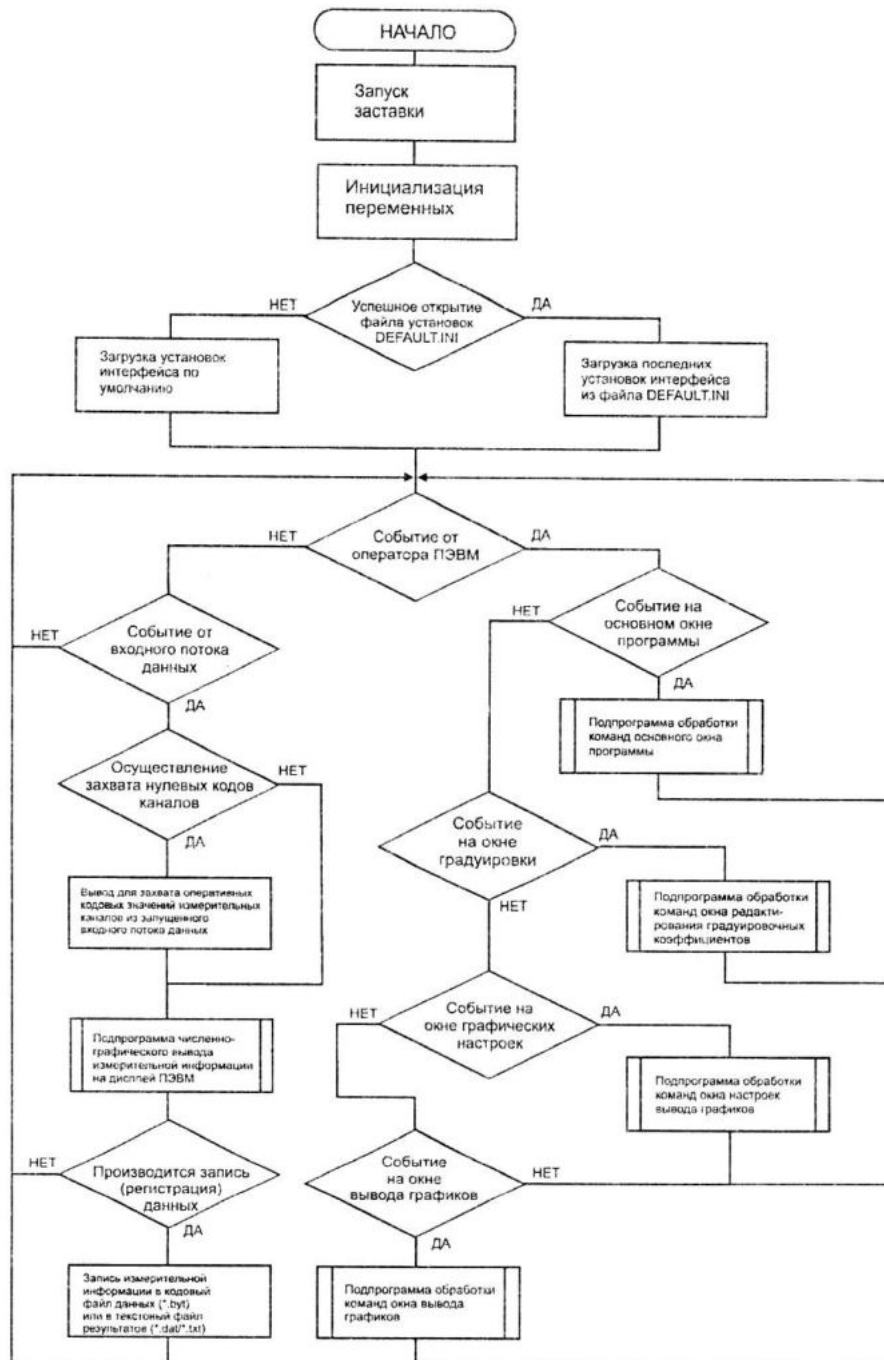


Рисунок 8 – Обобщенная блок-схема диалоговой программной системы для работы с ИСТ-

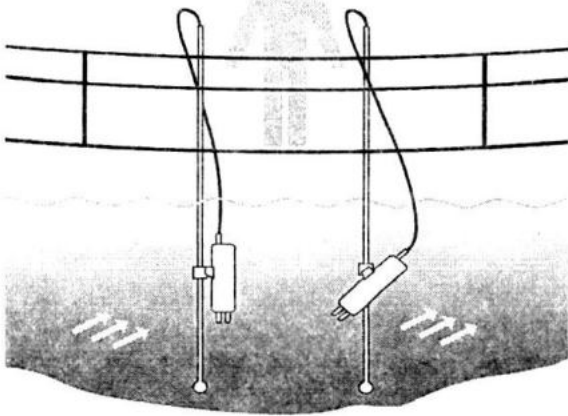


Рисунок 9 – Схема постановки при работе со штангой для глубин до 3 м и малых скоростей течения

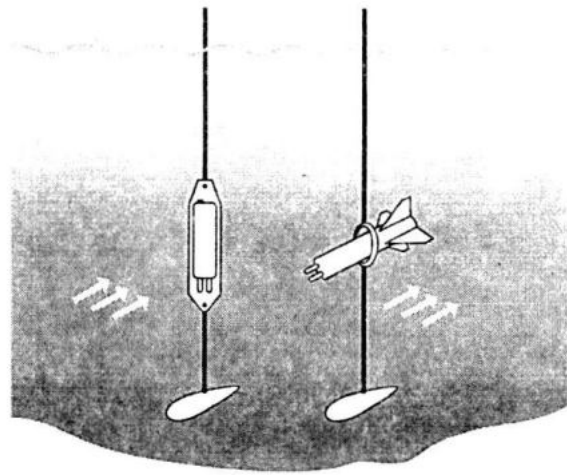


Рисунок 10 – Схема постановки с мостика или плавсредства при работе с подвеской на грузонесущем кабеле, тросе для глубин до 25 м и средней скорости течения

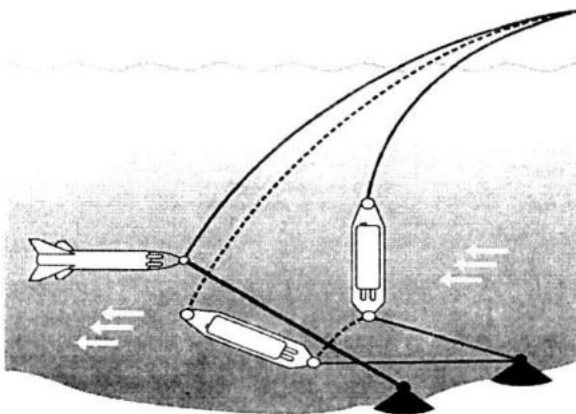


Рисунок 11 – Схема постановки для работы на глубинах до 25 м и больших скоростях течения

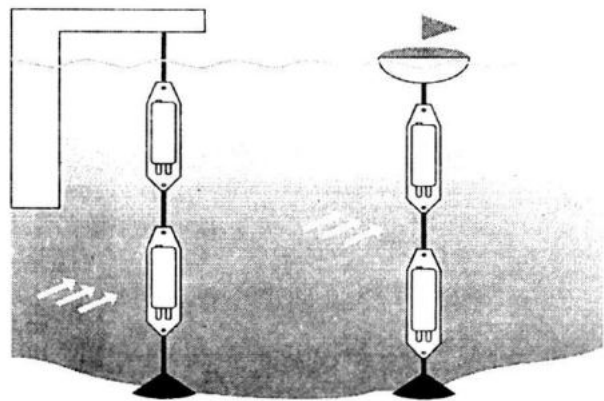


Рисунок 12 – Схемы постановки в телеметрическом или автономном режиме работы

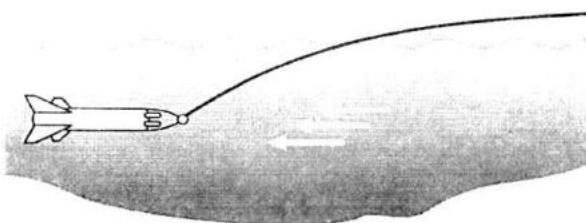


Рисунок 13 – Схема пассивной буксировки БП в потоке с управлением по глубине и выдержкой на горизонтах с помощью длины выпущенного грузонесущего кабеля или троса

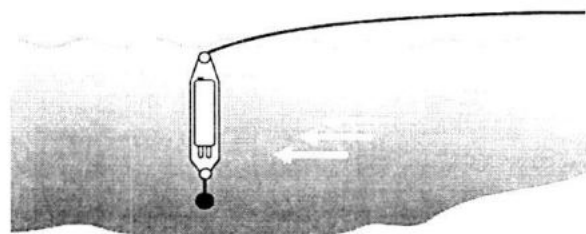


Рисунок 14 – Схема выполнения зондирования БП в режиме свободного падения

В телеметрическом режиме на дисплее ББ осуществляется контроль измеряемых величин.

При работе с подвеской на грузонесущем кабеле, тросе для глубин до 25 м и средней скорости течения схема постановки с мостика или плавсредства показана на рисунке 10.

Для работы на глубинах до 25 м и больших скоростях течения может быть использована схема постановки, показанная на рисунке 11.

Здесь БП прикреплен к неподвижному якорю на дне тросом длиной, равной глубине водотока, и связан грузонесущим кабелем (в телеметрическом режиме) с лебедкой наблюдателя. Вытравливанием верхнего кабеля (троса) осуществляется сканирование БП по глубине.

Для длительных наблюдений на малых и средних глубинах при стационарной постановке на буйковой станции или с мостика схемы постановки в телеметрическом или автономном режиме работы представлены на рисунке 12.

Для мобильной съемки вертикальных профилей скорости течения может быть использована схема пассивной буксировки БП в потоке с управлением по глубине и выдержкой на горизонтах с помощью длины вытравленного грузонесущего кабеля или троса, показанная на рисунке 13. Для осуществления такой постановки БП помещается в специальный носитель-планер с управляемыми режимами заглупления / всплытия.

Режим свободного падения БП с непрерывным измерением профилей параметров среды без выдержки на горизонтах возможен, если снять требование осреднения в течение времени от 60 с и более на горизонтах.

Схема выполнения зондирования БП в режиме свободного падения показана на рисунке 14. Этот режим является самым быстродействующим (оперативным).

Для измерения поверхностных течений БП измерителя закрепляют на поплавке достаточной грузоподъемности в горизонтальном положении, запускают поплавок по течению и удерживают на кабеле или тросе до установления покоя. Затем опускают трос и фиксируют показания акселерометра. Интегрируя импульс ускорения, определяют скорость поверхностного течения.

Для измерения подповерхностного течения на глубинах до 200 мм БП измерителя закрепляют на поплавке таким образом, чтобы датчики температуры были на необходимой глубине. Запускают поплавок по течению и удерживают на кабеле и тросе. Снимают показания термоанемометра.

ЛИТЕРАТУРА

1. П.А.Коротков, Т.Е.Лондон. Динамические контактные измерения тепловых величин. – И-Л.: Машиностроение (Ленинград). 1974. – 224 с.
2. А.М.Азизов, А.Н.Гердов. Точность измерительных преобразователей. – Л.: Энергия. 1975. – 256 с.
3. Н.А.Ярышев. Теоретические основы измерений нестационарной температуры. – 2-е изд., перераб. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд., 1990. – 256 с.
4. В.А.Гайский, П.В.Гайский. Анализ способов измерения профиля скорости потока термопрофилемерами. // Системы контроля окружающей среды: Сб. науч. тр. / НАН Украины, МГИ: – Севастополь. 2001. – С. 7–22.
5. В.А.Гайский, П.В.Гайский. Программная модель термоанемометров // Системы контроля окружающей среды: Сб. науч. тр. / НАН Украины, МГИ: – Севастополь. 2004. – С. 107–112.
6. П.В. Гайский, А.В. Клименко, А.Ф.Урожай. Исследование режимов работы термоанемометра // Системы контроля окружающей среды: Сб. науч. тр. / НАН Украины, МГИ: – Севастополь. 2005. – С. 85–89.