

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель директора  
ВНИИР

*Кемс* - М.С. Немиров

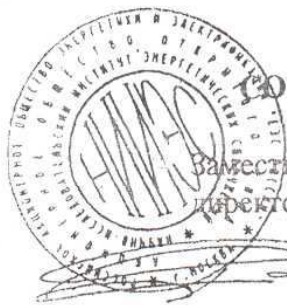
«15» ..... 06 ..... 1996 г.

## РЕКОМЕНДАЦИЯ

**Государственная система обеспечения единства измерений.  
Расход воды в водоводах ГЭС и ГАЭС.**

**Методика выполнения измерений многоканальной  
расходоизмерительной ультразвуковой системой  
типа «СПРИНТ»**

**МИ 2434-97**



**СОГЛАСОВАНО**

Заместитель генерального  
директора АО «НИИЭС»

Д.Б.Радкевич

«10» ..... 06 ..... 1996 г.

Москва  
1996

## ИНФОРМАЦИОННЫЕ ДАННЫЕ:

РАЗРАБОТАНА: Открытым акционерным обществом "ДИГЭС "

УТВЕРЖДЕНА : ВНИИР 15 июня 1996 г .

ИСПОЛНИТЕЛИ: Зиновьев Р.К. (руководитель темы), Брайцев В.Б.,  
Ракчеев В.П.

ЗАРЕГИСТРИРОВАНА: ВНИИМС 1997 г.

## СОДЕРЖАНИЕ

- [1. Нормы точности измерений](#)
- [2. Средства измерений и вспомогательные устройства](#)
- [3. Метод измерений](#)
- [4. Требования безопасности](#)
- [5. Требования к квалификации оператора](#)
- [6. Условия выполнения измерений](#)
- [7. Подготовка к проведению измерений](#)
- [8. Выполнение измерений](#)
- [9. Обработка результатов измерений](#)
- [10. Оформление результатов измерений](#)

### Приложения:

1. Технические и метрологические характеристики многоканальной расходоизмерительной ультразвуковой системы СПРИНТ
2. Блок-схема ультразвукового расходомера СПРИНТ
3. Краткое описание работы расходомера
4. Алгоритм определения погрешности результата измерений расхода воды системой СПРИНТ
5. Схема расположения акустических преобразователей в плоскости измерительного сечения
6. Методика разметки и определения геометрических размеров ИС и монтажа АП
7. Схема размещения лотковых и боковых марок при разметке измерительного сечения
8. Схема установки кнопки по теодолиту при разметке измерительного сечения
9. Схема подключения аппаратуры системы СПРИНТ при проверке акустических преобразователей, определении временных задержек в каналах системы и проведении измерений
10. Блок-схема алгоритма программы настройки системы СПРИНТ
11. Блок-схема алгоритма определения временных задержек в каналах системы СПРИНТ
12. Протокол измерения временных задержек в каналах системы СПРИНТ
13. Блок-схема алгоритма функционирования программы измерения расхода воды системой СПРИНТ
14. Протокол измерения расхода воды системой СПРИНТ

## РЕКОМЕНДАЦИЯ

ГОСУДАРСТВЕННАЯ СИСТЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЕДИНСТВА  
ИЗМЕРЕНИЙ

РАСХОД ВОДЫ В ВОДОВОДАХ ГЭС и ГАЭС.

### МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ МНОГОКАНАЛЬНОЙ РАСХОДОИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СИСТЕМОЙ типа "СПРИНТ"

МИ 2434 - 97

Дата введения - 01.09.97 г.

Настоящая рекомендация распространяется на расход воды через напорные водоводы гидроагрегатов ГЭС и ГАЭС сечением от 1,5 до 100 м<sup>2</sup> и устанавливает методику выполнения измерений расхода многоканальной расходоизмерительной ультразвуковой системой типа "СПРИНТ" (далее - система СПРИНТ), а также другими ультразвуковыми средствами измерений расхода воды аналогичного принципа действия.

Технические и метрологические характеристики системы СПРИНТ, ее блок-схема и краткое описание работы приведены в приложениях 1 - 3.

#### 1. НОРМЫ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ

1.1. Настоящая методика обеспечивает выполнение измерений расхода воды с пределами основной погрешности, приведенной к диапазону измерений, не более, чем  $\pm 1,5$  % при доверительной вероятности  $P = 0,95$ .

1.2. Значение суммарной погрешности измерений расхода, приведенной к диапазону измерений, определяется по формуле:

$$\gamma_Q = \pm \left( (\Delta Q / Q_d) \cdot 100 \right) \%, \quad (1)$$

где  $Q_d$  - диапазон измерений расхода воды системой СПРИНТ, м<sup>3</sup>/с;

$\Delta Q$  - абсолютная погрешность измерения расхода воды, м<sup>3</sup>/с, которую определяют по формулам, приведенным в приложении 4.

#### 2. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

2.1. При выполнении измерений применяют средства измерений и вспомогательные устройства, приведенные в таблице 1.

2.2. Допускается применение других средств измерений и вспомогательных устройств с метрологическими характеристиками, не хуже приведенных в таблице 1.

Таблица 1

№ п/п	Наименование средства измерений (вспомогательного устройства)	Обозначение типа, стандарта, ТУ	Погрешность
1	Многоканальная расходоизмерительная ультразвуковая система	Система СПРИНТ	$\pm 1,5\%$
2	Нутромер микрометрический с индикаторной головкой	НМИ-600 с диапазонами измерений 1250÷4000 и 4000÷10000 мм (по ГОСТ 10-75)	$\pm(0,025\div 0,180)\text{мм}$
3	Нивелир	Н-1(Н-2)	$\pm 0,07\text{мм}$
4	Линейка измерительная	L = 0,5 м (по ГОСТ 427-75)	$\pm 0,25\text{мм}$
5	Осциллограф	С1-83 (по ГОСТ 22737-77)	$\pm 5\%$
6	Прибор комбинированный	Ц4313 (по ГОСТ 10374-63)	$\pm 5\%$
7	Теодолит оптический	ТТ4	$\pm 10''$
8	Квадрант оптический	КО-30М (по ГОСТ 14967-77)	$\pm 15''$
9	Рулетка стальная	РЗ, L=10м (по ГОСТ 7302-68)	$\pm 0,5 \text{ мм}$
10	Штангенглубиномер	ШГ-250 (по ГОСТ 162-80)	$\pm 0,05\text{мм}$
11	Термометр	ТП-22 (по ГОСТ 27544-87)	$\pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$

### 3. МЕТОД ИЗМЕРЕНИЙ

3.1. Для измерений расхода воды в напорных водоводах гидроагрегатов используют время-импульсный ультразвуковой метод.

Метод реализуют путем устройства в водоводе измерительного сечения (ИС), оборудованного четырьмя взаимно-ориентированными парами акустических преобразователей (АП), образующими акустические каналы (АК), оси которых параллельны друг другу и лежат в одной плоскости, расположенной под определенным углом к продольной оси водовода. Метод осуществляют путем измерений времён прохождения ультразвуковых сигналов (УЗС) в каждом АК в режимах распространения по направлению потока воды и против него, пропорциональных интегральному значению по длине АК скорости потока воды, и использования квадратурной формулы численного интегрирования Гаусса.

Кроме того, определяют расчетным путем расход воды в пристенной области водовода и

прибавляют его к измеренному системой СПРИНТ расходу. Это связано с тем, что АП устанавливают на некотором удалении от внутренней поверхности водовода.

3.2. Значение расхода воды, измеряемого системой СПРИНТ, вычисляют по алгоритму, базирующемуся на формулах (3) и (4) приложения 4.

3.3. Значение расхода воды в пристенной области водовода вычисляют по формуле (10) приложения 4.

3.4. Значение полного расхода воды вычисляют по формуле

$$Q = Q_{\text{изм}} + Q_{\text{пр}} , \quad (2)$$

где  $Q_{\text{изм}}$  - значение расхода, измеренное системой СПРИНТ,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  
 $Q_{\text{пр}}$  - значение расхода в пристенной области водовода,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

3.5. ИС образуют на горизонтальном прямолинейном участке водовода. Длина прямолинейного участка до ИС должна быть не менее  $10 D$  до и  $4 D$  после него ( $D$  - диаметр водовода). При этом угол наклона ИС (осей АК к горизонтальной центральной плоскости водовода) выбирают равным  $45 \pm 5^\circ$ , а значения смещения осей АК относительно продольной оси водовода ( $2X_i / D$ ) и соответствующие им весовые коэффициенты квадратурной формулы Гаусса ( $W_i$ ) приведены в таблице 2.

Таблица 2

Номер АК	$2X_i/D$	$W_i$
1	0,8611	0,3478
2	0,3399	0,6521
3	0,3399	0,6521
4	0,8611	0,3478

Схема расположения АК в плоскости ИС приведена в приложении 5.

Измерения линейно-угловых параметров ИС выполняют при монтаже АП и периодической проверке системы СПРИНТ. Измерениям подлежат следующие параметры:

$D$  - диаметр водовода, м;

$L_i$  - длины АК, м;

$\alpha_i$  - углы наклона осей АК к горизонтальной центральной плоскости водовода, рад;

$X_i$  - смещение осей АК относительно проекции продольной оси водовода на плоскость ИС, м;

$\beta$  - угол отклонения от параллельности осей АК относительно проекции продольной оси водовода на плоскость ИС, рад;

$h_i$  - расстояние излучающих поверхностей АП от внутренних стенок водовода, м.

3.6. Время распространения УЗС в АК по направлению потока воды и против него  $t_i^+$ ,  $t_i^-$  и соответствующие им времена задержки УЗС  $t_{zi}^+$  и  $t_{zi}^-$  измеряют входящими в состав системы СПРИНТ электронно-счетными частотомерами.

3.7. Вычисление значений расхода воды осуществляют системой СПРИНТ под управлением микроЭВМ, входящей в ее состав, по специальной программе, используя формулы (3), (4), (10) приложения 4 и формулу (2).

#### 4. ТРЕБОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ

При выполнении измерений расхода воды должны быть соблюдены следующие требования безопасности:

- к проведению измерений допускают лиц, прошедших инструктаж по соблюдению требований безопасности;
- система СПРИНТ по способу защиты человека от поражения электрическим током должна соответствовать классу 0 по ГОСТ 12.2.007.0.-75.
- при выполнении измерений необходимо соблюдать требования "Правил техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей" и "Правил устройства электроустановок".

## 5. ТРЕБОВАНИЯ К КВАЛИФИКАЦИИ ОПЕРАТОРА

5.1. К выполнению измерений допускают лиц, имеющих опыт работы с электронно-цифровыми измерительными приборами и средствами вычислительной техники, прошедших специальную подготовку по обслуживанию используемых приборов и соблюдению требований безопасности, указанных в эксплуатационной документации на них.

5.2. Оператор должен знать и соблюдать требования технической документации на систему СПРИНТ и настоящей рекомендации.

## 6. УСЛОВИЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

6.1. При выполнении измерений соблюдают следующие условия:

- длина прямых участков водовода до ИС и после него должны быть не менее 10 D и 4 D соответственно;
- длина кабелей связи не должна быть более 100 м;
- вода должна полностью заполнять внутреннюю полость водовода;
- поток воды в водоводе должен быть полностью сформировавшимся, квазистационарным;
- мутность воды должна быть такой, при которой обеспечивается уверенное распространение УЗС;
- не допускают обледенения стенок водовода, обрастания биоорганизмами и отложения продуктов коррозии на АП;
- внешние магнитные и электрические поля, влияющие на работоспособность средств измерений отсутствуют;
- максимальная средняя скорость потока воды в водоводе не должна быть более 8 м/с;
- площадь сечения водовода от 1,5 до 100 м<sup>2</sup>;

6.2. Условия эксплуатации системы СПРИНТ следующие:

- температура воды +4 ... +35 °С;
- температура окружающего воздуха +5 ... +35 °С;
- относительная влажность воздуха при температуре +25 °С не более 80%;
- атмосферное давление 84... 106,7 кПа;
- напряжение питания 220 В ± 10% при частоте 50 ± 1 Гц.

6.3. Допускаемые отклонения параметров ИС от номинальных и инструментальные погрешности их контроля должны соответствовать требованиям, приведенным в таблице 3.

Таблица 3

№ п/п	Наименование параметра	Норма параметра	Допускаемое отклонение	Инструментальная погрешность
1	2	3	4	5

1	Угол наклона осей АК относительно продольной оси водовода	45°	5°	10"
2	Координаты осей АК относительно проекции продольной оси водовода на плоскость ИС			
	1-й и 3-й АК	0,8611D/2	0,05·0,8611D/2	±(0,025ч-0,180)мм
	2-й и 4-й АК	0,3399D/2	0,05·0,3399D/2	±(0,025+0,180)мм
3	Отклонение от параллельности осей АК относительно проекции продольной оси водовода на плоскость ИС		0.5°	±10"

## 7. ПОДГОТОВКА К ПРОВЕДЕНИЮ ИЗМЕРЕНИЙ

7.1. Монтаж АП и измерения параметров ИС проводят в соответствии с приложениями 5 - 8 к настоящей методике.

### 7.2. Проверка работоспособности АП

Прибором Ц4313 измеряют электрическое сопротивление кабелей, соединяющих АП с блоком сопряжения, подключая его между центральной жилой и оплеткой кабеля. Измерения производят при отключенных от блока сопряжения кабельных линиях. Значение измеренного сопротивления должно быть не менее 5 кОм.

7.3. Определение временных задержек, вносимых АП, линиями связи и электронными блоками системы СПРИНТ

Собирают схему (приложение 9).

Подключают два дополнительных АП через кабели РК-50-2-11 длиной, соответствующей длине кабеля в натуре к каналам 1,2 (разъемы "АП 1,2" устройства сопряжения).

Устанавливают дополнительные АП в емкость, заполненную водой, на расстоянии  $1,5 \pm 0,1$  м друг от друга и на глубину не менее  $0,08 \pm 0,01$  м. Расстояние от корпусов датчиков до стенок емкости должно быть не менее  $0,1 \pm 0,01$  м.

Вводят в ЭВМ и запускают программу настройки системы, блок-схема алгоритма которой представлена в приложении 10. С помощью потенциометров усиления сигналов каналов 1 - 2 по осциллографу устанавливают амплитуду усиленного первого приемного отрицательного импульса, равную  $3,0 \pm 0,2$  В.

Вводят в ЭВМ и запускают программу определения временных задержек, блок-схема алгоритма которой представлена в приложении 11.

$$t_{3i}^{+} = 0,5 ( 3 t_{12} + t_{21} - t_{121} - t_{212} ), \quad (3)$$

$$t_{3i}^{-} = 0,5 ( t_{12} + 3 t_{21} - t_{121} - t_{212} ), \quad (4)$$

где  $t_{3i}^{+}$ ,  $t_{3i}^{-}$  - время задержки, с;

$t_{12}$  - время распространения УЗС от первого АП ко второму, с;

$t_{21}$  - время распространения УЗС от второго АП к первому, с;

$t_{121}$  - время распространения УЗС от первого АП ко второму и обратно, с;

$t_{212}$  - время распространения УЗС от второго АП к первому и обратно, с;

$i$  - номер АК.

Повторяют операции для каналов 3 - 4, 5 - 6, 7 - 8.  
Вносят в протокол (приложение 12) значение временных задержек в каналах.

## 8. ВЫПОЛНЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ

8.1. Для измерений расхода воды при помощи системы СПРИНТ вводят в микроЭВМ программу измерений расхода воды (приложение 13) и запускают ее.

## 9. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

9.1. Результаты измерений обрабатывают системой СПРИНТ по программе (приложение 13). Алгоритм обработки измерительной информации предполагает необходимость ее накопления и статистической обработки.

## 10. ОФОРМЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

10.1. Результат измерений расхода воды представляют в виде

$$Q \pm \Delta Q, \quad (5)$$

где  $Q$  - значение полного расхода воды, вычисленное по п. 3.4, м<sup>3</sup>/с;  
 $\Delta Q$  - значение абсолютной погрешности измерения расхода, м<sup>3</sup>/с, вычисленное по формулам приложения 4.

$\Delta Q$  не должно превышать  $\pm 1,5 \cdot Q_d/100$ ,

где  $Q_d$  - диапазон измерений расхода воды системой СПРИНТ.

10.2. Значение  $Q$  записывают числами со значащими цифрами в соответствии с МИ 1317-86.

10.3. Результаты измерений расхода воды в течение определенного промежутка времени оформляют в виде протокола по форме, данной в приложении 14.

Генеральный директор АО "ДИГЭС"



В.В. Брайцев

Главный метролог

В.П. Ракчеев

Начальник отдела,  
руководитель темы

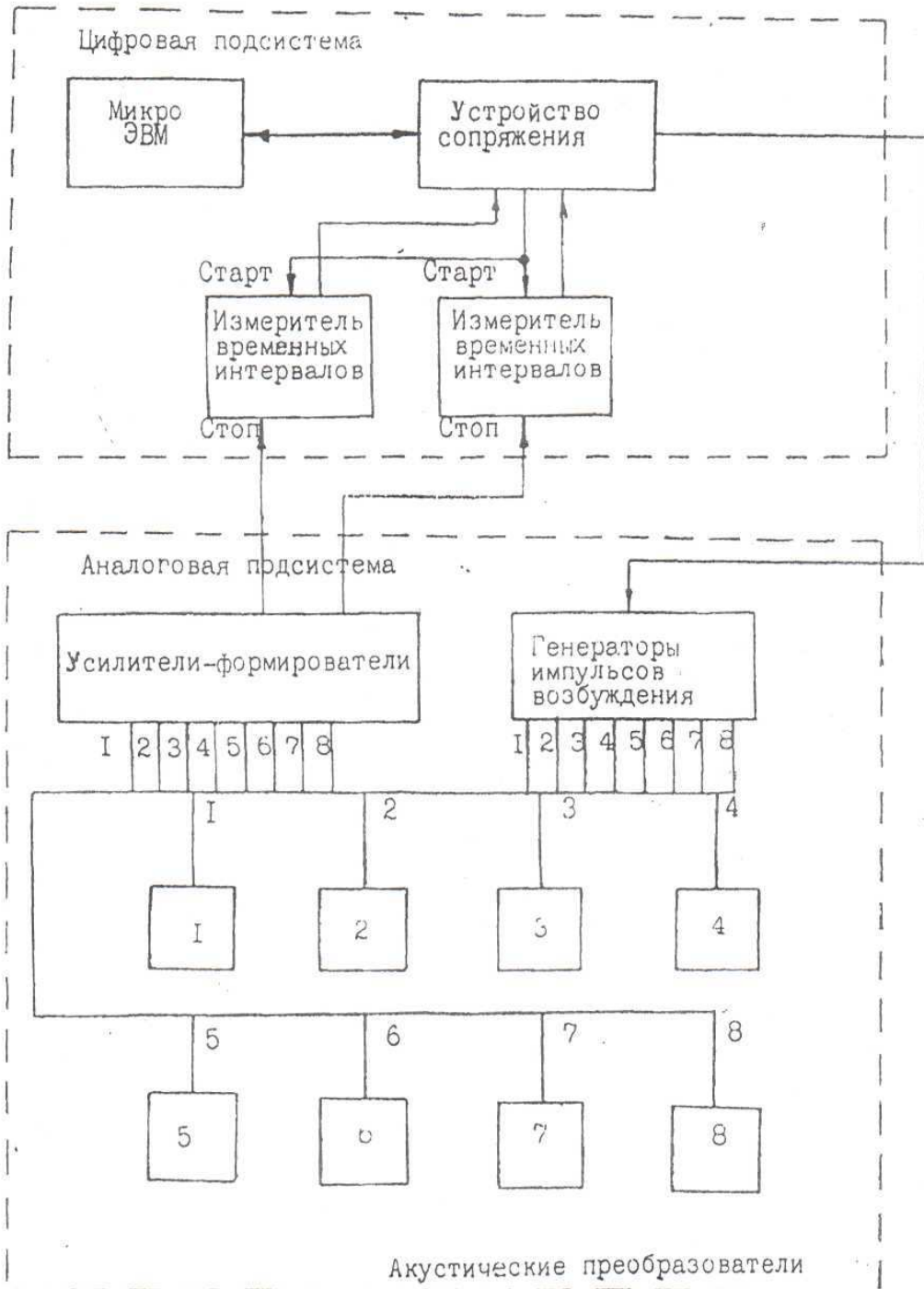
Р.К. Зиновьев



**Технические и метрологические характеристики многоканальной  
расходоизмерительной ультразвуковой системы СПРИНТ**

1. Диапазон измерений расхода воды, м <sup>3</sup> /с	10 ... 300
2. Границы погрешности измерений расхода, приведенной к диапазону измерений при доверительной вероятности P = 0,95, %	±1,5
3. Амплитуда напряжения импульса возбуждения акустических преобразователей, В, не менее	160
4. Длительность импульса возбуждения акустических преобразователей (на уровне 0,1 амплитудного значения), мкс	0,8±0,1
5. Амплитуда напряжения выходного электрического сигнала акустического преобразователя, В, не менее	0,1
6. Длительность импульса возбуждения выходного электрического сигнала преобразователя, мкс	0,8 ± 0,1
7. Диапазон измерений временных интервалов (времени прохождения ультразвукового сигнала в акустическом канале), мс	1 ... 15
8. Предел среднеквадратического отклонения случайной погрешности измерений временных интервалов, мкс	0,01
9. Предел среднеквадратического отклонения случайной погрешности измерений времени задержки УЗС в электронных каналах и элементах АП, мкс	0,01

БЛОК-СХЕМА УЛЬТРАЗВУКОВОГО РАСХОДОМЕРА СПРИНТ



### КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ РАБОТЫ РАСХОДОМЕРА

Система СПРИНТ включает в себя акустические преобразователи (АП), устанавливаемые в измерительном сечении напорного трубопровода гидроагрегата, аналоговую и цифровую подсистему и программное обеспечение (см. блок-схему в приложении 2).

Аналоговая подсистема служит для генерации и обработки аналоговых сигналов и содержит 4 взаимно-ориентированных пары АП, генераторы импульсов возбуждения АП, усилители-формирователи измерительных сигналов и вспомогательные устройства.

Цифровая подсистема служит для формирования управляющих сигналов, измерения интервалов времени, цифровой обработки измерительной информации и индикации результата обработки. В нее входят микро-ЭВМ, измерители временных интервалов, устройство сопряжения микро-ЭВМ с другими блоками схемы.

Работает расходомер следующим образом. Управляющие сигналы с микро-ЭВМ через устройство сопряжения поступают на измерители временных интервалов (запускают их) и на генераторы импульсов возбуждения АП. На сопряженных АП формируются приемные импульсы, которые после преобразования усилителями-формирователями, останавливают измерители временных интервалов, а поступающая информация обрабатывается в микро-ЭВМ.

### АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОГРЕШНОСТИ РЕЗУЛЬТАТА ИЗМЕРЕНИЙ РАСХОДА ВОДЫ СИСТЕМОЙ СПРИНТ

1. Погрешность измерения расхода воды, приведенная к диапазону измерений, определяют по формуле:

$$\gamma_Q = \pm \left( (\Delta Q / Q_d) \cdot 100 \right) \%, \quad (1)$$

где  $Q_d$  - диапазон измерений расхода воды системой СПРИНТ, м<sup>3</sup>/с;

$\Delta Q$  - абсолютная погрешность измерений расхода воды, м<sup>3</sup>/с, которую, в свою очередь определяют по формуле:

$$\Delta Q = \Delta Q_{\text{изм}} + \Delta Q_{\text{пр}} + \Delta Q_{\text{м}}, \quad (2)$$

где  $\Delta Q_{\text{изм}}$  - абсолютная погрешность измерений расхода воды, обусловленная неточностью измерений временных интервалов прохождения ультразвуковых сигналов (УЗС) между акустическими преобразователями (АП) и времен задержки прохождения УЗС в линиях связи и электронных блоках системы СПРИНТ, а также погрешностями определения геометрических параметров измерительного сечения (ИС) водовода и погрешностями выбранного метода численного интегрирования, м<sup>3</sup>/с;

$\Delta Q_{\text{пр}}$  - абсолютная погрешность определения расхода воды в пристенной области водовода, м<sup>3</sup>/с.

$\Delta Q_{\text{м}}$  - суммарное значение абсолютной методической погрешности измерения расхода воды системой СПРИНТ, м<sup>3</sup>/с;

2. Для определения  $\Delta Q_{\text{изм}}$  используют формулу для вычисления измеряемой части ( $Q_{\text{изм}}$ ) расхода в виде

$$Q_{\text{изм}} = D/2 \sum_{i=1}^4 (L_i \cdot W_i \cdot \text{tg } \alpha_i \cdot f_i), \quad (3)$$

где  $D$ ,  $L_i$  и  $\alpha_i$  - геометрические параметры ИС (диаметр водовода, длина и угол наклона  $i$ -ого акустического луча), значения которых на конкретном объекте приведены в паспорте ИС и в протоколе поверки системы СПРИНТ, соответственно м, м, рад;

$W_i$  - безразмерные весовые коэффициенты численного интегрирования квадратурной формулы Гаусса для  $i$ -ого акустического канала;

$f_i$  - коэффициент,  $1/c$ , который для каждого акустического канала определяют по формуле

$$f_i = [(t_i^- - t_{3i}^-) - (t_i^+ - t_{3i}^+)] / [(t_i^- - t_{3i}^-) \cdot (t_i^+ - t_{3i}^+)], \quad (4)$$

где  $t_i^+$  и  $t_i^-$  - время прохождения УЗС между АП для  $i$ -ого акустического канала, соответственно по направлению потока и против него (значения временных интервалов определяют в процессе измерения расхода воды системой СПРИНТ), с;

$t_{3i}^+$ ,  $t_{3i}^-$  - время задержки УЗС при прохождении его через 1-ый измерительный тракт соответственно по направлению потока и против него (значения определяют при подготовке к выполнению измерений по п. 7.3), с.

Значение  $\Delta O_{\text{изм}}$  определяют согласно рекомендациям раздела 3 МИ 2083-90, при этом составляющие погрешности считают некоррелированными.

С.к.о. результирующей погрешности определения  $\Delta O_{\text{изм}}$  вычисляют по формуле

$$\begin{aligned} \sigma(Q_{\text{изм}}) = & \sqrt{[\sigma_D/2 \sum_{i=1}^4 (L_i \cdot W_i \cdot \text{tg } \alpha_i \cdot f_i)]^2 + [\sigma_L \cdot D \sum_{i=1}^4 (L_i \cdot W_i \cdot \text{tg } \alpha_i \cdot f_i)]^2 +} \\ & + [\sigma_w D/2 \sum_{i=1}^4 (L_i \cdot \text{tg } \alpha_i \cdot f_i)]^2 + [\sigma_\alpha D/2 \sum_{i=1}^4 (L_i \cdot W_i \cdot f_i / \cos^2 \alpha_i)]^2 +} \\ & + [\sigma_f D/2 \sum_{i=1}^4 (L_i \cdot W_i \cdot \text{tg } \alpha_i)]^2, \quad (5) \end{aligned}$$

где  $\sigma_D$ ,  $\sigma_L$ ,  $\sigma_\alpha$ ,  $\sigma_w$  и  $\sigma_f$  - с.к.о. составляющих погрешности измерений расхода воды, соответственно м, м, рад, безразмерная физическая величина,  $1/c$ , обусловленных неточностью метода измерений соответственно диаметра  $D$ , расстояния  $L_i$  между АП в каждом из АК и углов наклона четырех АК к продольной оси водовода  $\alpha_i$ , неточностью используемых коэффициентов  $W_i$ , выбранного метода численного интегрирования и погрешностью вычисления функционала  $f_i$  (формула 4), которую, в свою очередь, определяют по формуле

$$\sigma_f = (\sigma_t - \sigma_{t_3}) [(t_i^- - t_{3i}^-)^{-2} - (t_i^+ - t_{3i}^+)^{-2}], \quad (6)$$

где  $\sigma_t$  и  $\sigma_{t_3}$  - с.к.о. составляющих погрешности измерений соответственно интервалов времени и временных задержек, с.

3. Оценки  $\hat{\sigma}_D$ ,  $\hat{\sigma}_L$ , и  $\hat{\sigma}_\alpha$  производят в результате многократных измерений параметров измерительного сечения соответственно  $D$ ,  $L_i$  и  $\alpha_i$  и последующего вычисления соответствующего среднего арифметического  $D$ ,  $L_i$ ,  $\alpha_i$  по результатам этих измерений (принимаемого за действительное значение параметра) по формуле

$$\hat{\sigma} = 1,36 \sqrt{1/(n-1) \sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})^2}, \quad (5)$$

где  $T_i$  и  $\bar{T}$  соответственно результат  $i$ -ого измерения любого из параметров  $D$ ,  $L_i$ ,  $\alpha_i$  и среднее арифметическое из  $n$  результатов измерений; при этом  $n$  должно быть не менее 10.

При невозможности определить  $\hat{\sigma}_D$ ,  $\hat{\sigma}_L$ , и  $\hat{\sigma}_\alpha$  для конкретного ИС в формуле (3) могут быть использованы численные оценки, полученные для системы СПРИНТ, установленной в гидроагрегате № 16 Братской ГЭС

$$\hat{\sigma}_D = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$\hat{\sigma}_L = 8 \cdot 10^{-5} \text{ м}$$

$$\hat{\sigma}_\alpha = 10^{-3} \text{ рад}$$

4. Значение с.к.о., случайной составляющей погрешности численного интегрирования при использовании квадратурной формулы Гаусса с 4 узлами принимают равным  $\sigma_w = 0,3$ .

5. Оценки  $\hat{\sigma}_i$  и  $\hat{\sigma}_t$  производят на стадии поверки системы СПРИНТ и подготовки к проведению измерений; при этом должны быть выполнены соотношения  $\hat{\sigma}_i \leq 10^{-8}$  с;  $\hat{\sigma}_t \leq 2 \cdot 10^{-7}$  с.

6. Абсолютную погрешность  $\Delta Q_{\text{изм}}$  принимают равной  $2\sigma$  ( $Q_{\text{изм}}$ ), что соответствует граничным значениям интервала при доверительной вероятности  $P = 0,95$ .

7. Абсолютную погрешность определения расхода воды в пристенной области вычисляют по формуле

$$\Delta Q_{\text{пр}} = (b + 1) (\Delta h_{\text{max}} + \Delta h_{\text{н}}) \cdot Q_{\text{пр}} / \bar{h}, \quad (7)$$

где  $\bar{h}$  - среднее значение расстояния от излучающей поверхности АП до внутренней поверхности водовода, м, которое, в свою очередь, вычисляют по формуле

$$h = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k h_{ij} / kn \quad (8)$$

где  $h_{ij}$  - измеренное значение расстояния от излучателя  $i$ -ого АП до внутренней поверхности водовода при  $j$ -ом измерении, м;

$n$  - количество АП;

$k$  - число измерений расстояния от излучателя  $i$ -ого АП до внутренней поверхности водовода ( $k$  должно быть равно 3);

$\Delta h_{\text{max}}$  - абсолютная погрешность нахождения среднего значения  $\bar{h}$ , м, определяемая по формуле:

$$\Delta h_{\text{max}} = \max | \bar{h} - h_{ij} | \quad (9)$$

Параметр  $b$  принимают равным 1,7.

$Q_{\text{пр}}$  - значение расхода воды в пристенной области водовода ИС, вычисляемое по формуле

$$Q_{\text{пр}} = Q_{\text{изм}} \{ [1 - (b + 2)] [1 - (\bar{h}/D)^{b+1}] - (b + 1) [(\bar{h}/D)^{b+2} - 1] \}. \quad (10)$$

8. Абсолютная методическая погрешность  $\Delta Q_{\text{м}}$  состоит из четырех составляющих:

- погрешности численного интегрирования за счет смещения осей акустических каналов (далее - АК) от расчетных данных. Она не превышает 0,1% от  $Q_{\text{изм}}$ ;
- погрешности численного интегрирования, обусловленной деформацией профиля скоро-

стей потока (длина прямых участков  $3 D_y$ ). Она не превышает 0,2 % от  $Q_{изм}$  ;

- погрешности, обусловленной поперечной скоростью потока воды в водоводе. Она не превышает 0,25% от  $Q_{изм}$ ;

- погрешности, обусловленной турбулентными пульсациями скорости потока. По результатам теоретических расчетов она не превышает 0,1%  $Q_{изм}$ .

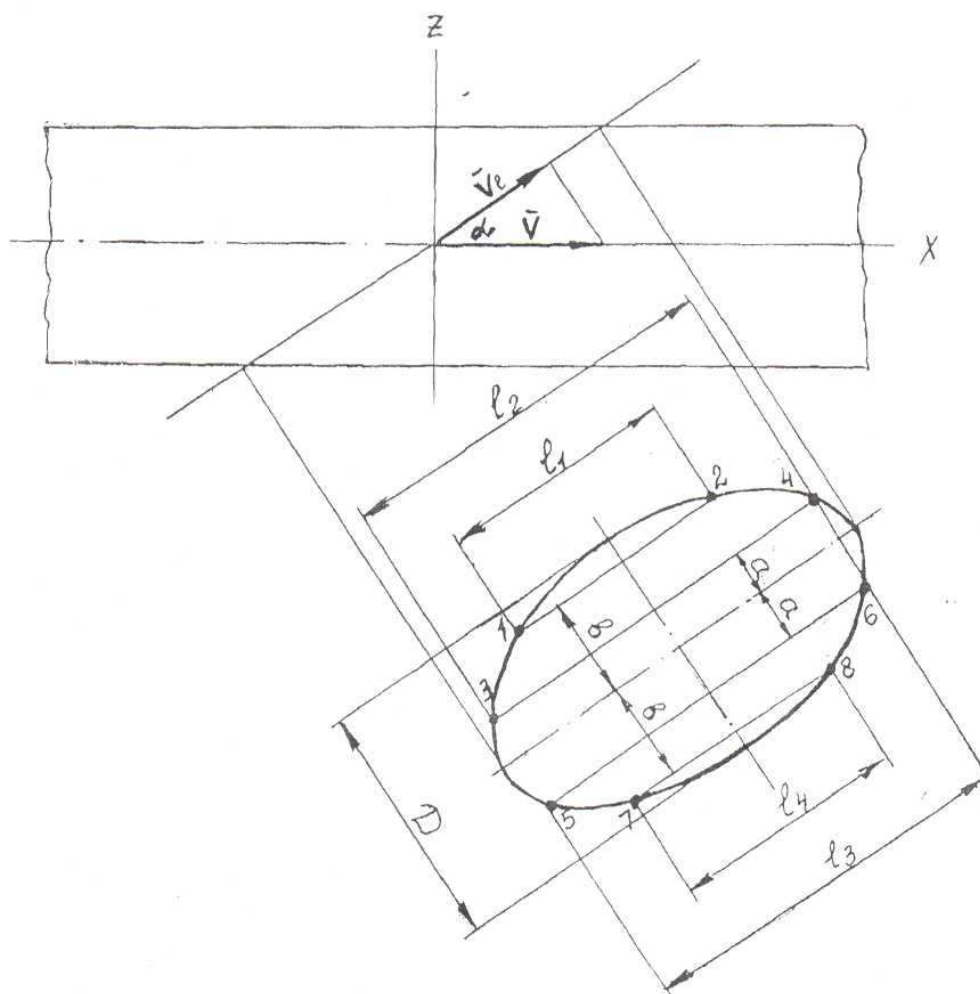
Результирующее значение абсолютной методической погрешности  $\Delta Q_M$  определяется геометрическим сложением ее отдельных составляющих

$$\Delta Q_M = \sqrt{\sum_{i=1}^4 (\Delta Q_{Mi})^2} \quad (11)$$

9. Абсолютная погрешность результата измерений  $\Delta Q$  расхода воды определяют как алгебраическую сумму трех ее составляющих  $\Delta Q_{изм}$ ,  $\Delta Q$  и  $\Delta Q_M$ , которые найдены ранее (см. формулу (2)).

## Приложение 5

### СХЕМА РАСПОЛОЖЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ В ПЛОСКОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ



$D$  - диаметр трубопровода,  $a = 0,3399 D/2$ ,  $e = 0,8611 D/2$ ,  $l_i$  - длины акустических лучей

МЕТОДИКА РАЗМЕТКИ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ  
ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ ИС И МОНТАЖА АП

1. Разметка и определение геометрических параметров ИС.

ИС располагают под углом  $45 \pm 5^\circ$  к продольной оси водовода. В плоскости ИС симметрично продольной оси водовода на расстояниях  $0,3399D/2$  и  $0,861D/2$  от нее располагают АП (приложение 5).

2. Определение центра ИС и направления оси трубопровода.

Начальное сечение измерительного участка принимают на горизонтальном отрезке трубопровода, откорректировав это расстояние так, чтобы обтекатели АП не располагались на сварных швах трубопровода.

На лотковой части трубопровода размечают марки (приложение 7) для нивелирования и измерений диаметра трубопровода (9 марок):

марки 1, 5 и 9 - соответственно в начальном, центральном и конечном сечениях;

марки 3, 4 и 6, 7 - соответственно попарно слева и справа от сварных швов трубопровода, располагаемые симметрично от оси шва на минимально возможном от нее расстоянии;

марки 2 и 8 - равноудаленно от марок соответственно 1, 3 и 7, 9.

Марки должны находиться в створе отвесов, установленных в сечениях 1 и 9 (посередине балки - хорды).

Измеряют расстояние  $X$  от марки 5 до каждой из марок с точностью до 1 мм. Измерения можно выполнять рулеткой. Измерения проводят три раза, смещая начальное положение рулетки. Положительное направление - по потоку.

Выполняют нивелирование, определяя отметки ( $Z_{ni}$ ) марок относительно марки 5 ( $Z_{n5} = 0$ ).

Измеряют диаметр ( $D_b$ ) трубопровода по вертикали от каждой марки. Измерения выполняют три раза.

Вычисляют отметку  $Z_{oi}$  оси трубопровода в каждом сечении

$$Z_{oi} = Z_{ni} + 0,5 \cdot \bar{D}_b ;$$

где:  $\bar{D}_b$  - среднее значение диаметра (по вертикали).

Определяют коэффициент уравнения проекции геометрической оси трубопровода на вертикальную поверхность, совпадающих со створом отвесов

$$Z = a_1 \cdot X + b_1 ;$$

где

$$a_1 = \frac{[n \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2]^{-1}}{[n \sum (Z_{oi} \cdot X_i) - \sum X_i \cdot \sum Z_{oi}]},$$

$$b_1 = \frac{[n \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2]^{-1}}{[n \sum Z_{oi} \cdot X_i^2 - \sum (Z_{oi} \cdot X_i) \cdot \sum X_i]}.$$

Определяют угол  $\theta_1$  наклона оси трубопровода к вертикальной плоскости  $\theta_1 = \arctg(\alpha_1)$ .

Положительное направление угла  $\theta_1$  соответствует наклону трубы теодолита вниз от горизонтального положения при визировании на отвес в начальном состоянии.

Определяют отметку геометрической оси трубопровода в сечении 5, т.е. отметку центра ИС  $Z_5 = b_1$ .



### 3. Определение плановых координат центра ИС и оси трубопровода

Установив теодолит над лотковой маркой 5 в плоскости отвесов, размечают на боковой поверхности трубопровода в зоне отметки его оси след поперечного сечения (под углом  $90^\circ$  к плоскости отвесов).

Устанавливают теодолит за пределами измерительного участка трубопровода (со стороны начального сечения) и, перемещая его по вертикали, визируют трубу теодолита в створе отвесов на центр ИС (по нутромеру, выставленному в марке 5), предварительно установив по вертикальному кругу угол  $\theta$ .

Теодолитом, установленным как указано выше, вынести марки на левую от теодолита поверхность трубопровода (в сечениях, где размещены марки 1- 9 лотковой части). Расстояния между марками вдоль трубопровода отсчитывают от 5-го (начального) сечения и выносят с помощью рулетки с погрешностью  $\pm 1$  мм.

С помощью нутромера, установленного на боковую марку, и теодолита измеряют расстояния боковых марок до вертикальной плоскости створа отвесов. Свободный конец нутромера поднимают с помощью стойки (У-309) до совмещения с горизонтальной визирной линией трубы.

Измеряют диаметр ( $D_i$ ) трубопровода по горизонтали от каждой боковой марки.

Вычисляют смещение центров сечений 1 - 9 от плоскости отвесов

$$Y_{oi} = 0,5 \cdot D_i - R.$$

Положительное направление смещения - в сторону от боковой марки.

Вычисляют коэффициенты в уравнении проекции геометрической оси трубопровода на горизонтальную плоскость  $Y = a_2 \cdot x + b_2$  по формулам, аналогичным п. 2 приложения.

Определяют угол  $\theta_2$  наклона геометрической оси трубопровода к горизонтальной плоскости  $\theta_2 = \arctg(a_2)$ .

Положительное направление угла  $\theta_2$  соответствует повороту трубы теодолита по горизонтальному кругу влево от отвеса при визировании на отвес, размещенный в начальном сечении.

Определяют горизонтальное смещение центра ИС от плоскости отвесов  $Y_5 = b_2$ .

### 4. Разметка ИС

Устанавливают теодолит в центр ИС по координатам  $Z_5$  и  $Y_5$ . Вертикальное положение обеспечивают визированием трубы теодолита в горизонтальном положении на нутромер, установленный на лотковой марке 1 при длине нутромера  $L = Z_5 - Z_{ni}$ .

Горизонтальное положение теодолита обеспечивают смещением отвесов на расстоянии  $Y$  и установкой теодолита в плоскости отвесов.

Поворачивают трубу теодолита (при визировании на отвес в начальном сечении) влево на угол  $\alpha = 45^\circ - \theta_2$ .

Вращая трубу по вертикальному кругу и визируя ее в зоне размещения АП, наносят на поверхность трубопровода отрезки следа ИС.

При том же положении отвесов выставляют теодолит на отметки длинных лучей и выносят центры АП, предварительно повернув трубу теодолита по вертикальному кругу на угол  $\theta_2$ . Засверливают отверстие, нарезают резьбы, устанавливают кнопки (измерения выполняют при том же положении теодолита).

*Примечание.* При корректировке положения кнопок по теодолиту учитывают  $\beta$  - угол между опорной плоскостью обтекателя и горизонтальной плоскостью (см. п. 6 приложения).

### 5. Определение диаметра трубопровода.

Вычисляют средние значения диаметра по формуле

$$D = 1/18 \cdot \sum_{i=1}^9 (D_{vi} + D_{ri}).$$



## 6. Установка кнопки по теодолиту (приложение 8)

$$\alpha + \Delta \alpha_{\text{прод}} = \arctg \left[ \frac{\text{tg } \alpha}{1 - R/h \cdot \text{tg } \alpha} \right],$$
$$\alpha - \Delta \alpha_{\text{поп}} = \arctg \left[ (1 - R/h \cdot \sin \beta) \cdot \text{tg } \alpha \right],$$

где  $h$  - расчетное расстояние центра датчика до оси трубопровода, м.

7. Отметку центров датчиков после установки струны определяют нивелированием с помощью подвешиваемой линейки.

Отметку берут относительно марки 5.

8. Непараллельность осей в горизонтальном направлении определяют отвесом.

По результатам измерений по пунктам 7 и 8 вычисляют:

- отклонения от расчетных расстояний между осями (по среднему значению диаметра трубопровода, полученному при измерениях);
- непараллельность в вертикальной плоскости (плоскости ИС);
- непараллельность в плоскостях, поперечных ИС.

## 9. Установка АП

Устанавливают на кнопку обтекатель, в отверстие которого ввернут коллиматор.

Путем вращения обтекателя на кнопке направляют луч коллиматора на противоположную кнопку, где предполагается установка парного АП.

Определенное таким образом правильное положение обтекателя отмечают, очертив его контур на поверхности трубопровода.

Снимают обтекатель, вынимают кнопку. При помощи шпильки и гайки закрепляют на поверхности трубопровода обтекатель в соответствии с намеченным контуром.

Направив луч коллиматора на противоположную кнопку, проверяют точность его попадания на АП.

Приваривают обтекатель к поверхности трубопровода.

Выполняют вышеописанную операцию для всех остальных кнопок.

10. Определяют расстояние между осями лучей АП, измерив расстояние нутромером между натянутыми по осям лучей имитаторами в виде стальной проволоки.

Снимают имитаторы. Устанавливают в обтекателе АП.

## 11. Измерение действительных геометрических параметров ИС

11.1. Расстояние между излучающими поверхностями АП измеряют нутромером НМИ - 600. Измерения повторяют не менее трех раз и находят их среднее арифметическое значение, которое принимают за действительный размер и заносят в протокол измерений. Операции аналогично повторяют для остальных пар АП.

11.2. Смещение оси АК от проекции продольной оси водовода на плоскость ИС измеряют при помощи подвешиваемой металлической измерительной линейки и нивелира относительно марки 6. Измерения повторяют не менее трех раз на средней части струны и по обоим ее концам. Находят среднее арифметическое значение смещений, которое заносят в протокол.

11.3. Расстояние от излучающей поверхности АП до внутренней стенки водовода измеряют при помощи штангенглубиномера ШГ-250. Измерения повторяют не менее трех раз для каждого АП и находят их среднее арифметическое значение, которое заносят в протокол.

СХЕМА РАЗМЕЩЕНИЯ ЛОТКОВЫХ И БОКОВЫХ МАРОК ПРИ РАЗМЕТКЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ

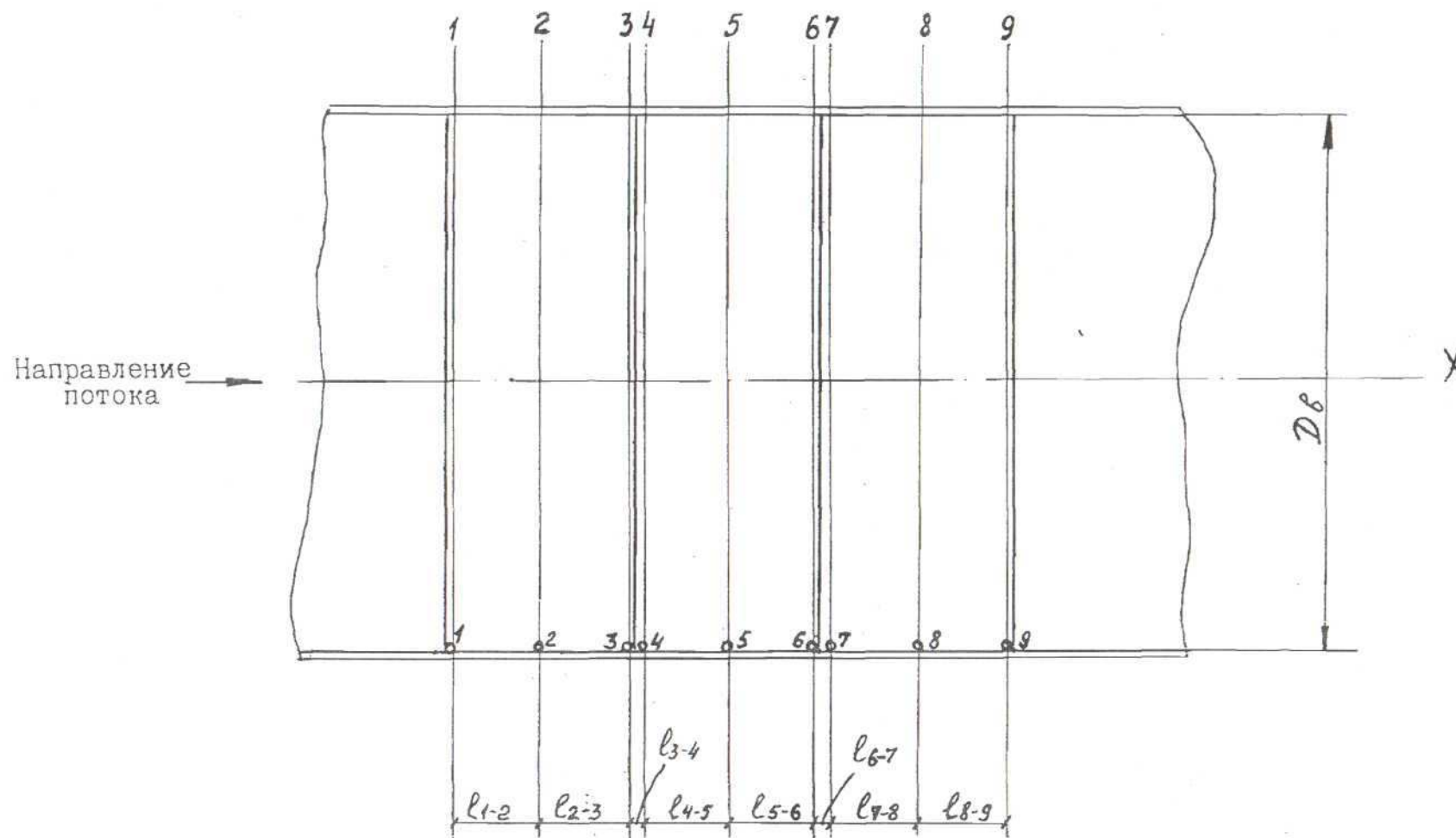


СХЕМА УСТАНОВКИ КНОПКИ ПО ТЕОДОЛИТУ  
ПРИ РАЗМЕТКЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ

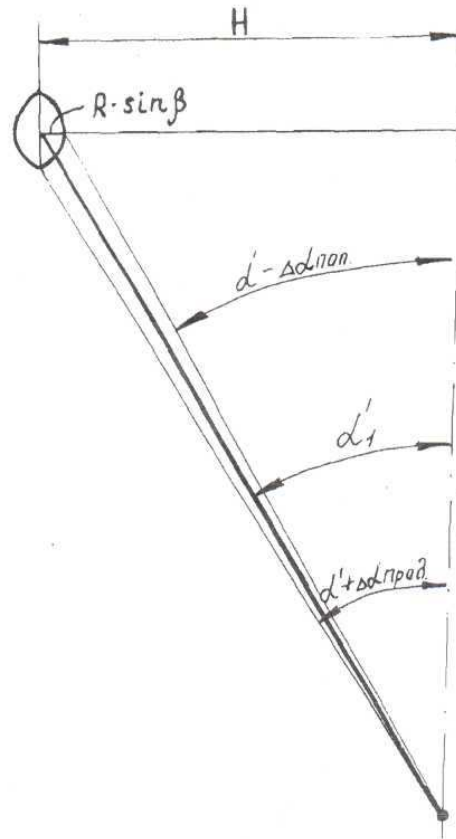
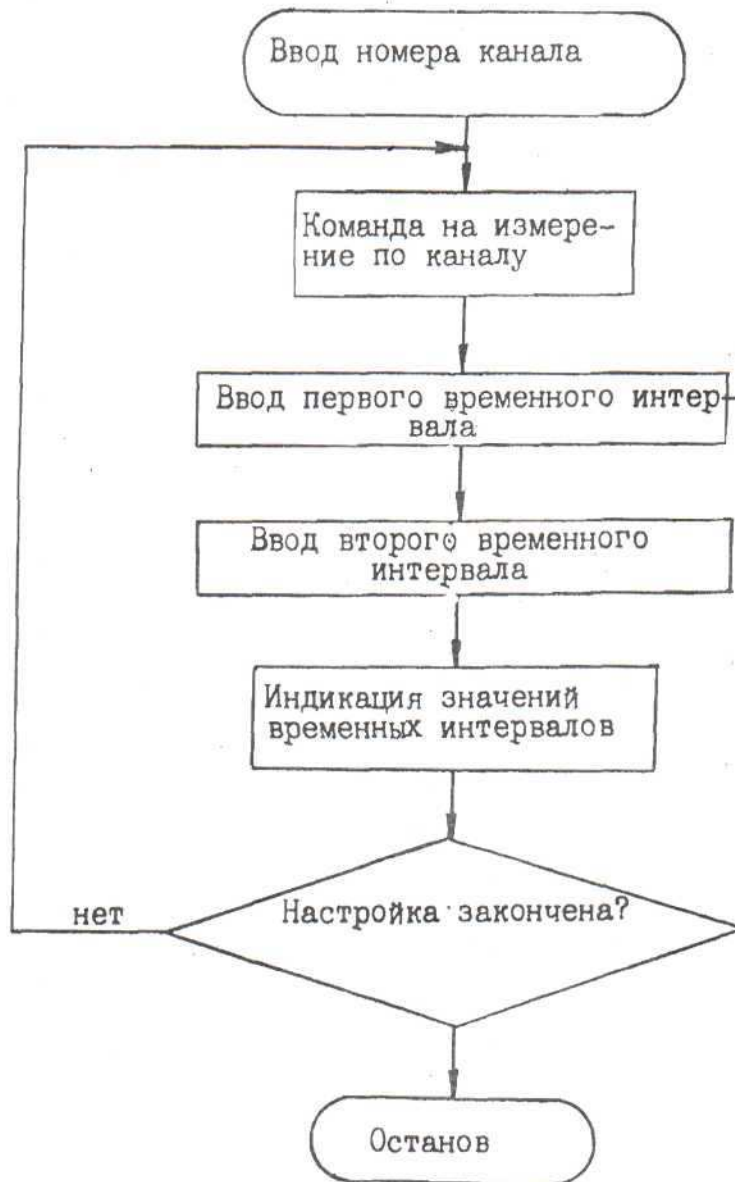


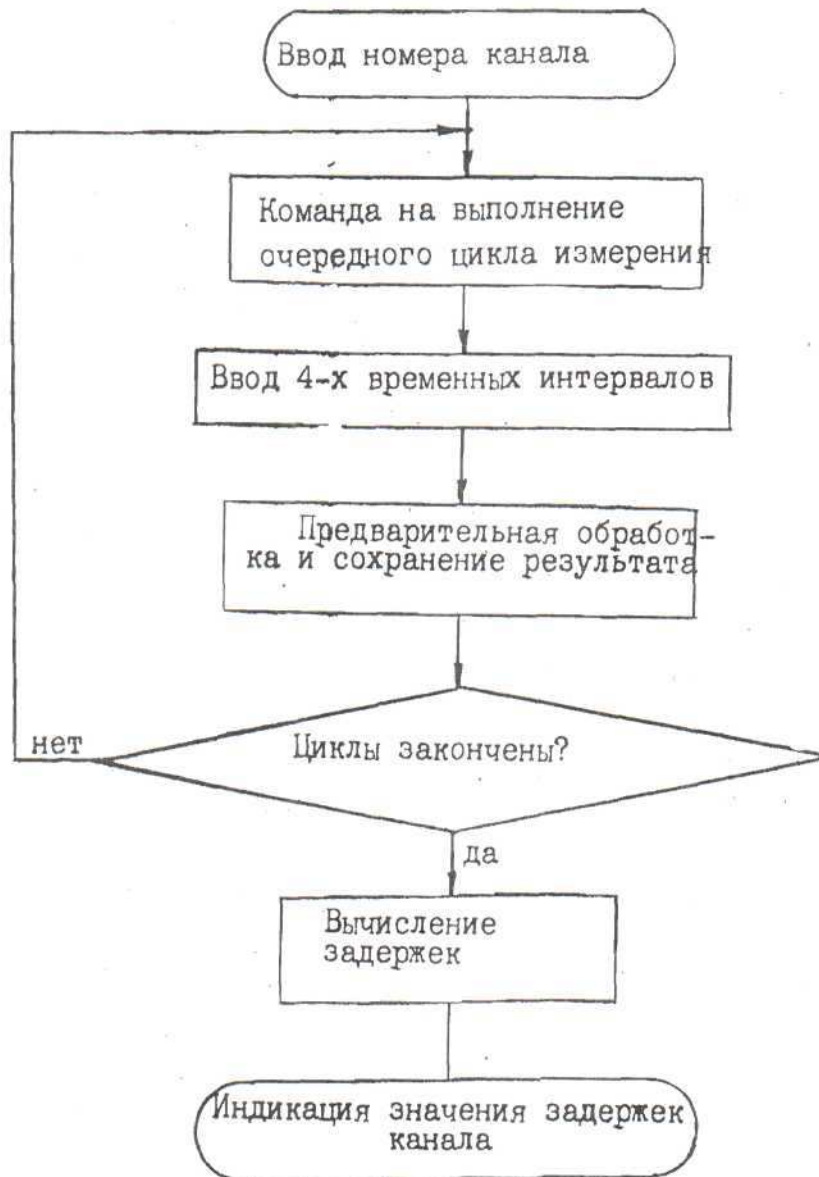
СХЕМА ПОДКЛЮЧЕНИЯ АППАРАТУРЫ СИСТЕМЫ "СПРИНТ" ПРИ ПРОВЕРКЕ  
АКУСТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ, ОПРЕДЕЛЕНИИ ВРЕМЕННЫХ  
ЗАДЕРЖЕК В КАНАЛАХ СИСТЕМЫ И ПРОВЕДЕНИИ ИЗМЕРЕНИЙ



БЛОК-СХЕМА АЛГОРИТМА ПРОГРАММЫ  
НАСТРОЙКИ СИСТЕМЫ "СПРИНТ"



БЛОК-СХЕМА АЛГОРИТМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕННЫХ  
ЗАДЕРЖЕК В КАНАЛАХ СИСТЕМЫ "СПРИНТ"



ПРОТОКОЛ  
измерения временных задержек в каналах  
системы "СПРИНТ"

Номер системы  
Год изготовления  
Наименование объекта  
Номер трубопровода (гидроагрегата)

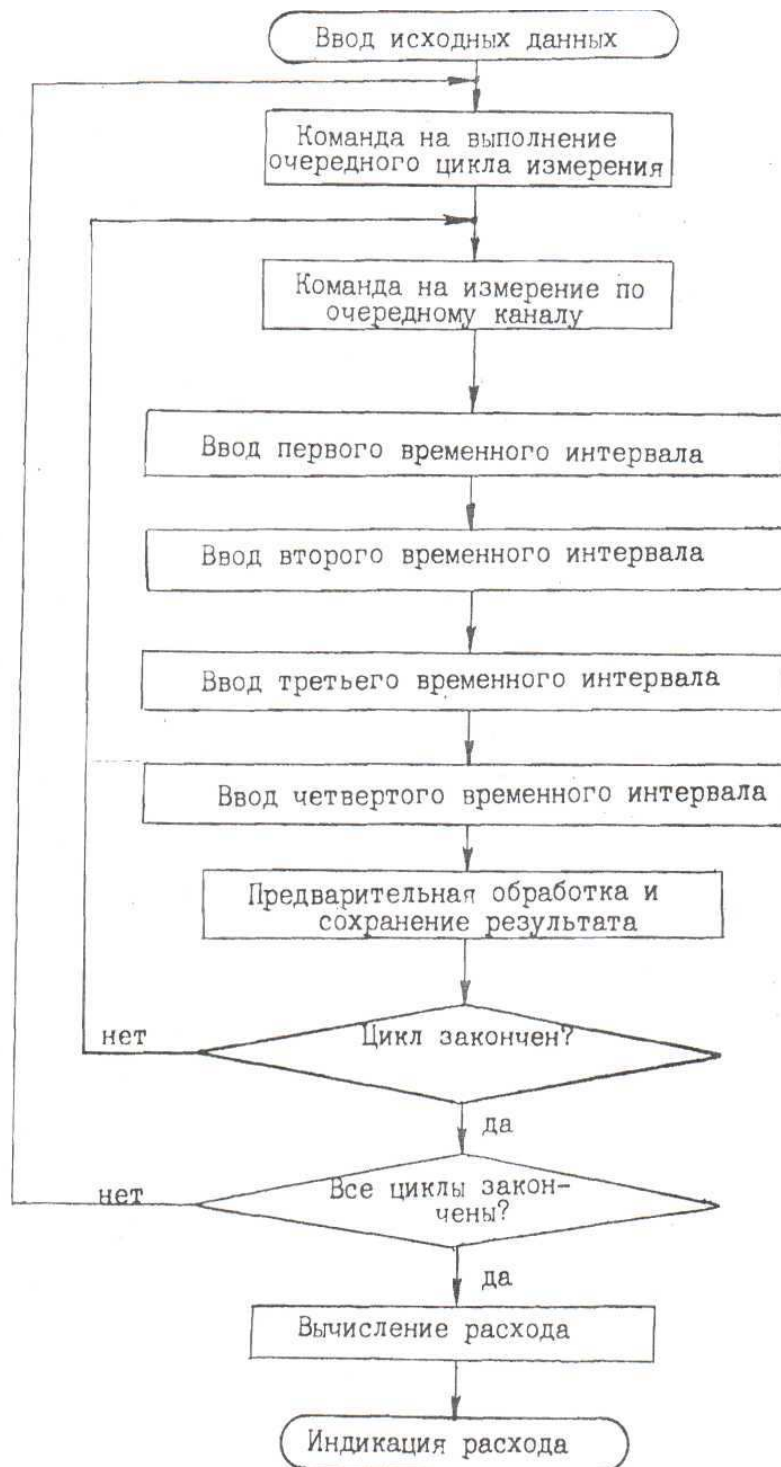
РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ

Номер канала	Кол-во циклов	$t_3^+ \cdot 10^{-8}$ с	$t_3^- \cdot 10^{-8}$ с	СКО	$t_{121} \cdot 10^{-8}$ с	$t_{12} \cdot 10^{-8}$ с	$t_{212} \cdot 10^{-8}$ с	$t_{21} \cdot 10^{-8}$ с
1-2 3-4 5-6 7-8								

Дата

Подпись проводившего  
измерения

БЛОК-СХЕМА АЛГОРИТМА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПРОГРАММЫ  
ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА ВОДЫ СИСТЕМОЙ "СПРИНТ"



ПРОТОКОЛ  
измерения расхода воды системой "СПРИНТ"

Номер системы  
Наименование объекта  
(гидроагрегата)

Год изготовления  
Номер трубопровода

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ

Номер режима	Время измерения	$Q_{\text{изм}}, \text{ м}^3/\text{с}$	$Q_{\text{пр}}, \text{ м}^3/\text{с}$	$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	Погрешность $\gamma, \%$
1	2	3	4	5	6

Дата

Подпись производившего измерения