

ГЛАВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ  
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ СЛУЖБЫ  
ПРИ СОВЕТЕ МИНИСТРОВ СССР

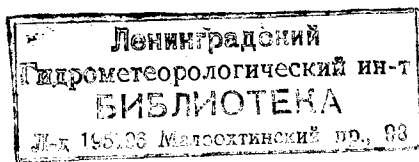
ТРУДЫ  
ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
ГЛАВНОЙ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ  
им. А. И. ВОЕЙКОВА

Выпуск

392

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
И ВОПРОСЫ ПОВЕРКИ  
МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

Под редакцией  
канд. техн. наук  
Н. П. ФАТЕЕВА



ГИДРОМЕТЕОИЗДАТ ЛЕНИНГРАД 1977

551.508.

Посвящен метрологическому обеспечению метеорологических измерений, разработке и внедрению локальных поверочных схем, созданию образцовой аппаратуры для поверки метеоприборов и ее аттестации, а также теоретическим и экспериментальным исследованиям по обоснованию методик поверки и результатам метрологических исследований и испытаний приборов.

Предназначен для работников метрологической службы ГУГМС и специалистов, занимающихся разработкой и эксплуатацией метеорологической аппаратуры.

The publication contains the studies performed at the MGO on the provision of meteorological measurements, the development and introduction of local calibrating circuits, devising standard equipment to calibrate meteorological instruments and to certificate, as well as the theoretical and experimental investigations on basing the calibrating techniques and the results of meteorological studies and instrument tests.

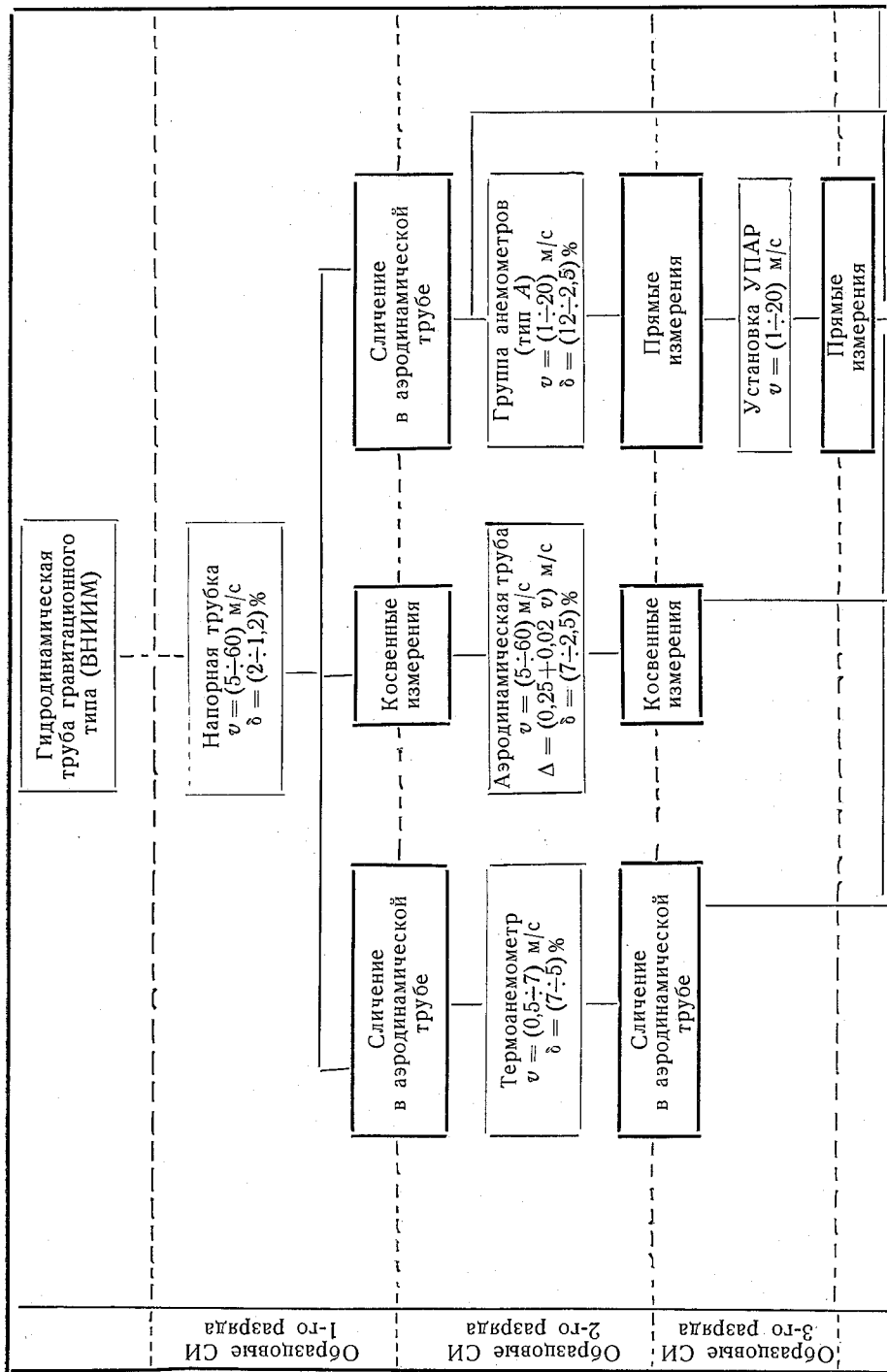
The publication is intended for metrologists working in the Hydrometeorological Service of the USSR and specialists engaged in the development and operation of meteorological instruments.

*Н. П. Фатеев, Б. Л. Сушинский,  
В. А. Кузьмин, Д. Я. Блантер*

### **ОБРАЗЦОВЫЕ СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА, ИХ ИССЛЕДОВАНИЕ И АТТЕСТАЦИЯ**

В течение последних лет в ГГО и ВНИИМ были разработаны и аттестованы новые образцовые средства измерений скорости воздушного потока и предложена усовершенствованная локальная поверочная схема, охватывающая практически все выпускаемые промышленностью рабочие средства измерения (СИ). В этой схеме (рис. 1) в качестве исходного образцового СИ скорости воздушного потока принята напорная трубка I разряда с микроманометром I разряда класса 0,02, обеспечивающая измерение скорости потока в диапазоне 5—60 м/с с относительной погрешностью 2—1,2%. Напорная трубка I разряда аттестуется ВНИИМ с применением гидродинамической трубы гравитационного типа. Поверка приборов осуществляется в образцовых аэродинамических трубах, снабженных измерителем скорости потока, по перепаду давления в отверстиях на входе и выходе сопла трубы. Для измерения перепада давления используются микроманометры класса не хуже 0,6. Градуировка измерителей скорости потока по перепаду давления в отверстиях производится по образцовой напорной трубке I разряда. Погрешность измерения скорости по перепаду давления в сопле в указанном диапазоне не превышает 7—2,5%. При малых скоростях потока (0,6—7 м/с) используется термоанемометр ВНИИМ с погрешностью 7—5%. Градуировка и поверка термоанемометра производится методом непосредственного сличения с образцовой напорной трубкой I разряда в специальной аэродинамической трубе.

Для поверки ручных анемометров применяется установка [7], которая градуируется по группе таких же анемометров, отобранных в качестве образцовых и обеспечивающих измерение скорости воздушного потока в пределах от 1 до 20 м/с с погрешностью 12—2,5%. Градуировка и поверка образцовых анемометров производится методом непосредственного сличения с образцовой напорной трубкой I разряда в аэродинамической трубе.



|                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Корабельный измеритель ветра (КИВ)<br/> <math>v = (2 \div 50)</math> м/с<br/> <math>\Delta = (0,5 + 0,05 v)</math> м/с<br/> <math>\delta = (30 \div 6) \%</math></p>                 | <p>Автоматический радионетромтер М-42<br/> <math>v = (2 \div 40)</math> м/с<br/> <math>\Delta = (1,0 + 0,05 v)</math> м/с<br/> <math>\delta = (55 \div 7,5) \%</math></p> | <p>Преобразователь АРСМ М-107<br/> <math>v = (1 \div 40)</math> м/с<br/> <math>\Delta = (1,0 + 0,05 v)</math> м/с<br/> <math>\delta = (105 \div 7,5) \%</math></p> | <p>Анемораф М27С<br/> <math>v = (5 \div 30)</math> м/с<br/> <math>\Delta = (1,0 + 0,06 v)</math> м/с<br/> <math>\delta = (26 \div 7) \%</math></p>                                                    | <p>Анемометр МС-13 (тип А)<br/> <math>v = (1 \div 20)</math> м/с<br/> <math>\Delta = (0,3 + 0,06 v)</math> м/с<br/> <math>\delta = (36 \div 7,5) \%</math></p> | <p>Анемометр М-25<br/> <math>v = (0,5 \div 35)</math> м/с<br/> <math>\Delta = (0,1 + 0,03 v)</math> м/с<br/> <math>\delta = (23 \div 3,3) \%</math></p> |
| <p>Преобразователь ДМС М-49<br/> Анеморумбометр М47<br/> <math>v = (1,5 \div 50)</math> м/с<br/> <math>\Delta = (0,5 + 0,05 v)</math> м/с<br/> <math>\delta = (38 \div 6) \%</math></p> | <p>Преобразователь СДС ГМ-6<br/> <math>v = (1,5 \div 40)</math> м/с<br/> <math>\Delta = (0,5 + 0,05 v)</math> м/с<br/> <math>\delta = (38 \div 6,2) \%</math></p>         | <p>Анемометр АРИ-49<br/> <math>v = (2 \div 30)</math> м/с<br/> <math>\Delta = (0,5 + 0,05 v)</math> м/с<br/> <math>\delta = (30 \div 6,7) \%</math></p>            | <p>Преобразователи УАТГМС-4м, КРАМС, анеморумбометр М63М (М63М-1)<br/> <math>v = (1,5 \div 60)</math> м/с<br/> <math>\Delta = (0,5 + 0,05 v)</math> м/с<br/> <math>\delta = (38 \div 6) \%</math></p> | <p>Анемометр М-61<br/> <math>v = (1,5 \div 40)</math> м/с<br/> <math>\Delta = (0,5 + 0,05 v)</math> м/с<br/> <math>\delta = (38 \div 6) \%</math></p>          | <p>Анемометр М-92<br/> <math>v = (0,6 \div 40)</math> м/с<br/> <math>\Delta = (0,2 + 0,02 v)</math> м/с<br/> <math>\delta = (35 \div 2,5) \%</math></p> |

Рис. 1. Поверочная схема для средств измерения скорости воздушного потока.

Аттестация всех образцовых средств измерений, предусмотренных поверочной схемой, производится ВНИИМ и ГГО по установленным методикам.

В связи с необходимостью поверки метеорологических измерительных систем и приборов стационарного типа непосредственно на месте эксплуатации разработаны методы контроля сохранности градуировочных характеристик измерительных преобразователей ветра (типа М-63М-1 с литым винтом) без применения аэродинамических труб. В качестве технических средств контроля НИИГМП предложены комплекты приспособлений для проверки сохранности геометрических размеров винта анемометра, величины момента трения в осях винта и флюгарки, а также устройство для проверки электромеханической части указателя [10].

В ГГО разработаны соответствующие методические указания для использования этой методики при периодической поверке.

### Гидродинамическая установка для поверки напорных трубок

Поверка напорных трубок в водном потоке обусловлена отсутствием в настоящее время образцовых средств измерения скорости воздушного потока более высокого класса точности, чем образцовая напорная трубка I разряда. Правомерность поверки в водном потоке напорных трубок, предназначенных для измерения скорости воздуха, основана на постоянстве коэффициента трубок в очень широком диапазоне чисел Рейнольдса ( $Re=330 \div 360\,000$ ) [3, 4]. При поверке в гидродинамической трубе напорных трубок диаметром 8 мм диапазон чисел  $Re=800 \div 80\,000$ , а при измерении указанными напорными трубками скорости воздушного потока диапазон чисел  $Re$  при скоростях 5—60 м/с составляет 250—30 000, т. е. лежит внутри значений чисел  $Re$ , имеющих место при поверке в водной среде.

Принцип действия гидродинамической установки основан на измерении падающего потока воды в рабочей части трубы с известным сечением [12]. При этом должен быть известен объем воды, проходящий через сечение за единицу времени.

Определение скорости  $V_0$  потока воды в рабочей части гидродинамической трубы производят по формуле

$$V_0 = K_k V_{cp}, \quad (1)$$

где  $K_k$  — коэффициент конфузора, определяемый при аттестации;  $V_{cp}$  — средняя скорость, определяемая из формулы

$$V_{cp} = \frac{4 V_6}{\pi d_0 t}, \quad (2)$$

где  $V_6$  — объем мерного бака,  $d_0$  — диаметр выходного сечения конфузора,  $t$  — время заполнения мерного бака.

При  $V_6=28,72$  л,  $d_0=30,19$  мм и  $K_k=1,01$  формула (1) принимает вид

$$V_0 = \frac{1,1428}{t}.$$

При аттестации гидродинамической установки относительная погрешность измерения скорости потока в рабочем участке при ее значениях, превышающих 0,2 м/с, составила 0,2%.

### Напорная трубка

В качестве образцовых напорных трубок I разряда применяются образцовые напорные трубки ВНИИМ [9, 12], технические данные которых представлены в табл. 1.

Таблица 1

| Длина, мм | Диаметр внешний, мм | Диаметр отверстий, мм |
|-----------|---------------------|-----------------------|
| 102       | 6                   | 1,2                   |
| 70        | 4                   | 0,8                   |
| 56        | 3                   | 0,6                   |

Помещенная в поток воздуха трубка воспринимает как полное  $p_n$ , так и статическое  $p_c$  давление в потоке. Разность между полным и статическим давлением представляет собой скоростной напор и зависит от скорости потока  $v$  и плотности воздуха  $\rho$ . Скорость потока с помощью напорной трубки вычисляется по формуле

$$v = K_T \sqrt{\frac{2(p_n - p_c)}{\rho}}, \quad (3)$$

где  $K_T$  — коэффициент напорной трубки.

Погрешность измерения скорости напорными трубками определяется погрешностью их аттестации и погрешностью манометров, применяемых в комплекте с напорными трубками.

Аттестация образцовой напорной трубки I разряда заключается в определении ее коэффициента  $K_T$  и осуществляется методом косвенного измерения скорости потока воздуха в описанной выше гидродинамической трубе высшей точности. Напорная трубка устанавливается в рабочем участке трубы в зоне равных скоростей. Приемная часть ее должна быть установлена по направлению потока с точностью  $\pm 3^\circ$ .

Коэффициент трубки находится по формуле

$$K_T = \frac{v_0}{\sqrt{2g \frac{\Delta p}{\gamma}}}, \quad (4)$$

где  $v_0$  — скорость потока, измеренная по расходу воды в трубе;  $\Delta p$  — разность между полным давлением и статическим, измеренная дифференциальным манометром;  $\gamma$  — плотность воды;  $g$  — ускорение свободного падения тел.

Измерения производятся при нескольких скоростях потока.

Определение коэффициента напорной трубки II разряда осуществляется методом непосредственного сличения с образцовой напорной трубкой I разряда в аэродинамической трубе. Напорные трубки устанавливаются в рабочем участке аэродинамической трубы в зоне равных скоростей на расстоянии друг от друга не менее 10 диаметров приемной части напорной трубки. Образцовая трубка I разряда подключается к дифференциальному манометру класса не хуже 0,02, образцовый прибор II разряда — к манометру класса не хуже 0,6.

Коэффициент аттестуемой трубки  $K_T$  определяется по формуле

$$K_T = K_{T1} \sqrt{\frac{\Delta p_I}{\Delta p_{II}}}, \quad (5)$$

где  $K_{T1}$  — коэффициент напорной трубки I разряда;  $\Delta p_I$ ,  $\Delta p_{II}$  — соответственно разности давлений, измеренные трубкой I и II разряда.

Измерения следует производить при нескольких скоростях потока. В случае если  $K_T$  зависит от скорости, следует построить график зависимости коэффициента трубки  $K_T$  от скорости  $v$ .

По результатам аттестации образцовых напорных трубок ГГО во ВНИИМ коэффициент трубки № 3 составляет 1,00, а трубки № 7 — 0,99.

### Термоанемометр

Термоанемометр предназначен для измерения средней скорости и турбулентных пульсаций скорости потоков воздуха при температуре окружающего воздуха от +10 до +35°C, относительной влажности 80% при температуре +20°C и атмосферном давлении от  $0,9 \cdot 10^5$  до  $1,1 \cdot 10^5$  Па. Он обеспечивает измерение средней скорости  $v_{ср}$  потока в диапазоне 0,6—7 м/с со средним квадратическим значением основной погрешности измерения не более 7—5%.

Принцип работы термоанемометра основан на использовании зависимости сопротивления нагретого проволочного измерительного преобразователя (ИП) от скорости набегающего на него потока [11]. Влияние скорости потока на сопротивление ИП автоматически компенсируется изменением тока посредством электрической обратной связи. Ток нагрева ИП изменяется так, что электрическое сопротивление не изменяется, т. е. температура его поддерживается постоянной. Измерение скорости потока сводится к измерению компенсирующего тока нагрева ИП. Зависимость между компенсирующим током первичного преобразователя и скоростью потока  $v$  описывается выражением

$$I^2 = K_1 + K_2 \sqrt{v}, \quad (6)$$

где  $K_1$  и  $K_2$  — постоянные коэффициенты.

Для аттестации термоанемометров в качестве образцовых средств измерения 2-го разряда в диапазоне скорости от 0,5 до 7,0 м/с применяются двухступенчатые аэродинамические трубы [4].

Одна конструкция такой трубы была разработана, изготовлена и исследована во ВНИИМе (рис. 2). Она представляет собой аэродинамическую трубу прямого действия с двумя последовательно расположенными рабочими участками открытого типа. Первый участок состоит из сотового выпрямителя 1, набора спрямляющих сеток 2, широкого конфузора 3 и герметичной рабочей камеры 5, снабженной координатным устройством для установки средств измерения (градуируемых). Второй участок состоит из сотового выпрямителя 6, набора сеток 7, узкого конфузора 8 и герметичной рабочей камеры 10.

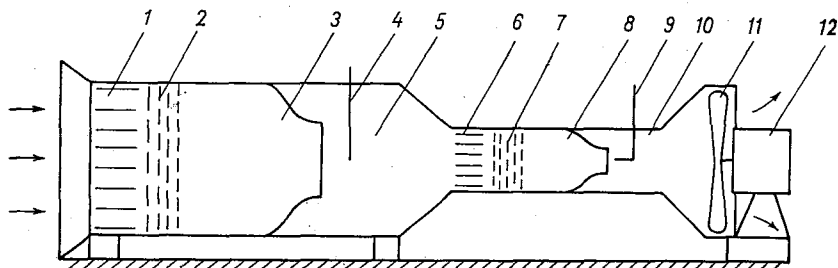


Рис. 2. Двухступенчатая аэродинамическая труба для проверки термоанемометров в диапазоне скоростей 0,5—10 м/с.

Воздушный поток в трубе создается вентилятором 11, который приводится в движение от электродвигателя 12 с регулируемым числом оборотов. Профиль конфузоров 3 и 8 построен по формуле Витшинского [8]. Удлинение профиля равно 7, поджатие 9. Выходные диаметры широкого и узкого конфузоров равны 70 и 20 мм, а общая длина установки составляет 2000 мм. На срезе конфузора 8 можно получить скорость в несколько раз большую, чем на срезе конфузора, и надежно ее измерить. Из условия равенства расходов в обоих конфузорах можно написать

$$v_{\text{ср}1} = v_{\text{ср}2} \frac{F}{f} \quad \text{или} \quad K_1 v_{01} = K_2 v_{02} \frac{F}{f},$$

где  $v_{\text{ср}1}$ ,  $v_{\text{ср}2}$  — средние расходные скорости в рабочих участках;  $F$ ,  $f$  — площади выходных сечений конфузоров;  $K_1$ ,  $K_2$  — коэффициенты, учитывающие профиль скорости на срезе конфузоров;  $v_{01}$ ,  $v_{02}$  — скорости потоков на оси рабочих участков.

Таким образом, скорость воздушного потока  $v_{01}$  на оси рабочего участка 5 может быть определена как

$$v_{01} = \frac{F}{f} \frac{K_2}{K_1} v_{02}. \quad (7)$$

Скорость  $v_{02}$  определяется с помощью образцовой напорной трубки и микроманометра. Коэффициенты  $K_1$  и  $K_2$  определяются при

аттестации трубы. Для описанной конструкции их отношение составляло 1,005, т. е. близко к единице. Поэтому можно считать, что отношение скоростей в конфузоре равно отношению их площадей и  $v_{01} = \frac{F}{f} v_{02}$  с погрешностью, не превышающей 0,5%.

Надежное измерение скоростей воздушного потока напорной трубкой можно производить, начиная со скорости около 5 м/с. При такой скорости в рабочей камере конфузора с выходным диаметром 70 мм скорость будет приблизительно около 0,5 м/с, так как отношение площадей выходных сечений конфузоров составляет 12,25.

Результаты измерения профиля интенсивности турбулентной пульсации показали, что на 80% площади выходного сечения конфузоров интенсивность турбулентной пульсации не зависит от координат и не превышает 0,5%.

### Группа анемометров

Локальная поверочная схема предусматривает возможность поверки ручных анемометров в специальной установке УПАР. Эта установка градуируется посредством образцового средства измерения 2-го разряда, представляющего собой группу анемометров того

Таблица 2

| Погрешность  | Скорость, м/с |       |       |
|--------------|---------------|-------|-------|
|              | 1             | 10    | 20    |
| $3S_T$ м/с   | 0,012         | 0,024 | 0,036 |
| $3S_y$ м/с   | 0,006         | 0,009 | 0,018 |
| $3S_r$ м/с   | 0,018         | 0,033 | 0,054 |
| $\delta_T$ % | 1,2           | 0,24  | 0,18  |
| $\delta_r$ % | 1,8           | 0,33  | 0,27  |

же типа, что и поверяемые. Анемометры, применяемые для градуировки, предварительно поверяются в аэродинамической трубе, скорость воздушного потока в которой измеряется образцовой напорной трубкой I разряда.

Известно [7], что максимальная абсолютная погрешность градуировочной кривой установки ( $3S_r$ ) выражается как алгебраическая сумма максимальных погрешностей поверки ручных анемометров в аэродинамической трубе ( $3S_T$ ) и поверки их в установке ( $3S_y$ ):

$$3S_r = 3S_T + 3S_y.$$

Каждую из составляющих правой части этого выражения определяют как

$$3S = \frac{3\sigma}{\sqrt{(n-1)k}}, \quad (8)$$

где  $\sigma$  — среднее квадратическое отклонение отдельного измерения,  $n$  — число повторений,  $k$  — число приборов.

Максимальная абсолютная погрешность поверки группы анемометров в аэродинамической трубе, в установке и максимальная абсолютная погрешность градуировочной кривой, полученные при 8-кратной поверке 12 ручных анемометров при различных значениях скоростей, приведены в табл. 2.

Из табл. 2 следует, что максимальные относительные погрешности поверки в аэродинамической трубе группы анемометров ( $\delta$ ), применяемых в качестве образцового средства измерения, и погрешности определения градуировочной кривой установки УПАР не превышают 2% номинального значения скорости.

### Аэродинамическая труба

Образцовые аэродинамические трубы предназначены для градуировки и поверки рабочих средств измерения скорости ветра. Скорость потока в трубах измеряется по перепаду давления в сечениях входа и выхода сопла:

$$v = K_c \sqrt{\frac{2\Delta p_c}{\rho}}, \quad (9)$$

где  $K_c$  — коэффициент сопла.

Таблица 3

| Микроманометр     | Скорость, м/с |      |     |      |      |      |      |
|-------------------|---------------|------|-----|------|------|------|------|
|                   | 1             | 2    | 3   | 4    | 5    | 6    | 10   |
| ММН-240 кл. 1,0   | 480           | 120  | 53  | 30   | 19   | 13,5 | 1,2  |
| ММН-240 кл. 0,6   | 288           | 72   | 32  | 18   | 11,5 | 8    | 0,7  |
| МКВ-250 кл. 0,025 | 50            | 12,5 | 5,6 | 3,1  | 2    | 1,4  | 0,12 |
| МКВ-250 кл. 0,020 | 40            | 10   | 4,6 | 2,5  | 1,6  | 1,1  | 0,1  |
| Рабочие средства  | 55            | 30   | 22  | 17,5 | 15   | 13   | 7    |

Погрешность измерения скорости в трубе определяется погрешностью определения коэффициента  $K_c$  и погрешностью измерения давления  $\Delta p_c$ . В области малых скоростей и, следовательно, малых перепадов давлений основная доля приходится на погрешность измерения давления. В связи с этим представляет интерес провести оценку погрешностей, получаемых при работе с манометрами различных классов точности. Для многопредельных жидкостных микро-

манометров с наклонной трубкой типа ММН-240 кл. 1,0 и 0,6 и жидкостных компенсационных микроманометров с микрометрическим винтом типа ММ-250 кл. 0,25 и 0,20 такая оценка дана в табл. 3.

Из таблицы следует, что погрешности измерения давления микроманометрами, обусловленные их классом точности при скоростях 1 м/с, достигают сотен процентов. Индивидуальная градуировка микроманометров могла бы снизить погрешности измерения давления, но в настоящее время она не предусмотрена нормативно-технической документацией. На точность измерения скорости в трубе влияет также загруженность сечения трубы поверяемым прибором.

Длина рабочей части аэродинамической трубы должна обеспечивать свободное размещение наибольшего из поверяемых в ней приборов. Учитывая, что наибольшие размеры имеет прибор М-63М и его ветроприемник должен располагаться в 200 мм от среза сопла, длина рабочей части трубы не должна быть меньше 850 мм. Площадь ветроприемника должна быть не более 10% сечения рабочего участка [5].

### Методика аттестации аэродинамических труб

При аттестации аэродинамических труб проверяется их соответствие техническим требованиям, изложенным в руководящих материалах на аттестацию. Технические требования предусматривают основную погрешность измерения скорости воздушного потока, не превышающую  $\pm (0,25 + 0,02 v)$ , погрешность из-за неустойчивости, не превышающую  $1/3$  основной погрешности, и погрешность из-за неравномерности поля скоростей, не превышающую 3—4%. Кроме того, неустойчивость в рабочей зоне поля турбулентных пульсаций не должна превышать 3—4%, угол скоса потока не должен превышать 2°, а предельная погрешность результата определения коэффициента сопла должна быть не больше 4—1,5%.

Для исследования поля скоростей аэродинамической трубы, определения основной погрешности измерения скорости и коэффициента сопла при ее аттестации необходима образцовая напорная трубка I разряда с микроманометрами МКВ кл. 0,02 и ММН кл. 0,6. Для определения угла скоса воздушного потока необходим дополнительно датчик скоса потока. Кроме того, для исследования поля интенсивности турбулентных пульсаций в рабочих сечениях требуется термоанемометр с проволочным преобразователем. Температура воздуха в помещении должна быть от +10 до +35°C, относительная влажность 80% при температуре +20°C, а атмосферное давление должно быть от  $0,9 \cdot 10^5$  до  $1,1 \cdot 10^5$  Па.

Исследование поля скоростей производится двумя напорными трубками, одна из которых должна быть установлена на оси рабочего участка аэродинамической трубы, а другая должна быть закреплена на координатном устройстве. Устройство это должно позволять устанавливать напорную трубку в любой точке плоскости среза сопла в двух вертикальных плоскостях участка размещения поверяемых приборов с равномерным шагом, не превышающим 100 мм.

Измерения напорной трубкой производят в диапазоне от 5 м/с до верхнего предела скорости воздушного потока в аэродинамической трубе. На задаваемых скоростях на каждой точке исследуемых сечений производят 5-кратные измерения перепада давления на оси рабочего участка ( $\Delta p_0 = p_{\pi} - p_0$ ) и перепада давления в исследуемой точке сечения ( $\Delta p_i = p_{\pi i} - p_i$ ). Затем определяют скорости воздушного потока в каждой точке по формулам

$$v = K_{\tau 0} \sqrt{\frac{2 \Delta p_0}{\rho}}, \quad (10)$$

$$v_i = K_{\tau} \sqrt{\frac{2 \Delta p_i}{\rho}}, \quad (11)$$

где  $K_{\tau 0}$  и  $K_{\tau}$  — коэффициенты напорных трубок; после чего находят среднее значение скорости.

По полученным результатам производят оценку неравномерности поля скоростей  $\mu_i$ , представляющую собой отношение средней скорости в  $i$ -той точке исследуемого сечения  $\bar{v}_i$  к средней в этом сечении скорости  $\bar{v}_x$

$$\mu_i = \frac{\bar{v}_i}{\bar{v}_x}. \quad (12)$$

Значения средней скорости в сечении определяют как

$$\bar{v}_x = \frac{\sum_{i=1}^m \bar{v}_i}{m}, \quad (13)$$

где  $m$  — число точек в каждом сечении.

По полученным данным строят графики для каждого сечения и каждой скорости, определяя зоны равных скоростей, в которых скорости не должны отличаться от средней скорости в сечении более чем на 3—4%.

При определении поля интенсивности турбулентных пульсаций измерения производятся термоанемометром в зоне равных скоростей каждого из сечений в тех же точках и при тех же скоростях, что и при исследовании поля скоростей. Значение пульсаций  $\epsilon_i$  определяют по формуле

$$\epsilon_i = \frac{4uu'}{u^2 - u_0^2}, \quad (14)$$

где  $u$  — показание термоанемометра при скорости  $v$ ;  $u_0$  — показание термоанемометра при скорости  $v=0$ ;  $u'$  — среднеквадратическое значение пульсаций напряжений на выходе термоанемометра.

При аттестации определяют нестабильность скорости воздушного потока в аэродинамической трубе посредством измерения скорости воздушного потока с применением напорной трубки, проводя не менее 10 измерений через равные промежутки времени, необходимого для проверки приборов. Погрешность от нестабильности ско-

рости не должна превышать  $1/3$  основной погрешности измерения скорости в трубе.

Определение угла скоса производят с помощью угломерных насадков. Насадок устанавливают в зоне равных скоростей на срезе сопла и в зоне расположения поверяемого преобразователя скорости на поворотном координатнике. Совмещение оси насадка с направлением потока при медленном повороте координатника определяют по наибольшему показанию микроманометра. При этом угол поворота координатника является углом скоса потока, который не должен превышать  $2^\circ$ .

Коэффициент сопла  $K_c$  при аттестации определяют сличением показаний средства измерений по перепаду давлений, входящего в состав образцовой аэродинамической трубы, с показанием образцовой напорной трубки, которую устанавливают в зоне равных скоростей в области наименьшей неравномерности потока. Измерения проводят не менее, чем при пяти скоростях в их диапазоне. Коэффициент  $K_c$  определяют по формуле:

$$K_c = K_T \sqrt{\frac{\Delta p_T}{\Delta p_c}}, \quad (15)$$

где  $K_T$  — коэффициент образцовой трубки I разряда;  $\Delta p_T$  — показания манометра, подключенного к образцовой трубке;  $\Delta p_c$  — показания манометра, подключенного к сечениям входа и выхода сопла.

Предельная погрешность определения  $K_c$  не должна превышать  $4\%$ .

При определении основной погрешности измерения скорости воздушного потока в образцовой аэродинамической трубе скорость потока определяют по формуле

$$v = K_c \sqrt{\frac{2 \Delta p_c}{\rho}}, \quad (16)$$

где  $\rho$  — плотность воздуха с учетом температуры и давления.

Основная погрешность  $\Delta_v$  измерения скорости в трубе определяется погрешностью  $\Delta_{K_c}$  определения коэффициента  $K_c$  и допустимой погрешностью микроманометра  $\Delta_p$ , измеряющего перепад давления в сечениях входа и выхода сопла:

$$\Delta_v = \sqrt{\Delta_{K_c}^2 + \left(\frac{1}{2} \Delta_p\right)^2}. \quad (17)$$

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фатеев Н. П. Поверка метеорологических приборов. Л., Гидрометеиздат, 1975. 310 с.
2. Содержание и построение поверочных схем. ГОСТ 8.061-73. М., Изд-во стандартов.
3. Горлин С. М., Слезангер И. И. Аэромеханические измерения. М., «Наука», 1964.
4. Попов С. Г. Некоторые задачи и методы экспериментальной аэродинамики. М., Гостехиздат, 1952. 87 с.

5. Фатеев Н. П. Исследование величины поправок на ограниченность потока при градуировке анемометров.— «Тр. ГГО», 1969, вып. 244.
6. Микроанометры жидкостные. Типы и основные параметры. ГОСТ 11161-71. М., Изд-во стандартов.
7. Дьяченко П. В. Установка для поверки ртутных анемометров.— «Тр. ГГО», 1966, вып. 61(123).
8. Горшков А. С., Русецкий А. А. Кавитационные трубы. М., Судостроение, 1972.
9. Руководство по поверке метеорологических приборов. Под ред. И. А. Покровской Л., Гидрометеиздат, 1967. 419 с.
10. Шестопалов Л. А., Кранцберг А. С. Унифицированный датчик ветра.— «Тр. НИИГМП», 1972, вып. 26, с. 3—12.
11. Оуэр Э. Измерения воздушных потоков (аэрометрия). ОНТИ НКТП СССР, 1935.
12. Гуткин Б. Г., Кузьмин В. А., Тартаковский Д. Ф. Поверочные гидродинамические стенды.— «Труды метрологических институтов СССР», 1975, вып. 157(217).

*В. А. Клеванцова, Г. А. Никольский,  
Ю. А. Скляр*

**СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ МЕЖДУНАРОДНОЙ  
ПИРГЕЛИОМЕТРИЧЕСКОЙ ШКАЛЫ.  
МЕЖДУНАРОДНЫЕ СРАВНЕНИЯ  
ПИРГЕЛИОМЕТРОВ В 1975 г.**

Измерения солнечной радиации в странах, входящих во Всемирную метеорологическую организацию (ВМО), проводятся в единицах Международной пиргелиометрической шкалы 1956 г. (МПШ-56), которая была введена Радиационной комиссией Международной метеорологической ассоциации (ММА) и рабочей группой по радиации ВМО с 1 июня 1957 г. МПШ-56 — компромиссная шкала, основанная на двух шкалах — оригинальной пиргелиометрической шкале Ангстрема с поправкой  $+1,5\%$  и пиргелиометрической шкале Смитсоновского института 1913 г. с поправкой  $-2,0\%$ . Надо отметить, что разница шкал в  $3,5\%$ , по-видимому, была принята без достаточных оснований, в частности, не было оговорено, для каких конструкций приборов и при каких условиях прозрачности

Таблица 1  
Расхождения показаний приборов, представляющих  
оригинальную ангстремовскую и смитсоновскую шкалы

| Исследователь          | Год  | Расхождение показаний, % | Примечания            |
|------------------------|------|--------------------------|-----------------------|
| Кимбал [5] . . . . .   | 1910 | 5,4                      |                       |
| Ангстрем [6] . . . . . | 1919 | 3,3                      |                       |
| Мартен [1] . . . . .   | 1922 | 3,4                      |                       |
| Хинцпетер [7] . . . .  | 1952 | 5,1                      |                       |
| Курвуазье [8] . . . .  | 1957 | 3,5                      | Значительная мутность |
|                        |      | 5,1                      | Чистая атмосфера      |
| Латимер [9] . . . . .  | 1973 | 4,6                      |                       |

атмосферы (при проведении сравнений) установлено это различие шкал.

Оригинальная пиргелиометрическая шкала Ангстрема основана на показаниях компенсационного пиргелиометра Ангстрема № 70, шкала которого была абсолютизирована в Шведском гидрометеорологическом институте. Вторичными эталонами являются приборы № 158 и 153, сравнивавшиеся непосредственно с № 70. Смитсоновская пиргелиометрическая шкала 1913 г. основана на показаниях водоструйного пиргелиометра № 5. В качестве вторичных эталонов для передачи шкалы использовались пиргелиометры с серебряным диском.

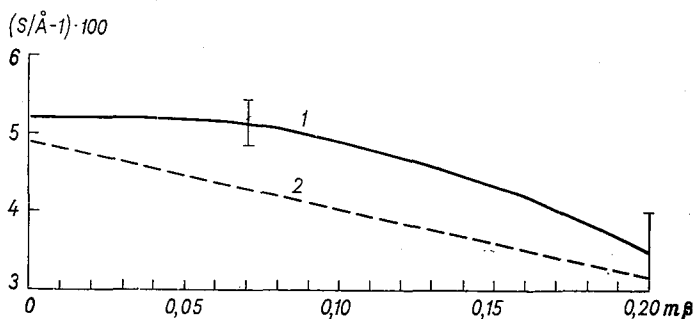


Рис. 1. Различие между смитсоновской (S) и ангстремовской (A) шкалами (проценты) в зависимости от параметра  $m\beta$  (нелинейная аппроксимация) (1) и зависимость, представленная Линдхольмом (2).

Как компенсационные пиргелиометры Ангстрема, так и водоструйные пиргелиометры исследовались как абсолютные приборы в ряде работ. При этом были получены разные значения систематических погрешностей. Так, поправка для компенсационных пиргелиометров Ангстрема, найденная Мартеном [1] и Ангстремом [2], изменялась от 1,3 до 3,8% в зависимости от условий измерений. Линдхольм [3] нашел значение поправки, равное 2,4%. К показаниям водоструйного пиргелиометра была найдена поправка — 2,5% [4].

Сравнения показаний приборов, представляющих ангстремовскую и смитсоновскую шкалы, проводились в разное время, разными учеными и при разных условиях мутности атмосферы. Следует отметить, что сравнивались только вторичные эталоны. Разности в показаниях представителей двух шкал колебались от 3,4 до 5,4% (табл. 1). Показания пиргелиометров, градуированных в смитсоновской шкале, всегда выше показаний приборов в ангстремовской шкале.

Как показано в обзорных работах Латимера [9] и Фрелиха [10], можно считать, что разница между смитсонианской и оригинальной ангстремовской шкалами составляет  $5,0 \pm 0,7\%$ , считая поправку к оригинальной шкале Ангстрема равной  $+2,4 \pm 0,7\%$ , а поправку к смитсонианской шкале 1913 г. равной  $-2,6 \pm 0,7\%$ .

Расхождения между шкалами, полученные при сравнении пиргелиометров, обусловлены систематическими погрешностями приборов, воспроизводящих эти шкалы, различиями в их апертурах, а также случайными погрешностями, зависящими от условий сравнений и качества электроизмерительной аппаратуры. Следует отметить, что приборы, представлявшие определенную шкалу, в большинстве случаев имели различные апертурные параметры. В работе [16] было показано, что зависимость отношений показаний сравниваемых разноапертурных пиргелиометров от мутности имеет нелинейный характер. Используя данные сравнений из работ [6, 7], и были сделаны оценки расхождения ангстремовской и смитсонианской пиргелиометрических шкал. При исчезающе малых мутностях ( $mB_{500} \leq 0,05$ ) различие между шкалами составляет  $5,2\% \pm \pm 0,5$  (рис. 1).

Передача единицы МПШ-56 от Международного эталона к региональным производится на Международных сравнениях пиргелиометров (МСП), которые проводились в Давосе (Швейцария) в 1959, 1964, 1970 и 1975 гг. Для сохранения и передачи единицы МПШ использовались три пиргелиометра Ангстрема (№ 158, 210, 525). На МСП-1 в качестве основного эталона использовался пиргелиометр № 158, но так как он присутствовал на сравнениях не полный срок, то в качестве эталона был принят № 210, постоянная которого для согласования его показаний с пиргелиометром № 158 была уменьшена на 0,59%. Постоянные приборов, принимавших участие в МСП-1 и МСП-II, были сдвинуты в соответствии с показаниями пиргелиометра № 210. Изменена и постоянная эталонного пиргелиометра Гидрометслужбы СССР № 212 на МСП-II, она была уменьшена на 0,8%. Подробное описание МСП-1, II, III и приборов, представленных на них, приведено в [11].

Участие вторичного эталона № 158, получившего постоянную в Стокгольме, в сравнениях в Давосе в условиях более чистой атмосферы и использование его на МСП-1 и МСП-II без фильтровой насадки должно было вызвать занижение его показаний. Роде [12] оценил возможное занижение показаний этим прибором вследствие переноса его в Давос в 0,3—0,4%.

В 1969 г. на региональных сравнениях в Карпантра, а затем ч на МСП-III выяснилось, что показания пиргелиометра № 158 завышены на 1,1% по сравнению с показаниями пиргелиометров № 210, 525, 21 и др. Возникшее расхождение между тремя производителями МПШ не может быть исправлено посредством сравнения с первичным эталоном, поскольку к этому времени эталонные приборы, на показаниях которых основаны шкалы Ангстрема (№ 70) и Смитсонианского института 1913 г. (водоструйный пиргелиометр), уже не существовали. Поэтому на МСП-III была создана эталонная

группа из семи компенсационных пиргелиометров Ангстрема № 525, 21, 212, 140, 542, 2273, 576. Это приборы, постоянные которых за период с МСП-II изменились менее, чем на  $\pm 0,5\%$ , среднеквадратические отклонения во время МСП-III не превышали  $0,3\%$ , а влияние атмосферной мутности на их показания при  $m\beta \leq 0,3$  не превышало  $0,5\%$ . Если проанализировать данные Международных сравнений в отношении изменений постоянных основных пиргелиометров, входящих в эталонную группу, то видно, что за весь период с 1959 по 1970 г. постоянные этой группы приборов снизились в среднем на  $1\%$  (табл. 2).

Таблица 2

Изменение постоянных пиргелиометров по данным международных сравнений (%)

| МСП                                                     | Приборы, относительно которых дано изменение постоянных | № пиргелиометров эталонной группы на МСП-III |       |       |      |       |       |       |       |      |      |
|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|----------------------------------------------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|------|------|
|                                                         |                                                         | 158                                          | 158*  | 210   | 525  | 21    | 212   | 140   | 542   | 2273 | 576  |
| I                                                       | 158* без фильтровой насадки . . .                       |                                              |       | -0,59 |      |       |       |       |       |      |      |
|                                                         | 210                                                     |                                              |       |       | -0,2 | -0,4  |       | -2,2  |       |      |      |
| II                                                      | 158*                                                    |                                              |       | 0,2   |      |       |       |       |       |      |      |
|                                                         | 210                                                     |                                              |       |       | 0,0  | -0,2  | -0,8  | 0,5   | -1,0  | 0,0  |      |
| III                                                     | Эталонная группа                                        | -1,2                                         | -0,95 | -0,03 | 0,31 | -0,45 | -0,22 | -0,49 | 0,01  | 0,43 | 0,31 |
| Суммарное изменение постоянных за весь период МСП I—III |                                                         |                                              |       | -0,42 | 0,11 | -1,05 | -1,02 | -2,19 | -0,99 |      |      |

Роде [13] полагает, что причиной расхождения показаний пиргелиометров № 158 и № 210 на МСП-I и МСП-II были ошибочные показания миллиамперметра при пиргелиометре № 158. Если принять это объяснение, то, возможно, изменение постоянных сравниваемых пиргелиометров на  $-0,6\%$  на МСП-I и МСП-II было ошибочным. Если вспомнить, что при работе пиргелиометра № 158 в Давосе занижение показаний этого прибора по сравнению с его показаниями в Стокгольме оценивается в  $0,3-0,4\%$ , а погрешность показаний № 158 на МСП-I и МСП-II за счет шкаловой поправки миллиамперметра оценивается в  $0,6\%$ , то в сумме это и составляет занижение на  $1\%$ .

Эти данные свидетельствуют о том, что на МСП-I, II, III МПШ-56 воспроизводилась с погрешностью  $1\%$  или более. Таким

образом, можно констатировать, что в настоящее время нет конкретного прибора, воспроизводящего единицу МПШ-56 с необходимой точностью. Кроме того, назрел вопрос и об уточнении абсолютного уровня МПШ, что может быть достигнуто при переходе к шкале, основанной на показаниях группы абсолютных пиргелиометров, в которых использованы разные способы воспроизводства абсолютной шкалы. Однако переходить на новую шкалу есть смысл только в том случае, если, во-первых, измерения обеспечивают воспроизведение единицы СИ с большей точностью, чем в настоящее время, и, во-вторых, если будет обеспечено поддержание постоянства шкалы. В последние годы разработаны новые абсолютные пиргелиометры и проведены их сравнения с приборами, представляющими МПШ-56 [9,

Таблица 3

**Показания абсолютных пиргелиометров относительно МПШ-56, фиксированной на МСП-III**

| Год  | Сравниваемые приборы                                                                    | Расхождение показаний, % | Место сравнения и источник       |
|------|-----------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|----------------------------------|
| 1970 | ПАКРАД с № 210 . . . . .                                                                | $1,9 \pm 0,3$            | МСП-III [10]                     |
|      | Прибор Гейста с № 210 . . .                                                             | $1,8 \pm 0,2$            | То же                            |
| 1970 | АКР — прибор Вилсона с пиргелиометром Ангстрема производства лаборатории Эпли . . . . . | $2,2 \pm 0,5$            | Вилсон [14]                      |
| 1972 | То же . . . . .                                                                         | $2,3 \pm 0,3$            | Латимер [9] (Столовая гора, США) |
| 1973 | ПМО с № 210 . . . . .                                                                   | $1,9 \pm 0,3$            | Фрёлих [10]                      |
|      | ПАКРАД с № 210 . . . . .                                                                | $1,9 \pm 0,3$            | То же                            |

10, 14]. Результаты этих сравнений приведены в табл. 3. В среднем новые абсолютные пиргелиометры дают измерения солнечной радиации на 2% выше МПШ-56, фиксированной на МСП-III.

В октябре 1975 г. в Давосе состоялись четвертые Международные сравнения пиргелиометров, на которых было представлено 32 компенсационных пиргелиометра Ангстрема и ряд других региональных эталонных пиргелиометров. Советский Союз представил три прибора: эталонный пиргелиометр СССР № 212, эталонный пиргелиометр ЛГУ № 575 и болометрический пиргелиометр Саратовского университета. На МСП-IV также было организовано сравнение абсолютных приборов. Всего было представлено 12 абсолютных пиргелиометров. В том числе два полостных пиргелиометра конструкции Вилсона (АКР), восемь полостных пиргелиометров типа ПАКРАД и ПМО, пиргелиометр конструкции Кроммелинка и болометрический пиргелиометр конструкции Склярова, представленный СССР. Из всех этих абсолютных приборов, представленных на МСП-IV, только пиргелиометр Кендалла — ПАКРАД-3 принимал участие

в сравнениях на МСП-III. Материалы различных сравнений вплоть до октября 1975 г. подтверждают стабильность показаний этого прибора. На МСП-IV о стабильности ПАКРАД-3 можно было судить по приборам эталонной группы. Кендаллом были проведены оценки некоторых систематических погрешностей ПАКРАДа [15]. С учетом всего этого прибор ПАКРАД-3 использовался в качестве эталонного опорного прибора на МСП-IV. Комиссией по подготовке рекомендаций по итогам МСП-IV было высказано предложение об использовании прибора Кендалла в дальнейшем в качестве основного эталонного пиргелиометра.

Из предварительных результатов сравнений МСП-IV следует, что показания пиргелиометров, представлявших МПШ-56, и абсолютных приборов различаются на 1,8—2,0%. Советские приборы показали стабильные результаты, подтвердили свои прежние калибровочные множители и определили положение своих шкал относительно предлагаемой абсолютной радиационной шкалы с точностью 0,2—0,3%. Однако, учитывая, что оригинальный прибор ПАКРАД-3 был представлен в одном экземпляре, представляется более целесообразным установление эталона и переход к новой абсолютной шкале отложить до создания эталонной группы абсолютных приборов. По нашему мнению, эталонная группа должна состоять из абсолютных приборов, действующих на различных принципах. Каждый тип прибора должен быть представлен не меньше, чем тремя экземплярами, как это рекомендовано ВМО для региональных радиационных центров. К участию в создании эталонной группы абсолютных приборов следует допускать пиргелиометры или радиометры, подтвердившие стабильность их показаний в течение 5 лет и более. Систематические погрешности и поправочные факторы каждого из таких приборов должны быть тщательно оценены и заранее представлены к началу очередных сравнений.

Создание эталонной группы абсолютных приборов позволило бы выявить влияние старения на отдельные типы приборов, выбрать наиболее надежные в смысле стабильности во времени и воспроизводимости единицы шкалы. Другие типы пиргелиометров из числа эталонной группы могли бы служить в качестве контрольных для проверки состояния основного эталона. Целесообразно разработать положение о порядке хранения и взаимных сравнений пиргелиометров эталонной группы (по опыту поддержания эталонов других физических единиц). Следует также разработать и утвердить единую методику проведения сравнений пиргелиометров с различными апертурами.

Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова является мировым центром по радиации, а также ответственной за передачу единицы радиационной шкалы к первичным приборам социалистических стран. Поэтому, принимая во внимание опыт проведения МСП, считаем, что необходимо создать в нашей стране специальную станцию для проведения региональных и внутрисоюзных сравнений. Такая станция должна быть расположена на высоте 2—2,5 км и оснащена современной измерительной и вычислительной аппаратурой.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Marten W. Zur Frage der absoluten pyrheliometrischen Skala.—„Meteorol. Zschr.” 1922, v. 39, N 11, p.13—15.
2. Ångström A. K. On Pyrheliometric Measurements.—„Tellus”, 1958, v. 10, N 3, p. 342—354.
3. Lindholm F. The Ångström Compensation Pyrheliometer and the Absolute Pyrheliometric Scale.—„Geof. pyr. e applicata.”, 1959, v. 42, N 3, p. 177—182.
4. Aldrich L. B., Abbot C. G. Smithsonian Pyrheliometry and the standard Scale of Solar Radiation.—„Smith. Misc. Coll.”, 1948, v. 110, N 5, p. 48—54.
5. Kimball H. H. Solar Radiation Atmospheric Absorption and Sky Polarization at Washington.—„Bull. Mont Weather obs.” 1910, v. 3, p. III, p. 69.
6. Ångström A. K. Note on comparison between pyrheliometers and on the difference between the Ångström Standard and the Smithsonian standard.—„Month. Weath. Rev.”, 1919, v. 47, p. 798—799.
7. Hinzpeter H. Über die Repräsentanten der Ångström-Skala und der Smithsonian-Skala des Observatoriums Potsdam.—„Zeitschrift für meteorologie.” Bd 10, N 9, 1956, p. 257—263.
8. Ångström A. K. Some fundamental principles concerning calibration and standartization of pyrheliometers. S. M. H. J., Notiser och preliminära rapporter. ser.—„Met.” 1964. N 10, Stockholm, p. 16.
9. Latimer J. K. On the Ångström and Smithsonian Absolute Pyrheliometric scales and the International Pyrheliometric Scale. 1956, p. 12, Proc. Int. Sol. Energy Soc. Conf., Paris, 1973.
10. Fröhlich C. The relation between the JPS now in Use and Smithsonian Scale 1913, Ångström Scale and Absolute scale. Proc. Smithsonian Symp. Rockville, Maryland, 1973, p. 10.
11. Покровская И. А. О воспроизведении и хранении Международной пирелиометрической шкалы 1956 г.—«Тр. ГГО», 1975, вып. 331, с. 105—111.
12. Rodhe B. Pyrheliometric measurements with special regard to the circum-solar sky radiation.—„Note technique.” 1967, N 85, p. 29—35.
13. Rodhe B. The Representation of the JPS 1956 by the Stockholm Reference Pyrheliometer A 158. The Third Intern. Pyrheliometer Comparison. Davos and Locarno. 1970. Final Report, N 362. Appendix G. WMO. Geneva, 1973, p. 8.
14. Willson K. L. New radiometric techniques and solar constant measurements.—„Solar Energy”, 1973, v. 14, N 2, p. 203—211.
15. Kendall J. M., Berdahl C. M. 1970. JMO blackbody radiometers of high accuracy.—„Applied Optics,” 1970, v. 9, p. 1082—91.
16. Nikolsky G. A. Increase in the accuracy of the reproduction of the absolute pyrheliometric scale—Radiation transfer in the atmosphere. Papers to the Symp. on Radiation, Garmisch-Partencirchen, FRG. Publ. Univ. of Lenin-grad, 1976, p. 118—131.

*Н. П. Фатеев, Г. И. Полухин,  
А. В. Цвелик*

### ИССЛЕДОВАНИЕ И АТТЕСТАЦИЯ ОБРАЗЦОВЫХ ГРУЗОПОРШНЕВЫХ МАНОМЕТРОВ АБСОЛЮТНОГО ДАВЛЕНИЯ

В задачу настоящего исследования входила аттестация образцового грузопоршневого манометра абсолютного давления I разряда МАД-ЗМ № 6 и выполнение работ по модернизации, исследованию и аттестации опытных образцов инспекторского грузопоршневого манометра ИМАД-4М. Грузопоршневой манометр МАД-ЗМ № 6 хранится в ГГО и является исходным образцовым средством измерения Гидрометслужбы при аттестации образцовых манометров абсолютного давления и барометров II и III разрядов и поверке метеорологических барометров и преобразователей давления в диапазоне 27—1100 мбар. Устройство и технические характеристики манометра рассмотрены в работе [1]. Измеряемое манометром давление находится по формуле, полученной из условия равновесия поршня:

$$p_a = \frac{Mg \left(1 - \frac{\rho_B}{\rho}\right) - N}{F_1[1 + 2\alpha(t - t_n)]} + p_B \frac{F_1 - F_2}{F_1} + p_0, \quad (1)$$

где  $M$  — масса поршня и грузов, уравновешивающих давление, кг;  $g$  — местное ускорение свободного падения тел, м/с<sup>2</sup>;  $\rho_B$  — плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho$  — условная плотность материала грузов, кг/м<sup>3</sup>;  $N$  — показания весов;  $F_1$  и  $F_2$  — приведенная площадь соответственно нижней и верхней частей поршня, м<sup>2</sup>;  $\alpha$  — коэффициент линейного расширения материала поршня и цилиндров от температуры  $t$  К;  $t_n$  — нормальная температура, К;  $p_B$  — атмосферное давление во время измерения, Па;  $p_0$  — остаточное давление над поршнем.

Учитывая это выражение, можно представить суммарную относительную погрешность манометра в следующем виде:

$$\delta = \frac{\Delta g}{g} + \frac{\Delta M}{M} + \frac{\Delta F_1}{F_1} + 2\alpha \Delta t + \frac{F_1 - F_2}{F_1} \frac{\Delta p_B}{p_B} + \frac{\Delta p_0}{p_0}. \quad (2)$$

Как показывают подсчеты, основными погрешностями манометра являются погрешности в определении массы грузов и площади поршня, т. е. величин  $\Delta M$  и  $\Delta F$ .

Остальными погрешностями можно пренебречь. Величины  $M$  и  $F$  определяются при аттестации прибора.

Применение в манометре грузов большой массы позволяет снизить относительную погрешность измерения  $M$  до значения

$$\frac{\Delta M}{M} \leq 2 \cdot 10^{-3} \%.$$

Определение приведенной площади  $F$  по данным ВНИИМ можно производить с такой же точностью. Таким образом, теоретическая погрешность манометра не должна превышать  $\delta \leq 0,005 \% (0,05 \text{ мбар})$ .

Экспериментальные исследования манометра МАД-3М, проведенные во ВНИИМ путем поэлементных определений его параметров и в ГГО путем сличения его с эталонными ртутными барометрами Гидрометслужбы (1972 г.), показали, что предельная погрешность МАД-3М составляет 0,05—0,1 мбар во всем диапазоне измерений.

При исследовании грузопоршневых манометров ВНИИМ были определены следующие их характеристики:

- 1) приведенная площадь нижней части поршня;
- 2) разность приведенных площадей нижней и верхней частей поршня;
- 3) масса поршня и грузов;
- 4) порог чувствительности;
- 5) момент трения поводкового механизма;
- 6) величина зазора между поршнем и нижним цилиндром.

Приведенная площадь нижней части поршня определялась гидростатическим методом по эталону-копии единицы давления — паскаля. Средняя квадратическая погрешность определения приведенной площади не превышает 0,001 %.

Разность приведенных площадей верхней и нижней частей поршня определена при подаче одного и того же избыточного давления в вакуумную и измерительную камеры. Средняя квадратическая погрешность определения разности площадей не превосходит  $2 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2$ . Разность диаметров верхней и нижней частей поршня не более 0,3 мкм.

Масса грузов определена со средней квадратической погрешностью более  $3 \cdot 10^{-4} \%$ . Отклонение значения массы каждого груза от номинального значения не превышает  $1 \cdot 10^{-3} \%$ .

Порог чувствительности определяли при подаче атмосферного давления в обе камеры манометра путем наложения гирь равновеса на грузоприемную тарелку.

В результате исследований установлено, что порог чувствительности не превышает 1 Па, что соответствует наложению гири массой 0,2 г.

Момент трения шарикоподшипников дисков ведущего и опорного поводков (момент трогания) определяли при помощи миллиграммо-

вых гирь, которые прикрепляли на пластилине к ободу диска в трех различных положениях. Диски выходят из положения равновесия при нагрузке 50 мг на обод, что значительно меньше допустимого порога чувствительности манометра.

Величину зазора между поршнем и нижним цилиндром определяли гидродинамическим способом по скорости опускания поршня. Значение зазора манометров находится в пределах 3—5 мкм.

Сравнение показаний манометра абсолютного давления МАД-3М № 6 с эталонными ртутными барометрами ГГО, включенными параллельно на одно и то же давление, показало, что средняя квадратическая погрешность измерения манометром не превышает 2 Па.

По результатам переоаттестации манометра МАД-3М № 6, выполненной 26 XI 1974 г., установлено, что характеристики МАД-3М № 6 существенно не изменились: приведенная площадь нижней части поршня

$$F_1 = 20,0135 \pm 0,0004 \text{ см}^2,$$

приведенная площадь верхней части поршня

$$F_2 = 20,0152 \pm 0,0004 \text{ см}^2.$$

Масса поршня равна 1,260 кг. Манометр удовлетворяет требованиям, предъявляемым к образцовым средствам измерения давления высшей точности.

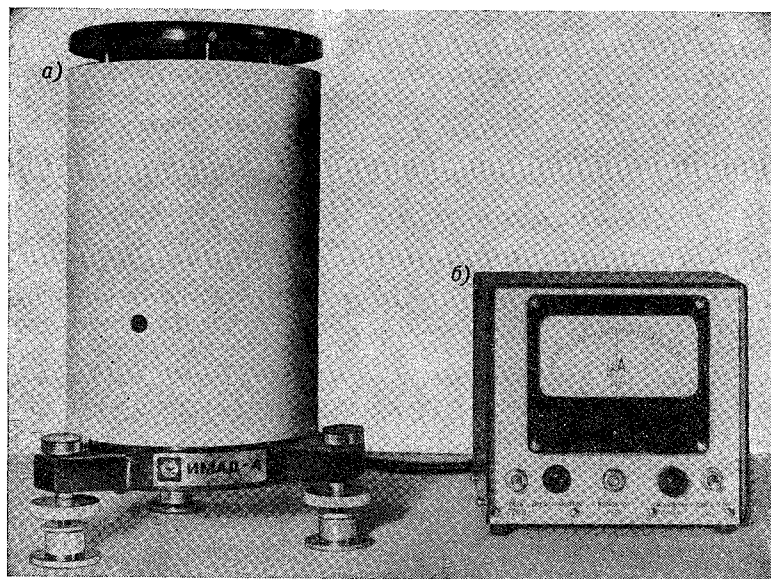


Рис. 1. Общий вид инспекторского манометра абсолютного давления ИМАД-4М (а) и индикатор пульты (б).

Инспекторский грузопоршневой манометр ИМАД-4М (рис. 1) является усовершенствованной модификацией ранее разработанной конструкции этого прибора и предназначенной для использования в Гидрометслужбе СССР [2].

Усовершенствование было выполнено по результатам опытной эксплуатации предыдущей модели и касалось улучшения работы системы отсчета положения равновесия поршня и применения грузов. Принцип же действия модернизированного прибора остался

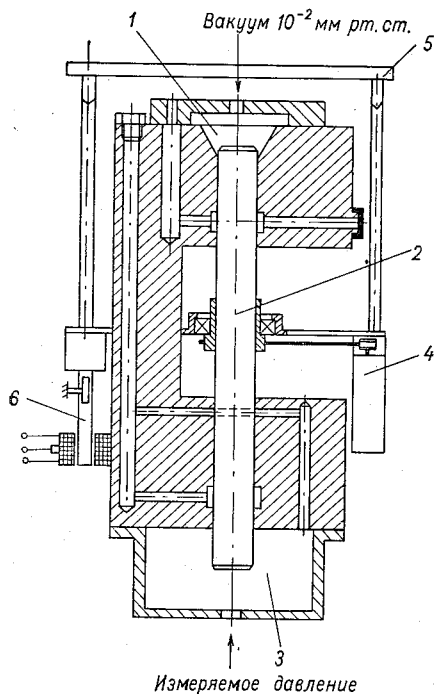


Рис. 2. Вид манометра ИМАД-4М в разрезе.

без изменения. В результате модернизации жидкостный указатель положения равновесия поршня, не обеспечивающий необходимой точности, был заменен нуль-индикатором, состоящим из дифференциального индуктивного преобразователя перемещения и указателя — микроамперметра. Кроме того, специальные грузы, навешиваемые на поршень, были заменены стандартными разновесами. Для удобства в работе и защиты от воздействия внешней среды прибор полностью закрыт, а грузоприемная тарелка установлена над кожухом (рис. 1).

Прибор выполнен портативным. Он снабжен защитным футляром и приспособлен для транспортировки. Масса прибора с футляром не более 10 кг. На месте сличения манометр устанавливают по встроенному в нем уровню на обычном столе и приводят в действие согласно инструкции. С помощью форвакуумного насоса в верхней

камере 1 (рис. 2) над поршнем 2 поддерживают абсолютное давление порядка 1 Па. В нижнюю камеру 3 под поршень подают давление, которое надо измерить.

Усилие, создаваемое измеряемым давлением, уравнивают поршнем с грузоприемным устройством 4 и гирями разновеса, накладываемыми на грузоприемную поверхность 5. Положение равновесия поршня определяют по нуль-индикатору 6.

Вращение поршня, осуществляемое поводковым механизмом, устраняет влияние сухого трения между поршнем и цилиндрами. Грузоприемная тарелка имеет опорный поводок и потому остается неподвижной. Для смазки внутренних поверхностей цилиндров

и поршня имеются специальные каналы, заполняемые рабочей жидкостью.

При эксплуатации манометра ИМАД-4М требуется аппаратура для поддержания давления над поршнем не более 4 Па и получения абсолютных давлений под поршнем от  $0,5 \cdot 10^5$  до  $1,2 \cdot 10^5$  Па. Для этого применяют вакуумный насос типа ВН-461М, вакуумметр ВТ-3 с преобразователем манометрическим ПМТ-2 и компрессор.

Для проверки барометрических приборов по шкале необходима барокамера. В зависимости от зазора между поршнем и цилиндром и температуры окружающего воздуха в качестве рабочей жидкости применяют приборное масло МВП, вакуумное масло ВМ-1 или смесь этих масел.

Исследования ИМАД-4М показали, что указанные изменения конструкции существенно улучшили эксплуатационные характеристики прибора и его обслуживание. При исследованиях ИМАД-4М производилось определение указанных выше параметров, а также сличение его со вторичным эталоном абсолютного давления. Приведенная площадь нижней части поршня была определена по вторичному эталону абсолютного давления двумя методами. Первый метод заключается в определении приведенной площади поршня при абсолютном давлении  $1 \cdot 10^5$  Па по формуле

$$F_2 = F_9 \frac{(m_0 + m) \left[ 1 + 2\alpha(t_9 - t) + \frac{F_{2н}}{g \left( 1 - \frac{\rho_B}{\rho} \right)} (\Delta - \Delta_9 + p_0 - p_{09} - \rho_B gh) \right]}{m_9}, \quad (3)$$

где  $m_0$  и  $m$  — масса подвижной части и грузов ИМАД-4М,  $F_9$  — приведенная площадь нижней части поршня вторичного эталона абсолютного давления,  $t_9$  — температура вторичного эталона при измерении,  $F_{2н}$  — номинальное значение приведенной площади поршня ИМАД-4М,  $\Delta$  и  $\Delta_9$  — поправки на разность площадей верхней и нижней частей поршня соответственно манометров ИМАД-4М и вторичного эталона,  $p_{09}$  — остаточное давление под поршнем вторичного эталона,  $h$  — разность высот нижних торцов поршней вторичного эталона и ИМАД-4М,  $m_9$  — масса грузов, наложенных на поршень вторичного эталона.

Отличие второго метода состоит в проведении предварительного уравнивания поршней обоих приборов. Преимуществом второго метода является исключение систематической погрешности манометра, связанной с налипанием на поршень масла и погрешностью определения остаточного давления над поршнем. Разность значений приведенной площади нижней части поршня, полученных по двум методам, не превышает  $1,5 \cdot 10^{-3}\%$ .

Разность приведенных площадей верхней и нижней частей поршня была определена по двум весам ВЛКТ—500 г, соединенных рычагом при подаче избыточного давления  $0,5 \text{ кгс/см}^2$  в обе камеры манометра. Погрешность определения разности площадей не превышает

$3 \cdot 10^{-3}\%$ . Масса поршня с присоединенными к нему деталями была определена на образцовых весах 1-го разряда с погрешностью не более  $5 \cdot 10^{-4}\%$ . Порог чувствительности манометра определяли по изменению показаний нуль-индикатора при наложении на грузоприемную тарелку ИМАД-4М гирь разновеса массой 50 мг, что соответствует 2,5 Па в единице давления.

Определение втягивающего усилия преобразователя перемещения производили по весам ВЛКТ-500 г при перемещении сердечника преобразователя. В результате исследования определены допустимые границы перемещения сердечника, в пределах которых можно пренебрегать втягивающим усилием преобразователя.

Результаты сличений ИМАД-4М с вторичным эталоном показали, что средняя квадратическая погрешность измерения прибором не превышает 4 Па. В результате выполненной работы создан прибор, который аттестован в качестве инспекторского манометра абсолютного давления с пределами измерений  $(0,53 \div 1,1) \cdot 10^5$  Па с погрешностью не более 13 Па.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полухин Г. И. и др. Вторичный эталон абсолютного давления.— «Измерительная техника», 1973, № 9, с. 4—5.
2. Фатеев Н. П. Аппаратура для поверки метеорологических приборов.— «Тр. ГГО», 1969, вып. 240, с. 104—123.

*Н. П. Фатеев, Л. И. Леонова, М. А. Андреев*

## **МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБРАЗЦОВЫХ РТУТНЫХ МАНОМЕТРОВ И БАРОМЕТРОВ**

В 1974—1975 гг. в ГГО были проведены метрологические исследования партий ртутных манометров МБП, контрольных барометров КР и инспекторских барометров ИР, выпускаемых Клинским термометровым заводом. Исследования были поставлены с целью определения и уточнения основных метрологических характеристик приборов в связи с пересмотром ГОСТов на них и необходимостью повышения качества выпускаемой заводом продукции, а также с целью уточнения методики поверки, нормирования пределов допускаемых погрешностей. Исследования необходимы были также для обоснования применения манометров МБП, барометров КР и ИР в качестве образцовых средств измерения II и III разрядов и обеспечения внедрения поверочной схемы для средств измерения атмосферного давления в Гидрометслужбе [1].

Из-за отсутствия образцовых средств измерения абсолютного давления необходимой точности экспериментальные исследования точности приборов МБП, КР и ИР во всем диапазоне измерений до сих пор не проводились. Поэтому в нормативной технической документации характеристики точности у манометра МБП отсутствовали, а для барометров КР и ИР были установлены допустимые значения погрешности на основании сличений с эталонными ртутными барометрами только при атмосферном давлении [2].

В настоящей статье приводится методика исследования и представлены результаты экспериментального определения пределов допускаемой погрешности приборов во всем диапазоне измерений.

Определение погрешности измерения давления производилось методом непосредственного сличения манометров и барометров с показаниями образцового грузопоршневого манометра МАД-3М № 6 при атмосферном давлении и во всем диапазоне измерений. Манометр МАД-3М имеет диапазон измерений 2,7—1100 мбар, погрешность 0,05 мбар.

При сличениях манометр МБП подсоединялся к образцовому манометру МАД-3М при помощи вакуумных шлангов через запас-

ной объем. Изменение давления осуществлялось с помощью форвакуумного насоса. С целью уменьшения влияния «течи» в системе сличение показаний проводилось для каждого манометра отдельно. Изменение давления за время сличений на каждой из поверяемых отметок шкалы не превышало 0,5 мбар.

При сличениях барометров использовалась бароколонка, снабженная устройствами для перемещения муфты с нониусом и подводки ртути к нулевому индексу барометра. Ручки управления этих устройств были выведены наружу через сальниковые уплотнения в бароколонке. Отсчеты показаний барометров производились через окно бароколонки с применением подставки шкал. С помощью специальных штучеров и резиновых шлангов бароколонка подключалась к форвакуумному нососу и образцовому манометру.

Особое внимание при исследовании барометров обращалось на герметичность системы. Изменение давления при снятии серии отсчетов составляло в среднем 0,05—0,06 мбар. Температура барометров за время исследований изменялась в пределах от +17,8 до +21,1°C, что учитывалось температурной поправкой.

Необходимо отметить, что условия наводки нониусов и отсчета показаний барометров в бароколонке не позволяли производить отсчеты с предельной точностью. Наводка нониусов и отсчеты производились невооруженным глазом через стекло дверцы бароколонки толщиной 20 мм и расстоянии от стекла до барометра около 25 см при наружной подсветке.

Для инспекторских барометров ИР, аналогичных барометрам КР по принципу действия и конструкции, в бароколонке были определены только пределы измерения давления. Положение ртути в длинном колене барометра ИР определялось визуально с погрешностью до 2—3 мбар.

По результатам сличений определялись инструментальные поправки манометров и барометров при атмосферном давлении, погрешности при атмосферном давлении и погрешности по диапазону. Сличения показаний манометров МБП с показаниями образцового манометра МАД-ЗМ проводились на отметках шкалы: 50, 250, 450, 650, 850, «атмосфера» и 1050 мбар. На каждой отметке шкалы производилось одновременно пять отсчетов по образцовому и поверяемому манометрам с интервалом между отсчетами 1 мин. Затем переходили на следующую отметку шкалы и после выдержки 10 мин проводилась новая серия из пяти сравнительных отсчетов.

Сличение барометров КР проводилось при шести значениях давления, начиная с нижнего предела шкалы: 880, 930, 980, «атмосфера», 1030 и 1090 мбар. После достижения заданного давления и пятиминутной выдержки производились пять одновременных отсчетов по барометру КР и образцовому манометру МАД-ЗМ двумя поверителями с минутными интервалами между отсчетами.

Обработка результатов сличения барометров и манометров и вычисление погрешностей производились следующим образом [3].

В показания манометров МБП и барометров КР и ИР вводились поправки:

- инструментальная, определенная при атмосферном давлении;
- на приведение показаний к нормальному ускорению свободного падения тел;
- на приведение плотности ртути к температуре 0°C, а длины шкалы к 20°C.

Погрешность одного отсчета по манометру во всем диапазоне определялась по формуле

$$\Delta = 3 \sqrt{S_1^2 + \omega^2}, \quad (1)$$

где  $S_1^2$  — внутрисерийная дисперсия разности показаний манометров МБП и МАД-ЗМ;  $\omega^2$  — составляющая дисперсии, обусловленная условиями измерений;

$$S_1^2 = \frac{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_i)^2}{k(n-1)},$$

$$\omega^2 = \frac{S_2^2 - S_1^2}{n},$$

$$S_2^2 = \frac{n \sum_{j=1}^k (x_{ij} - \bar{x}_i)^2}{k-1},$$

где  $S_2^2$  — межсерийная дисперсия разности показаний манометра МБП и МАД-ЗМ,  $k$  — число серий сличений,  $n$  — число отсчетов в серии.

Погрешность типа прибора определялась по формуле

$$\Delta_{\text{тип}} = 3 \sqrt{S_{1\text{макс}}^2 + \omega_{\text{макс}}^2}, \quad (2)$$

где  $S_{1\text{макс}}^2$  и  $\omega_{\text{макс}}^2$  — максимальные полученные значения дисперсий.

Барометры типа КР и ИР и манометры МБП имели значительные отклонения от требований ГОСТа [4] и ТУ [5]: тугое перемещение подвижной муфты с нониусами, плохое крепление стеклянной трубки короткого колена, различная ширина штрихов нониуса и шкалы (20 делений нониуса длиннее 41 деления шкалы) и др. Первая партия манометров, представленных на исследование, из-за подобного рода дефектов, влияющих на точность измерений, была забракована.

Инструментальные поправки для барометров КР, ИР и манометров МБП, полученные при атмосферном давлении, представлены в табл. 1.

Как видно из этой таблицы, абсолютная величина инструментальных поправок исследуемых манометров МБП, барометров КР

и ИР соответствует ГОСТу 4863-55 на барометры и ТУ 25-11-783—72 на манометр.

Для определения предела допускаемой погрешности были вычислены отклонения разностей между показаниями исследуемых манометров и барометров и образцовым манометром МАД-ЗМ и средней разностью в серии ( $x_{ij} - x_i$ ) по всем сериям.

Т а б л и ц а 1

Иструментальные поправки для исследуемых барометров  
и манометров при атмосферном давлении

| № прибора    | Поправка | № прибора   | Поправка | № прибора   | Поправка |
|--------------|----------|-------------|----------|-------------|----------|
| Манометр МБП |          | Барометр КР |          | Барометр ИР |          |
| 5065         | —0,22    | 91          | —0,38    | 60          | —0,03    |
| 5067         | +0,59    | 59          | —0,33    | 85          | —0,04    |
| 5220         | +0,12    | 82          | —0,22    | 100         | —0,17    |
| 5223         | —0,46    | 86          | —0,06    | 105         | —0,07    |

По полученным отклонениям по всем сериям и всем приборам для каждого типа приборов определялась функция распределения случайной составляющей погрешности, которая оказалась близкой к нормальной. После этого по формуле (1) вычислялась погрешность измерений каждого прибора  $\Delta$ .

Примечание. Так как поправки исследуемых приборов для всех серий измерений при одинаковых значениях давления одни и те же, то для упрощения вычислений при определении случайной погрешности в разности показаний исследуемых приборов поправки не вводились.

В табл. 2 и 3 представлены погрешности измерения давления и поправки для всех исследуемых отметок соответственно для манометров МБП и барометров КР.

Как видно из таблиц, максимальное значение погрешности для манометров не превышает 0,3 мбар, для барометров — 0,2 мбар.

Погрешности измерения давления по диапазону имеет такой же порядок, что и при атмосферном давлении.

Для выявления систематической погрешности манометров во всем диапазоне измерений были рассчитаны поправки на всех исследуемых отметках шкалы после введения поправок, определенных при атмосферном давлении.

Как видно из табл. 2, максимальное изменение поправок по всему диапазону для МБП составляет 0,31 мбар, что согласуется с погрешностью измерения давления во всем диапазоне измерений. При исследовании барометров КР выяснилось, что нижний предел измерения, установленный требованиями ГОСТ 4863-55 и равный

Таблица 2

Погрешности  $\Delta$  измерения давления и инструментальные поправки  
на всех исследуемых отметках для манометров МБП

| № прибора | Исследуемые отметки, мбар |     |     |     |     |                      |      |
|-----------|---------------------------|-----|-----|-----|-----|----------------------|------|
|           | 50                        | 250 | 450 | 650 | 850 | Атмосферное давление | 1050 |

Погрешность  $\Delta$ 

|      |      |      |      |      |      |      |      |
|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 5065 | 0,15 | 0,12 | 0,15 | 0,15 | 0,12 | 0,21 | 0,09 |
| 5067 | 0,18 | 0,15 | 0,15 | 0,12 | 0,20 | 0,24 | 0,18 |
| 5223 | 0,12 | 0,18 | 0,15 | 0,15 | 0,12 | 0,27 | 0,09 |
| 5220 | 0,18 | 0,21 | 0,24 | 0,30 | 0,18 | 0,24 | 0,12 |

## Инструментальная поправка

|      |       |       |       |       |       |      |       |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|
| 5065 | +0,22 | +0,20 | +0,14 | +0,19 | +0,10 | 0,00 | +0,02 |
| 5067 | +0,11 | +0,15 | +0,08 | -0,02 | -0,04 | 0,00 | +0,04 |
| 5220 | +0,30 | +0,31 | +0,16 | +0,13 | +0,06 | 0,00 | +0,05 |
| 5223 | +0,12 | +0,12 | +0,06 | 0,00  | -0,05 | 0,00 | 0,00  |

Таблица 3

Погрешности  $\Delta$  измерения давления и инструментальные поправки  
на всех исследуемых отметках для барометров КР

| № прибора | Исследуемые отметки, мбар |     |     |                      |      |      |
|-----------|---------------------------|-----|-----|----------------------|------|------|
|           | 880                       | 930 | 980 | Атмосферное давление | 1030 | 1090 |

Погрешность  $\Delta$ 

|    |      |      |      |      |      |      |
|----|------|------|------|------|------|------|
| 91 | 0,15 | 0,13 | 0,25 | 0,22 | 0,09 | 0,18 |
| 82 | 0,18 | 0,22 | 0,24 | 0,20 | 0,04 | 0,00 |
| 86 | —    | 0,18 | 0,18 | 0,22 | 0,24 | 0,17 |
| 59 | —    | 0,24 | 0,18 | 0,20 | 0,03 | 0,20 |

## Инструментальная поправка

|    |       |       |       |      |       |       |
|----|-------|-------|-------|------|-------|-------|
| 86 | —     | +0,04 | +0,03 | 0,00 | +0,01 | +0,06 |
| 82 | +0,02 | 0,00  | -0,01 | 0,00 | +0,01 | +0,06 |
| 59 | —     | -0,10 | -0,03 | 0,00 | +0,03 | -0,03 |
| 91 | —     | +0,02 | -0,04 | 0,00 | -0,01 | -0,02 |

880 мбар, не выдерживается. У барометра № 86 он равен 902 мбар, у барометра № 59—913 мбар, у барометра № 91—885 мбар.

Отсюда следует, что при выпуске на производстве у барометров КР необходимо проверять и диапазон измерений.

Несоответствие нижнего предела измерения требованиям ТУ может быть вызвано уменьшением размеров мешка, служащего для подъема и опускания ртути.

Анализ изменения исправленных инструментальных поправок по всему диапазону измерений у барометров КР (табл. 3) показывает, что систематического изменения поправок в зависимости от величины давления не наблюдается.

Таблица 4

**Нижний предел измерения давления барометрами ИР (мбар)  
по двум нулевым индексам**

| № барометра | Нулевой индекс |         |
|-------------|----------------|---------|
|             | нижний         | верхний |
| 3130/60     | 830            | 745     |
| 3140/35     | 925            | 785     |
| 3143/100    | 725            | 685     |
| 3137/05     | 925            | 785     |

Таким образом, отпадает необходимость у барометров КР определять поправки по диапазону.

Результаты определения нижнего предела измерения давления барометрами типа ИР представлены в табл. 4. Нижний предел измерения давления определяется при подведении ртути в коротком колене барометра как к нижнему нулевому индексу, так и к верхнему. Как видно из таблицы, нижний предел измерения давления у всех испытываемых барометров не удовлетворяет требованиям ГОСТ 4863-55, что вызвано малыми размерами мешка.

В заключение можно сделать следующие выводы.

1. В результате проведенной работы определены погрешности манометров МБП и барометров КР по всему диапазону измерений давления и для барометров ИР определены погрешности измерения атмосферного давления.

Погрешности измерения давления по всему диапазону после введения поправок, определенных при атмосферном давлении, не превышают следующих предельных значений:  $\pm 0,3$  мбар для манометра МБП,  $\pm 0,2$  мбар для барометра КР,  $\pm 0,2$  мбар для барометра ИР при атмосферном давлении.

2. Поправки по диапазону у манометра МБП изменяются в пределах 0,1—0,3 мбар и не превышают основную погрешность измерения давления во всем диапазоне измерений.

У барометров КР систематического изменения поправки в зависимости от величины давления не наблюдается.

3. У барометров КР и ИР при выпуске из производства не обеспечивается весь диапазон измерения давления.

4. Из полученных результатов следует, что необходимо пересмотреть методы поверки манометров и барометров.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фатеев Н. П. Поверочные схемы для метеорологических измерений. — «Тр. ГГО», 1973, вып. 313, с. 145—155.
2. Клестова М. М. Погрешности поверки ртутных барометров. — «Тр. ГГО», 1949, вып. 21/83, с. 99—105.
3. Методы обработки результатов наблюдений при измерениях. — «Труды метеорологических институтов СССР», 1972, вып. 134/194, с. 8—51.
4. Барометры ртутные метеорологические. ГОСТ 4863—55.
5. Руководство по поверке метеорологических приборов. Л., Гидрометеиздат, 1967, с. 80—113.

*Г. П. Резников, Н. Д. Колышев,  
Л. Д. Качкашвили, Б. В. Куров*

## **МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ СРАВНЕНИЙ ГИГРОМЕТРА ТОЧКИ РОСЫ И ГЕНЕРАТОРА ПАРОВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ («СТЕНДА ВЫМОРАЖИВАНИЯ»)**

Исследования в области методов точного воспроизведения или измерения значений параметров влажного газа, в частности воспроизведения размера единицы влажности воздуха, расширились и пополнились за последние годы.

Ведущей тенденцией здесь оказывается применение методов и средств, основанных на термодинамическом принципе равновесия конденсированной и неконденсированной фаз воды, чему присвоен специальный термин «влажсостояние» (в отличие от термина «влажсодержание») [1]. При этом величиной, характеризующей это состояние, а следовательно, и мерой влажности газа является температура границы раздела фаз — температура точки росы (или льда, в зависимости от агрегатного состояния конденсированной фазы воды).

Значимость фазовых переходов для протекания атмосферных процессов, с одной стороны, и метрологические основания [2], с другой, привели к выводу о целесообразности использования термодинамического принципа при воспроизведении и передаче размера единицы влажности воздуха в метеорологии [3, 4].

В ГГО разработана и исследована аппаратура, реализующая указанный принцип: гигрометр точки росы (ГТР), которому в дальнейшем присвоен индекс М116, и термогигростат (ТГС), краткая характеристика и внешний вид которых приведены в [4].

Одновременно (параллельно и независимо) проводились исследования и разработка «генератора» парогазовых смесей (именуемого в дальнейшем «стенд вымораживания») в Куйбышевском авиационном институте им. С. П. Королева (КуАИ) совместно с Всесоюзным

научно-исследовательским институтом им. Д. И. Менделеева (ВНИИМ) [5].

Не останавливаясь на сопоставлениях характеристик стенда и ТГС, а также на возможных областях их применения, следует лишь отметить, что получение парогазовой смеси с заданным значением температуры точки росы в стенде осуществляется однократным пропусканием воздуха (в общем случае, газа) через активную зону фазового перехода или равновесия, тогда как в ТГС происходит непрерывная циркуляция воздуха из сатуратора в рабочую камеру и обратно, поскольку ТГС построен по схеме замкнутого цикла насыщения. Ввиду того, что в стенде процесс вымораживания влаги из газа, находящегося в контакте с охлажденной поверхностью, осложняется возможностью образования тумана, в [6] проведен анализ условий предотвращения этого явления.

Наряду с теоретическими расчетами погрешностей задания значений параметра влажности в ТГС и измерения их гигрометром точки росы [3], по материалам многолетних наблюдений сделаны статистические оценки их погрешностей [7], а также сходимости и воспроизводимости результатов измерений.

Принимая во внимание, что стенд, ТГС и гигрометр ГТР основаны на одном физическом принципе, но представляют собой аппаратуру разных типоразмеров, и исходя из принципов метрологии по оценке систематических погрешностей (см. например, [8]), можно получить ценные сведения о метрологических свойствах аппаратуры и методов, произведя их метрологические сравнения.

Такие сравнения стенда и ГТР были проведены в 1974 г. Основу методики сравнений составляли прямые измерения образцовым измерительным прибором, за который условно (а также ввиду того, что его метрологические характеристики, как выше указано, были оценены экспериментально ранее) принимался ГТР. Измеряемой величиной является температура точки росы (льда), воспроизводимая подвергаемой проверке (условно) многозначной мерой, какой является стенд. Очевидно, что результаты сравнений не изменятся, если их рассматривать как прямые измерения поверяемым измерительным прибором (ГТР) температуры точки росы, воспроизводимой образцовой мерой (стендом). Остальные детали методики, тесно взаимосвязанные с вспомогательным оборудованием и измерительной аппаратурой, определились характеристиками и конструктивными особенностями стенда и ГТР.

Первая особенность ГТР состоит в том, что он в основном предназначен для работы в условиях не меняющихся во времени значений температуры и точки росы паровоздушной смеси. Поэтому установление и контроль фазового равновесия осуществляется наблюдателем, который регулировкой тока через полупроводниковый холодильник достигает неизменности фотосигнала (тока через микроамперметр в цепи фотоэлектрической схемы слежения), зависящего от параметров и динамики конденсата. Изменение сигнала свидетельствует о нарушении термодинамического равновесия между конденсатом и паром.

Другая особенность заключается в том, что ГТР без специальных средств позволяет судить о фазе конденсата при отрицательных значениях температуры конденсата. Для этого некоторое время после установления равновесия производится контроль фотосигнала. В случае если он внезапно начинает увеличиваться, это означает, что конденсат из жидкого состояния (неустойчивого при отрицательных значениях температуры) перешел в твердое. А поскольку температура конденсационного зеркальца, оставшаяся неизменной (если не учитывать выделившуюся скрытую теплоту перехода воды в лед) и соответствующая равновесию над водой, после перехода конденсата в твердое состояние оказывается более низкой по отношению

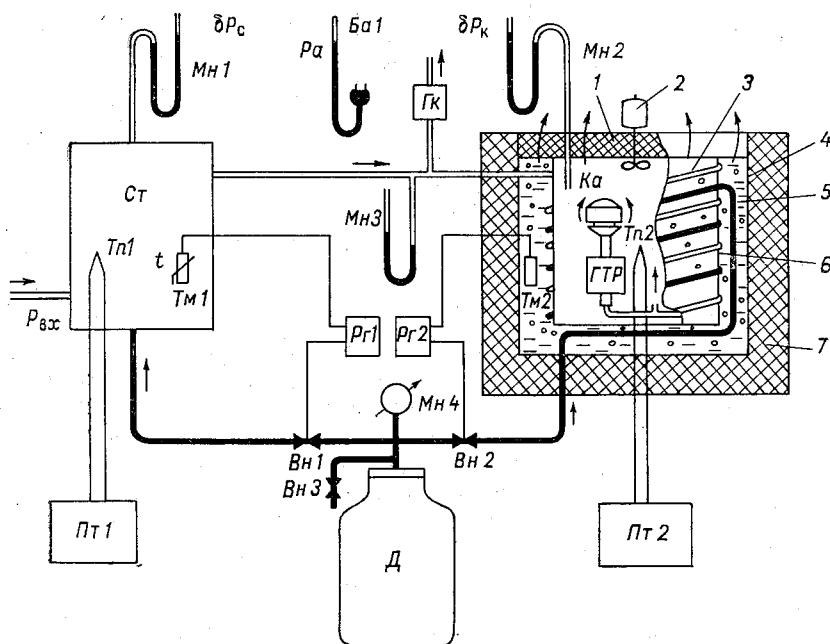


Рис. 1. Функционально-конструктивная схема установки для метрологических сравнений ГТР и стандарта.

к температуре, соответствующей равновесию над льдом, то и происходит конденсация, следствием чего является увеличение фотосигнала. Неизменность соответствующего равновесию фотосигнала в течение длительного времени свидетельствует о твердой фазе, образовавшейся уже при формировании конденсата.

Третья особенность ГТР — измерение температуры зеркальца осуществляется схемой, состоящей из микротермистора, преобразующего температуру зеркальца в сопротивление, и равновесного моста.

Стенд непосредственно может быть использован лишь для проверки гигрометров проточного типа, а ГТР предназначен для работы в качестве прибора погружного типа. Хотя в конструкции ГТР и предусмотрена возможность применения его как проточного, но ввиду негерметичности его измерительной камеры для уменьшения погрешностей, способных возникать вследствие диффузии за счет разности концентраций водяного пара в исследуемой смеси и в окружающем измерительный преобразователь гигрометра воздуха, появляется необходимость в создании определенных окружающих условий. Эти условия должны быть такими, чтобы значения температуры точки росы смеси и воздуха, окружающего измерительный преобразователь, были близкими, а разность значений температуры воздуха и точки росы смеси не превосходила максимального перепада температуры, обеспечиваемого холодильным модулем гигрометра. Обеспечение таких условий может быть достигнуто размещением измерительного преобразователя гигрометра, соединенного с выходом стенда, в камере, в которой могут устанавливаться необходимые значения температуры точки росы и температуры воздуха. Вначале для этой цели использовалась камера «Фейтрон 3001». Но поскольку наименьшая температура, достигаемая в ней, составила  $-15^{\circ}\text{C}$ , то была изготовлена специальная камера, обеспечившая задание любых отрицательных значений температуры.

На рис. 1 представлена функционально-конструктивная схема установки для метрологических сравнений стенда и ГТР, в состав которой вошла эта камера. Установка состоит из стенда *Ст*, камеры *Ка* и термоса *Д* (сосуда Дьюара) с жидким азотом.

Камера *Ка*, аналогичная по конструкции камере ТГС [4], состоит из цилиндра 3, выполненного из листовой латуни и сверху закрываемого теплоизолирующей крышкой 1. На наружной поверхности цилиндра навиты два змеевика 5 и 6. Змеевик 6 входит одним концом внутрь цилиндра возле его днища и заканчивается патрубком для соединения с входным патрубком ГТР с помощью соединительной муфты из вакуумной резины, другой (верхний) конец змеевика 6 соединяется с выходом стенда. Змеевик 5, имеющий ряд отверстий по всей его длине, соединяется с термосом *Д*. Описанная конструкция помещена в жидкостной термостат, состоящий из корпуса 4 с термоизолирующими стенками 7. Уменьшению температурных градиентов способствует барботирование жидкости (в качестве последней используется спирт) пузырьками испаряющегося жидкого азота и выходящих через указанные выше отверстия в змеевике 5, а также вентилятор 2, установленный на крышке 1.

Задание и поддержание необходимой температуры в камере осуществляется автоматическим регулятором *Рг2*, вход которого соединен с датчиком температуры *Тм2*, а выход — с вентилем *Вн2*, управляющим подачей азота в змеевик 5. Температура в зоне вымораживания регулируется системой, входящей в его состав и содержащей регулятор *Рг1*, датчик температуры *Тм1* и вентиль *Вн1*. На термос установлены предохранительный клапан *Вн3* и контрольный манометр *Мн4*.

Измерение температуры в зоне фазового равновесия в стенде производилось с помощью термопары  $Tn1$  и потенциометра  $Pт1$ , а температуры в камере — термопарой  $Tn2$  и потенциометром  $Pт2$ , при этом холодные спаи помещались в тающий лед. Поскольку температура точки росы какого-либо элементарного объема паровоздушной смеси зависит от давления, а оно не остается постоянным вследствие газодинамического сопротивления элементов паровоздушного тракта от стенда к камере, то для измерения перепада давления в стенде  $\delta P_c$  и камере  $\delta P_k$  относительно атмосферного устанавливались манометры  $Mn1$  и  $Mn2$ , а для измерения атмосферного давления — барометр  $Ба$ . Помимо указанной аппаратуры для дополнительного контроля влажности паровоздушной смеси применялся кулонометрический гигрометр  $Gk$ , на входе которого измерялся перепад давления относительно атмосферного манометром  $Mn3$ . Для выявления зависимости результатов эксперимента от значений расхода (объемной скорости) паровоздушной смеси в одних случаях осуществлялось его прямое измерение ротаметром, в других — производился расчет на основании измеренных перепадов давлений.

Избыточное (относительно атмосферного) давление на входе стенда создавалось либо компрессором, либо от сети сжатого воздуха. Регулирование давления и, следовательно, расхода производилось редуктором (на рисунке не показано).

На рисунке также не показано размещение или подключение гигрометров, основанных на иных физических и конструктивных принципах: сорбционные гигрометры АФИ (г. Ленинград) и гигрометры с влагочувствительным элементом на основе окиси алюминия (фирмы «Ramometrics», США), а также гигрометры точки росы «Иней» (г. Волгоград) с полупроводниковым охлаждением и «Вихрь» (КуАИ) с вихревым охлаждением. Побочной программой эксперимента предусматривалось их исследование, особенно в области отрицательных значений температуры смеси и точки росы, однако изложение результатов этих исследований выходит за рамки настоящей статьи.

При проведении эксперимента с помощью регулятора  $Pg1$  устанавливается и поддерживается желаемое значение температуры в стенде, а с помощью регулятора  $Pg2$  — несколько более высокое значение температуры в камере. Воздух, проходя через активную зону стенда, отдает избыток влаги, т. е. последняя «вымораживается», и в соответствии с теорией парциальное давление водяного пара паровоздушной смеси равно давлению насыщения при температуре и давлении в зоне «вымораживания». Дальнейшими экспериментами также доказано, что входящий воздух способен насыщаться водяным паром при температуре активной зоны. Проходя далее по коммуникации, паровоздушная смесь входит в змеевик 6, приобретает температуру жидкости, входит в рабочую камеру гигрометра, попадает из нее в камеру 3 термостата и выходит через неплотности между камерой и крышкой 1 в атмосферу (показано стрелками). Таким образом, общее давление и парциальное давление водяного пара в камере 3 с высокой степенью приближения равны общему

давлению и парциальному давлению водяного пара в зоне измерения гигрометра.

Выше указывалось, что при сравнениях необходимо учитывать давление в активной зоне сенда и давление в зоне измерения гигрометром, поскольку парциальное давление водяного пара в них находятся в очевидном соотношении

$$e_k = e_c \frac{p_k}{p_c}, \quad (1)$$

где  $e_c$  и  $e_k$  — парциальные давления водяного пара соответственно в сенде и в зоне измерения гигрометром,  $p_c$  и  $p_k$  — суммарные давления, соответственно в сенде и в зоне измерения гигрометром.

На инструментальную погрешность задания парциального давления пара в сенде, определяемую погрешностью измерения температуры в активной зоне, при поступлении смеси в измерительную зону гигрометра накладывается, таким образом, погрешность, вызванная неточностью измерения давления  $p_c$  и  $p_k$ , которая вносит основной вклад в погрешность, обусловленную неидеальностью условий сравнения. Для оценки относительной погрешности определения можно воспользоваться формулой

$$\frac{\Delta e_k}{e_k} = \frac{\Delta e_c}{e_c} + \frac{\Delta p_k}{p_k} + \frac{\Delta p_c}{p_c}. \quad (2)$$

Для того чтобы свести к минимуму искажающее влияние погрешности из-за условий сравнения на конечный результат, нужно потребовать, чтобы сумма второго и третьего слагаемых в формуле (2) составляла незначительную часть от  $\frac{\Delta e_c}{e_c}$  (например, 1/5). Погрешность измерения температуры в активной зоне сенда с помощью хромель-копелевой проволоочной термопары и потенциометра типа ПП-63 составляет 0,05°C. Воспользовавшись формулой Клаузиуса—Клапейрона, можно определить значение  $\frac{\Delta e_c}{e_c}$ , отвечающее этой погрешности для разных значений точки росы [3], которое в худшем случае при точке росы —40°C равно  $5 \cdot 10^{-3}$ .

Принимая  $\frac{\Delta p_k}{p_k} = \frac{\Delta p_c}{p_c} = \frac{\Delta p}{p}$ , получим, что  $2 \frac{\Delta p}{p} \leq 10^{-3}$ , т. е.  $\frac{\Delta p}{p} \leq 5 \cdot 10^{-4}$ . Если  $P_a$  измеряется ртутным барометром с погрешностью 0,4 мбар, а  $\delta P_k$  и  $\delta P_c$  — жидкостным манометром с применением масла или спирта, плотность которых хорошо определена, и погрешность измерения уровня не превышает 2 мм (что соответствует погрешности 0,1 мбар), то указанное соотношение выполняется.

Как уже отмечалось, особенностью гигрометра точки росы является использование в нем микротермистора МТ-54 (изготовитель АФИ) для измерения температуры зеркальца. Конкретный микротермистор № 701803 имеет сопротивление при 0°C  $R_0 = 2434$  Ом и значение параметра  $B = 3069$  К. Нестабильность градуировочной ха-

характеристики снижалась специальным режимом искусственного старения; погрешность от подогрева измерительным током сводилась к минимуму ограничением его значений, при которых падение напряжения на термисторе не превышает 0,2В, а нелинейность характеристики не причиняла неудобств, поскольку по экспериментально полученным точкам были рассчитаны на ЭВМ таблицы для диапазона от  $-40$  до  $+40^{\circ}\text{C}$  с шагом  $0,01^{\circ}\text{C}$ . Такой шаг характеризует не только чувствительность гигрометра, но и инструментальную погрешность измерения температуры зеркала гигрометра. Действительно, исходя из зависимости

$$R = A \exp \left( \frac{B}{T} \right), \quad (3)$$

где  $R$  — сопротивление термистора,  $T = t^{\circ}\text{C} + 273,15^{\circ}\text{C}$  — температура в шкале Кельвина,  $A$  и  $B$  — параметры термистора, можно получить

$$\Delta T = - \frac{T^2}{B} \frac{\Delta R}{R}, \quad (4)$$

где  $\Delta T$  — абсолютная погрешность измерения температуры термистором, зависящая от относительной погрешности определения его сопротивления при этой температуре. С другой стороны, при измерении сопротивления термистора мостовой равновесной схемой  $\frac{\Delta R}{R}$  определяется классом моста. Нетрудно убедиться, что например, при  $T = 300 \text{ K}$ ,  $B = 5000 \text{ K}$  и использовании моста типа Р-329 (класс 0,05),  $\Delta T = 0,01^{\circ}\text{C}$ . Можно также проверить, пользуясь формулой

$$R = R_0(1 + \alpha t), \quad (5)$$

что применение такой же измерительной схемы для металлических термометров, например, платиновых с температурным коэффициентом сопротивления  $\alpha = 3,92 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$  приводит к погрешности  $\Delta T = 0,14^{\circ}\text{C}$ .

В эксперименте сопротивление термистора измерялось мостом постоянного тока типа МО-62 (класс 0,1) и, следовательно, составляющая погрешности за счет погрешности измерительной схемы не превышает  $0,02^{\circ}\text{C}$ .

В этом исследовании основной задачей является определение и анализ поведения разностей между приведенными к атмосферному давлению значениями температуры точки росы паровоздушной смеси, задаваемой стендом, и температуры точки росы, измеряемой гигрометром. Среднее значение этой разности и оценки среднего квадратического отклонения от него являются не только функцией погрешностей измерительной аппаратуры, но и ряда других факторов, таких, как конкретное значение температуры смеси; разность между значениями температуры смеси и температуры точки росы, зависящая от относительной влажности, конкретного наблюдателя-оператора, расхода воздуха, режима приготовления паровоздушной смеси в стенде (вымораживание или насыщение), временной неста-

бильности элементов аппаратуры, условий подачи смеси к гигрометру, в частности влияние сорбционных процессов. Влияние последних в значительной степени устраняется, если сравнения проводить не ранее, чем установится адсорбционное равновесие в коммуникациях и на поверхностях гигрометра (т. е. через 30—40 мин. при отрицательной температуре после момента выхода стенда на новый режим). Экспериментально можно было бы установить вклад в искомые характеристики каждого из остальных факторов. Однако из практических соображений для оценок в первом приближении целесообразнее считать совокупное воздействие всех факторов случайным.

Приведение к атмосферному давлению значений температуры точки росы, заданных стендом и измеренных гигрометром, производилось следующим образом. Предварительно обозначим через  $p_c$ ,  $p_r$  и  $p_a$  — давление в миллибарах соответственно в активной зоне стенда, в зоне измерения гигрометром ( $p_r = p_K$ ) и атмосферное давление;  $t_c$  и  $t_r$  — соответственно температура в °C в активной зоне стенда и температура фазового равновесия по гигрометру;  $T_c$  и  $T_r$  — приведенные к атмосферному давлению значения температуры точки росы в °C соответственно паровоздушной смеси, заданной стендом и измеренной гигрометром;  $e_c$ ,  $e_r$  — парциальные давления водяного пара в миллибарах, соответствующие значениям температуры  $t_c$  и  $t_r$ ;  $E_c$  и  $E_r$  — парциальные давления водяного пара той же паровоздушной смеси в миллибарах, соответствующие давлению  $p_a$ . Аналогично соотношению (1) запишем

$$E_c = e_c \frac{p_a}{p_c} \quad (6)$$

и

$$E_r = e_r \frac{p_a}{p_r}. \quad (7)$$

Значения  $p_c$ ,  $p_r = p_K$ ,  $p_a$ ,  $t_c$  и  $t_r$  измеряются с помощью вышеуказанной аппаратуры;  $e_c$  и  $e_r$  отыскиваются в таблицах давлений насыщающих паров воды соответственно по  $t_c$  и  $t_r$ . Из этих же таблиц по рассчитанным с использованием формул (6) и (7) значениям  $E_c$  и  $E_r$  отыскиваются соответственно значения  $T_c$  и  $T_r$ , которые и сравниваются между собой, в результате чего получаются разности  $\Delta t = T_{ic} - T_{ir}$ .

При сличениях с кулонометрическим гигрометром значения температуры точки росы определялись по таблицам по значениям парциального давления водяного пара  $e$ , приведенным к атмосферному давлению.

Градуировочная характеристика кулонометрического гигрометра описывается выражением

$$x = 19,39 \frac{It}{qp}, \quad (8)$$

где  $x$  — концентрация в ppm,  $I$  — ток через влагочувствительный

элемент в мкА,  $q$  — расход анализируемого воздуха через влагочувствительный элемент в см<sup>3</sup>/мин,  $p$  мм рт. ст. и  $t^{\circ}\text{C}$  — соответственно давление и температура в зоне влагочувствительного элемента.

Значение  $e$  вычисляется с учетом зависимости  $x = \frac{e}{p}$ . Сравнения со стендом производились вначале во ВНИИМе (Ленинград) с использованием камеры «Фейтрон 3001» в феврале. Затем, после транспортировки самолетом гигрометра и стенда в КуАИ (Куйбышев) в апреле. Вслед за этим гигрометр был перевезен обратно по железной дороге и использовался по своему назначению до октября. В октябре он снова был доставлен самолетом в Куйбышев к месту нахождения стенда, и другим оператором была получена вторая группа наблюдений.

Таблица 1

| Выборка                                                 | $\Delta_i^{\circ}\text{C}$ |      |      |      |      |     |      |      |      |      | $n$ | $\Delta_c^{\circ}\text{C}$ | $S$  | $S_{\Delta_c}$ |
|---------------------------------------------------------|----------------------------|------|------|------|------|-----|------|------|------|------|-----|----------------------------|------|----------------|
|                                                         | -0,5                       | -0,4 | -0,3 | -0,2 | -0,1 | 0,0 | +0,1 | +0,2 | +0,3 | +0,4 |     |                            |      |                |
| Февраль, апрель . . . . .                               | 1                          | 3    | 1    | 5    | 6    | 6   | 3    | 0    | 1    | 1    | 27  | -0,10                      | 0,21 | 0,04           |
| Октябрь . . . . .                                       | 0                          | 1    | 2    | 9    | 20   | 9   | 2    | 9    | 2    | 3    | 57  | -0,02                      | 0,10 | 0,01           |
| Совокупная . . . . .                                    | 1                          | 4    | 3    | 14   | 26   | 15  | 5    | 9    | 3    | 4    | 84  | -0,04                      | 0,15 | 0,02           |
| Частоты для совокупности ( $\times 10^{-3}$ ) . . . . . | 12                         | 48   | 36   | 167  | 310  | 79  | 60   | 107  | 36   | 48   |     |                            |      |                |

Результаты сравнения стенда и ГТР с кулонометрическим гигрометром здесь не рассматриваются. Следует лишь отметить, что нигде разность между температурой точки росы по стенду или по ГТР и температурой точки росы, полученной пересчетом результатов измерений по кулонометрическому гигрометру, не превысила  $0,3^{\circ}\text{C}$  по абсолютной величине.

Весь полученный экспериментальный материал, относящийся к сравнениям стенда с гигрометром точки росы, сведен в табл. 1, где указаны частоты появления различных значений разностей  $\Delta_i$ ; в каждой из двух указанных групп и их совокупности, для которой, кроме того, рассчитаны и частоты. Помимо этого, в таблице указаны количество наблюдений в каждой из названных выборок и их совокупности, среднее арифметическое  $\Delta_c^{\circ}\text{C}$  значение разностей, оценка среднего квадратического отклонения (СКО)  $S$  от  $\Delta_c$  в каждой выборке и их совокупности и оценка СКО среднего арифметического  $S_{\Delta_c}$ .

При проведении сравнений значения  $t_0$  задавались в диапазоне от  $-42$  до  $-5^{\circ}\text{C}$ , а во второй серии, кроме того, было сделано 10 наблюдений при  $+6$  и  $+14^{\circ}\text{C}$ ; температура в зоне измерений гигрометра  $t_k$  задавалась в диапазоне от  $-34^{\circ}$  до  $+18^{\circ}\text{C}$  с превышением  $t_k$  над  $t_r$  в диапазоне от  $0,5$  до  $7^{\circ}\text{C}$ ; давление  $P_a$  изменялось в пределах от 980 до 1010 мбар; расход задавался в диапазоне

от 5 до 140 л/мин,  $\delta p_c$  соответственно изменялось от 13 до 150 мбар, а  $\delta p_k$  — от 5 до 83 мбар, и  $\frac{p_k}{p_c}$  — от 0,98 до 0,94.

Рассмотрение первичного экспериментального материала не обнаруживает существенного систематического влияния этих факторов в указанных диапазонах их изменения на значения  $\Delta_i$ .

Как видно из таблицы, по результатам 27 наблюдений первой выборки среднее арифметическое разности  $\Delta_c$  составляет  $-0,10^\circ\text{C}$  при СКО результата измерения  $S_{\Delta_c} = 0,04^\circ\text{C}$ , а по результатам 57 наблюдений второй выборки, полученной через полгода,  $\Delta_c$  составляет  $-0,02^\circ\text{C}$  при СКО результата измерения  $S_{\Delta_c} = 0,01^\circ\text{C}$ . Таким образом, числовые характеристики этих групп отличаются. Отличие  $\Delta_c$  первой выборки от  $\Delta_c$  второй может быть вызвано временной нестабильностью термочувствительных элементов, в особенности термистора (группы разделены временным промежутком 6 месяцев), многократной транспортировкой гигрометра, различием наблюдателей.

По существующим методикам [9] можно было бы найти, насколько эти различия числовых характеристик являются значимыми, т. е. определяется ли, например, изменение средней арифметической названными причинами или является случайным, обусловленным рассеиванием наблюдений внутри этих групп. Однако поскольку проводимый анализ и оценки носят предварительный характер, было принято, без проверки на однородность, что обе группы принадлежат одной статистической совокупности из 84 наблюдений. Проверка удовлетворения опытного закона распределения  $\Delta_i$  этой совокупности гипотезе о нормальном законе распределения по критерию Пирсона  $\chi^2$ , показала, что с вероятностью, равной 0,02, отвергнуть верную гипотезу распределение опытных данных подчиняется нормальному закону распределения. По данным этой совокупной выборки, среднее арифметическое разности  $\Delta_c$  составляет  $-0,04^\circ\text{C}$ , а СКО ее  $S_{\Delta_c} = 0,02^\circ\text{C}$ .

Задаваясь достаточно высокой доверительной вероятностью 0,99, которой соответствует доверительное отклонение 2,6  $S_{\Delta_c}$  можно сделать заключение, что при указанных условиях сравнений в течение десятимесячного периода в диапазоне значений точки росы и температуры паровоздушной смеси от  $-40$  до  $+40^\circ\text{C}$  средняя арифметическая разность между значением точки росы паровоздушной смеси, задаваемым стендом, и значением точки росы этой смеси, измеренным гигрометром, с указанной вероятностью заключена в пределах от  $-0,09$  до  $+0,01^\circ\text{C}$ , т. е. не превышает по абсолютной величине  $0,10^\circ\text{C}$ .

Полученный результат характеризует, с одной стороны, высокую воспроизводимость разнотипных средств измерения влажности воздуха, основанных на термодинамическом принципе фазового равновесия, и, с другой стороны, служит еще одним экспериментальным основанием для включения исследованной аппаратуры

в состав поверочных схем в качестве образцовых средств измерения влажности воздуха.

В заключение авторы приносят благодарность за помощь в организации проведения этой работы зав. лабораторией КуАИ А. П. Меркулову, старшему научному сотруднику лаборатории ВНИИМ Е. А. Гершкович и зав. отделом метрологии ГГО канд. техн. наук Н. П. Фатееву, а также старшему механику лаборатории КуАИ А. И. Каршину, принявшему участие в изготовлении, наладке и испытании установки.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бегунов А. А. К дискуссии о выборе единицы измерения влажности газов. — В кн.: Тезисы докладов на Пятой Всесоюзной научно-технической конференции по измерению влажности. Кутаиси, 1973, с. 183.
2. Резников Г. П. Физические и метрологические обоснования системы обеспечения единства измерений влажности воздуха в метеорологии. — В кн.: Тезисы докладов на Пятой Всесоюзной научно-технической конференции по измерению влажности. Кутаиси, 1973. 191 с.
3. Резников Г. П. Анализ физических процессов и погрешностей гигрометрического комплекса, основанного на термодинамическом принципе. — «Тр. ГГО», 1973, вып. 300, с. 15—39.
4. Резников Г. П., Фатеев Н. П. Воспроизведение и передача размера единицы влажности воздуха при метеорологических измерениях. — «Тр. ГГО», 1974, вып. 340, с. 107—117.
5. Меркулов А. П., Колышев Н. Д. Методика аттестации индикаторов влажности и результаты предварительных испытаний стенда. — «Тр. КуАИ», 1969, вып. 37, с. 57—75.
6. Меркулов А. П., Колышев Н. Д., Качкачишвили Л. Д. К вопросу создания образцового генератора влажного газа по методу фазового равновесия. — «Метрология», 1975, № 2, с. 67—71.
7. Леонова Л. И., Резников Г. П., Рогалев Ю. В. Статистические оценки погрешностей образцовых средств измерения влажности воздуха, входящих в состав поверочной схемы Гидрометслужбы. — «Тр. ГГО», 1975, вып. 345, с. 77—83.
8. Долинский Е. Ф. Обработка результатов измерений. М., Изд-во стандартов, 1973. 190 с.
9. Кудряшова Ж. Ф., Рабинович С. Г., Резник К. А. Методы обработки результатов наблюдений при измерениях. — «Труды метрологических ин-тов СССР», вып. 134(194). М., Изд-во стандартов, 1972. 119 с.
10. Резников Г. П., Фатеев Н. П. Термогигростаты для системы обеспечения единства измерений влажности и температуры воздуха. — «Тр. ГГО», 1975 вып. 345, с. 67—76.

*Л. И. Леонова, Т. П. Доманькова*

## МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЖИДКОСТНЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ТЕРМОМЕТРОВ

В связи с пересмотром ГОСТов на термометры метеорологические и необходимостью внесения в них погрешности в 1974—1975 гг. была проведена работа по исследованию серийных образцов термометров метеорологических следующих типов: психрометрические [1], почвенно-глубинные [2], для измерения температуры поверхности почвы [3], к ртутному барометру [4], прашевые [5], коленчатые Савинова [6], максимальные [7], минимальные [8] и спиртовые низкоградусные [9]. Эти термометры изготовлены Клинским термометровым заводом в 1973 г. При исследовании использовались образцовые термометры, изготовленные по ТУ 35-138—61. Использовались следующие типы термометров:

| Тип образцовых термометров            | № термо-<br>метров | Тип исследуемых термометров                                            |
|---------------------------------------|--------------------|------------------------------------------------------------------------|
| Психрометрический 1А                  | 52                 | К станционному психрометру<br>Почвенно-глубинные                       |
| Психрометрический 1Б                  | 31                 | К ртутному барометру<br>Для измерения температуры<br>поверхности почвы |
| Психрометрический 1А                  | 147                | Для измерения температуры<br>поверхности почвы                         |
| К психрометру аспираци-<br>онному II  | 50                 | Пращевые                                                               |
| К психрометру аспираци-<br>онному III | 23                 | Пращевые                                                               |
| Для низких температур IV              | 431                | Спиртовые низкоградусные                                               |

Исследования проводились по программе, включающей поверку соответствия термометров следующим требованиям ГОСТов:

а) по внешнему осмотру;

- б) плавность хода поправок;
- в) определение погрешности термометров в условиях поверки;
- г) определение погрешности интерполяции поправок термометра «от» и «до»;

д) изменение показаний при температуре  $0^{\circ}\text{C}$  за время поверки у спиртовых термометров, вызванное смачиванием стекла и дистилляцией спирта.

Исследованию подвергалось по 13—20 термометров каждого типа.

Определение погрешности термометров производилось методом сличения показаний исследуемых термометров с показаниями образцовых термометров в жидкостных термостатах на отметках шкалы, кратных  $10^{\circ}\text{C}$ , по методике, изложенной в [10]. Сличение показаний термометров с образцовыми проводилось при медленном повышении температуры, которое за время отсчетов не превышало  $0,2^{\circ}\text{C}$  при положительных и  $0,4^{\circ}\text{C}$  при отрицательных температурах. На каждой точке было проведено 10 серий сличений по пять отсчетов в серии. В промежутках между отдельными сериями велись наблюдения за постоянством положения точки  $0^{\circ}\text{C}$  у термометров.

Для определения погрешности интерполяции поправок термометров «от» и «до» для двух серий сличение показаний термометров с образцовым проводилось дополнительно и на отметках шкалы, кратных 5.

После окончания исследований у термометров низкоградусных было определено изменение показаний при температуре  $0^{\circ}\text{C}$ , вызванное смачиванием капилляра и дистилляцией спирта. Обработка результатов измерений производилась в соответствии с рекомендациями, изложенными в [11].

Погрешность одного отсчета на каждой температурной отметке шкалы, кратной  $10^{\circ}$ , определялась по формуле:

$$\Delta_1 = 3 \sqrt{S_1^2 + \omega^2}, \quad (1)$$

где  $S_1^2$  — внутрисерийная дисперсия разностей показаний поверяемого термометра и образцового:

$$S_1^2 = \frac{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_i)^2}{k(n-1)} = \sigma^2 \quad (2)$$

( $i=1, 2, \dots, 10, j=1, 2, \dots, 5, k$  — число серий наблюдений,  $n$  — число отсчетов в серии);  $\omega^2$  — составляющая дисперсии, обусловленная условиями измерений:

$$\omega^2 = \frac{S_2^2 - S_1^2}{n}. \quad (3)$$

В (3)  $S_2^2$  — межсерийная дисперсия разности показаний исследуемого и образцового термометров, которая определялась по формуле

$$S_2^2 = \frac{n \sum_{i=1}^k (\bar{x}_i - \bar{\bar{x}})^2}{k - 1}. \quad (4)$$

По внешнему осмотру все термометры удовлетворяли требованиям ГОСТа.

Для того чтобы установить значения поправок термометров и определить погрешность каждого отдельного наблюдения, были обработаны материалы сличений по указанным термометрам для каждой температурной отметки шкалы, кратной 10.

Обработка материалов сличений велась следующим образом:

а) в каждой серии вычислялись разности между отсчетами образцового и исследуемого термометров  $x_{ij}$ ;

б) определялись средние арифметические из разностей в серии  $\bar{x}_i$  по каждому типу термометров и термометру отдельно;

в) находились средние арифметические из средних разностей по сериям на каждой температурной отметке шкалы для каждого термометра;

Примечание. Так как поправки образцового и исследуемых термометров для всех 10 серий при одинаковой температуре одни и те же, то для упрощения вычислений при определении случайной погрешности в разности показаний образцового и исследуемых термометров поправки не вводились.

г) определялись поправки каждого термометра на всех отметках шкалы (как среднее из 10 серий), а также изменение поправок на каждые 10°C;

д) для определения погрешности термометров были определены отклонения разностей между показаниями исследуемых термометров и образцовых и средней разностью в серии  $x_{ij} - \bar{x}_i$  по всем сериям;

е) по полученным отклонениям по всем сериям и всем приборам для всех типов термометров были построены гистограммы, которые показали, что распределение отклонений от средней разности показаний у всех термометров близко к нормальному;

ж) были определены средние квадратические отклонения и погрешности каждого термометра после исключения систематической погрешности.

Полученные в результате исследований в условиях поверки погрешности термометров и средние квадратические отклонения на всех точках, кратных 10, даны в табл. 1.

За погрешность принималось максимальное значение, полученное для всех приборов.

Согласно принятой методике, поверка термометров производится через каждые 10°C, а поправки для пользования даются в сотых долях градуса при температуре сличения и в десятых — при определенных промежутках шкалы. Поправки в промежутке шкалы каждого десятка получают способом линейной интерполяции.

Таблица I

Средние квадратические отклонения  $\sigma$  и погрешности  $\Delta$  метеорологических термометров

| Тип термометров                                       | Температура, °C |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
|-------------------------------------------------------|-----------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|                                                       | -60             |          | -50      |          | -40      |          | -30      |          | -20      |          | -10      |          |
|                                                       | $\sigma$        | $\Delta$ | $\sigma$ | $\Delta$ | $\sigma$ | $\Delta$ | $\sigma$ | $\Delta$ | $\sigma$ | $\Delta$ | $\sigma$ | $\Delta$ |
| К аспирационному психрометру . . . . .                | —               | —        | —        | —        | —        | —        | 0,04     | 0,12     | 0,04     | 0,12     | 0,04     | 0,11     |
| К стациональному психрометру . . . . .                | —               | —        | —        | —        | —        | —        | 0,03     | 0,09     | 0,03     | 0,10     | 0,03     | 0,09     |
| Почвенно-глубинные . . . . .                          | —               | —        | —        | —        | —        | —        | —        | —        | —        | —        | 0,02     | 0,09     |
| Для измерения температуры поверхности почвы . . . . . | —               | —        | —        | —        | —        | —        | —        | —        | —        | —        | 0,05     | 0,2      |
| К ртутным барометрам . . . . .                        | —               | —        | —        | —        | —        | —        | —        | —        | —        | —        | —        | —        |
| Праши . . . . .                                       | —               | —        | —        | —        | —        | —        | 0,05     | 0,2      | 0,05     | 0,2      | 0,05     | 0,15     |
| Коленчатые Савинова . . . . .                         | —               | —        | —        | —        | —        | —        | —        | —        | —        | —        | 0,05     | 0,15     |
| Максимальные . . . . .                                | —               | —        | —        | —        | —        | —        | —        | —        | 0,05     | 0,20     | 0,05     | 0,20     |
| Минимальные . . . . .                                 | 0,05            | 0,30     | 0,05     | 0,30     | 0,05     | 0,30     | 0,05     | 0,25     | 0,05     | 0,25     | 0,05     | 0,20     |
| Спиртовые низкоградусные . . . . .                    | 0,05            | 0,30     | 0,05     | 0,30     | 0,05     | 0,30     | 0,05     | 0,25     | 0,05     | 0,25     | 0,05     | 0,20     |

| Тип термометров                                       | Температура, °C |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
|-------------------------------------------------------|-----------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|                                                       | 10              |          | 20       |          | 30       |          | 40       |          | 50       |          | 60       |          |
|                                                       | $\sigma$        | $\Delta$ | $\sigma$ | $\Delta$ | $\sigma$ | $\Delta$ | $\sigma$ | $\Delta$ | $\sigma$ | $\Delta$ | $\sigma$ | $\Delta$ |
| К аспирационному психрометру . . . . .                | 0,03            | 0,10     | 0,03     | 0,09     | 0,03     | 0,09     | 0,03     | 0,10     | 0,03     | 0,10     | —        | —        |
| К стациональному психрометру . . . . .                | 0,02            | 0,07     | 0,02     | 0,06     | 0,03     | 0,08     | 0,02     | 0,08     | —        | —        | —        | —        |
| Почвенно-глубинные . . . . .                          | 0,02            | 0,06     | 0,02     | 0,06     | 0,02     | 0,07     | 0,02     | 0,06     | —        | —        | —        | —        |
| Для измерения температуры поверхности почвы . . . . . | 0,05            | 0,2      | 0,05     | 0,2      | 0,05     | 0,2      | 0,05     | 0,2      | 0,05     | 0,2      | 0,05     | 0,2      |
| К ртутным барометрам . . . . .                        | 0,04            | 0,15     | 0,04     | 0,15     | 0,04     | 0,15     | 0,04     | 0,15     | —        | —        | —        | —        |
| Праши . . . . .                                       | 0,05            | 0,15     | 0,05     | 0,15     | 0,05     | 0,15     | 0,05     | 0,15     | 0,05     | 0,15     | —        | —        |
| Коленчатые Савинова . . . . .                         | 0,05            | 0,15     | 0,05     | 0,10     | 0,05     | 0,15     | 0,05     | 0,15     | 0,05     | 0,15     | —        | —        |
| Максимальные . . . . .                                | 0,05            | 0,15     | 0,05     | 0,20     | 0,05     | 0,15     | 0,05     | 0,15     | 0,05     | 0,15     | 0,05     | 0,20     |
| Минимальные . . . . .                                 | 0,05            | 0,20     | 0,05     | 0,20     | 0,05     | 0,20     | 0,05     | 0,15     | 0,05     | 0,15     | —        | —        |
| Спиртовые низкоградусные . . . . .                    | 0,05            | 0,20     | 0,05     | 0,20     | —        | —        | —        | —        | —        | —        | —        | —        |

Для определения возможных погрешностей интерполяции были найдены поправки способом интерполяции и определены разности между этими поправками и полученными при исследовании на точках, кратных 5, для всех термометров (табл. 2).

Т а б л и ц а 2

Погрешности поправок за счет интерполяции

| Тип термометров                                       | Погрешность, °C |       |
|-------------------------------------------------------|-----------------|-------|
|                                                       | от              | до    |
| К аспирационному психрометру                          | —0,05           | +0,04 |
| К станционному психрометру . .                        | —0,06           | +0,09 |
| Почвенно-глубинные . . . . .                          | —0,08           | +0,10 |
| Для измерения температуры поверхности почвы . . . . . | —0,10           | +0,05 |
| К ртутному барометру . . . . .                        | —0,05           | +0,05 |
| Пращи . . . . .                                       | —0,10           | +0,10 |
| Максимальные . . . . .                                | —0,05           | +0,10 |
| Минимальные . . . . .                                 | —0,10           | +0,10 |
| Спиртовые низкоградусные . . .                        | —0,10           | +0,10 |

Из табл. 2 следует, что погрешность поправок термометров за счет интерполяции в промежутках каждого десятка градусов для всех термометров не превышает 0,1°C.

На показания спиртовых термометров оказывает влияние смачивание капилляра и дистилляция спирта. Как известно, спирт, наполняющий резервуар и капилляр спиртовых термометров, обладает

Т а б л и ц а 3

Погрешности термометров, определенные в 1973—1975 гг.

| Тип термометров                                       | Погрешность, °C |
|-------------------------------------------------------|-----------------|
| К аспирационному психрометру . . . . .                | ±0,1            |
| К станционному психрометру . . . . .                  | ±0,1            |
| Почвенно-глубинные . . . . .                          | ±0,1            |
| Для измерения температуры поверхности почвы . . . . . | ±0,2            |
| К ртутным барометрам . . . . .                        | ±0,15           |
| Пращи . . . . .                                       | ±0,2            |
| Коленчатые Савинова . . . . .                         | ±0,15           |
| Максимальные . . . . .                                | ±0,2            |
| Минимальные . . . . .                                 | ±0,3            |
| Спиртовые низкоградусные . . . . .                    | ±0,3            |

способностью дистиллироваться в верхнюю часть капилляра, а также смачивать стенки капилляра. Поэтому спиртовые термометры могут иметь дополнительные погрешности, вызванные этим явлением. Такие явления могут иметь место и во время поверки термометров.

При поверке погрешность за счет дистилляции определяется расхождением показаний при  $0^{\circ}\text{C}$  в начале и конце поверки. При обработке материалов поверки за  $0^{\circ}\text{C}$  принимается средняя поправка.

ГОСТ на спиртовые термометры допускает изменение поправки на точке  $0^{\circ}\text{C}$  в начале и конце поверки на  $0,25^{\circ}\text{C}$ . Таким образом, дополнительно к погрешности, полученной при исследовании спиртовых термометров, может появиться погрешность за счет дистилляции, не превышающая  $0,25^{\circ}\text{C}$ . Следовательно, погрешность спиртовых термометров может достигать до  $0,5^{\circ}\text{C}$ .

При исследовании спиртовых термометров расхождение поправок на точке  $0^{\circ}\text{C}$  не превышало  $0,1^{\circ}\text{C}$ .

Из полученных данных следует, что при проведении исследований спиртовых термометров дистилляция практически отсутствовала.

В заключение можно сделать следующие выводы.

1. В результате проведенной работы определена погрешность термометров на всех точках, кратных 10, в условиях поверки после исключения систематической погрешности (табл. 3). Полученные результаты хорошо согласуются с результатами 1948—1949 гг. [12].

2. На основании полученных данных пересмотрены (совместно с СКТБ СП) ГОСТы на термометры: коленчатые Савинова, минимальные и спиртовые низкоградусные. В ГОСТ на психметрические термометры внесены погрешности.

3. Разработаны и утверждены методические указания «Термометры ртутные и спиртовые метеорологические. Методы и средства поверки».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Термометры ртутные метеорологические психметрические. ГОСТ 15055—69. М., Изд-во стандартов, 1971. 9 с.
2. Термометры ртутные метеорологические почвенно-глубинные. ГОСТ 6083—69. М., Изд-во стандартов, 1971. 5 с.
3. Термометры ртутные метеорологические для определения температуры поверхности почвы. ГОСТ 6079—69. М., Изд-во стандартов, 1969. 6 с.
4. Термометры ртутные метеорологические к ртутному барометру. ГОСТ 6082—69. М., Изд-во стандартов, 1969. 5 с.
5. Термометры прашевые ртутные метеорологические. ГОСТ 381—69. М., Изд-во стандартов, 1969. 5 с.
6. Термометры ртутные метеорологические коленчатые (Савинова). ГОСТ 112—51. М., Изд-во стандартов, 1959. 6 с.

7. Термометры ртутные метеорологические максимальные. ГОСТ 630—69. М., Изд-во стандартов, 1969. 7 с.
8. Термометры спиртовые стеклянные метеорологические минимальные. ГОСТ 6085—75. М., Изд-во стандартов, 1976. 10 с.
9. Термометр спиртовой метеорологический низкоградусный. ГОСТ 4497—52. М., Изд-во стандартов, 1959. 7 с.
10. Руководство по поверке метеорологических приборов. Л., Гидрометеиздат, 1967, с. 9—49.
11. Методы обработки результатов наблюдений при измерениях. — «Тр. метрологических институтов СССР», 1972, вып. 134/194, с. 8—51.
12. Луговская М. А. О точности поправок метеорологических термометров. — «Тр. ГГО», 1950, вып. 21/83, с. 106—112.

**Б. В. Куров**

## **ПОЛУАВТОМАТИЧЕСКИЙ ЖИДКОСТНЫЙ ТЕРМОКРИОСТАТ ДЛЯ ПОВЕРКИ И ГРАДУИРОВКИ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ТЕРМОМЕТРОВ СОПРОТИВЛЕНИЯ**

Поверка и градуировка термометров сопротивления (ТС), применяемых в Гидрометслужбе, осуществляется по двум реперным точкам на установках типа УТТ-5. Стандартное оборудование для поверки ТС во всем диапазоне шкалы отсутствует.

Ниже описывается простая конструкция термокриостата, разработанного в ГГО для этой цели (рис. 1) [3].

Термокриостат (рис. 2) представляет собой термостатированный объем, который устанавливается на подставке. В бак 7 помещается хладагент (сухая углекислота, лед, холодная вода), а в бак 6 заливается жидкость (вода, спирт). С помощью регулятора 11, датчика температуры 12 и электронагревателя 5 осуществляется задание и стабилизация температуры. С помощью электродвигателя 1 с мешалкой 2 производится перемешивание жидкости. Бак с хладагентом закрывается крышкой 4. Патрубки 9 и 10 предназначены для слива жидкости. Теплоизолирующим материалом 8 служит пенопласт. Для установки образцовых и поверяемых термометров предусмотрены отверстия 3. Регулятор 11 расположен на откидном столике и имеет разъемное соединение с органами регулирования. Это создает определенные удобства при ремонте и настройке термокриостата, а также при необходимости перевода на ручное управление. Электрическая схема регулятора и описание принципа действия его представлены в работе [2].

Результаты экспериментальных исследований характеристик термокриостата приведены в табл. 1.

С помощью образцового платинового термометра в каждой стабилизируемой точке производилась группа измерений, состоящая из пяти отсчетов температуры с интервалом 6 мин. Экстремальные отклонения от среднего значения температуры в группе измерений характеризуют и временную стабильность регулирования.

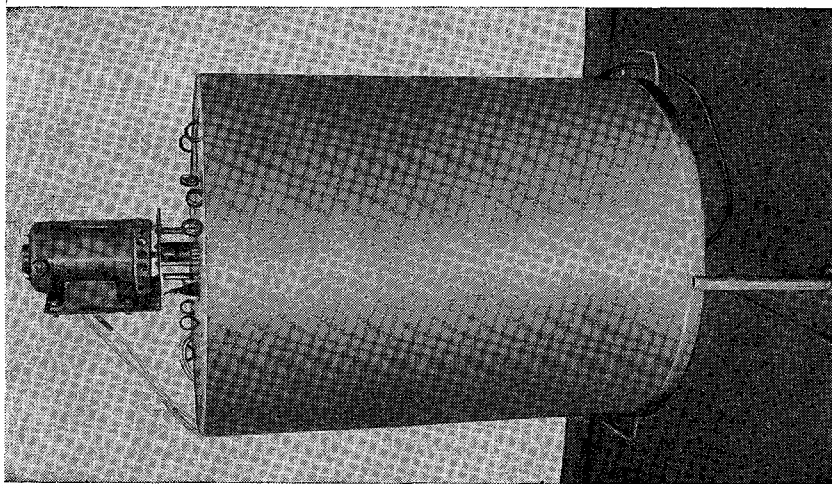


Рис. 1. Термокриостат (общий вид).

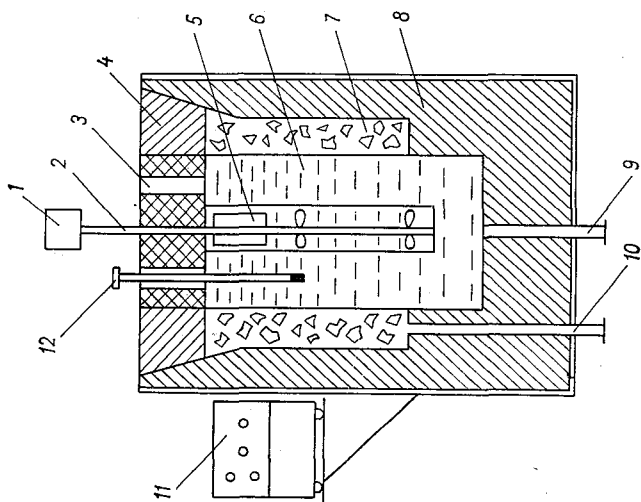


Рис. 2. Схематический разрез термокриостата.

Из табл. 1 видно, что отклонение температуры в стабилизируемых точках не превышает  $0,1^{\circ}\text{C}$ .

Пренебрегая погрешностью образцового средства измерения, точность автоматической стабилизации температуры в термостате можно нормировать пределом допускаемой основной абсолютной погрешности  $\Delta = \pm 0,1^{\circ}\text{C}$ .

Погрешность задания температуры во всем диапазоне составляет  $1^{\circ}\text{C}$ . Регулируемые температуры имеют диапазон от  $-40$  до  $+40^{\circ}\text{C}$ . В случае необходимости диапазон можно расширить до  $\pm 60^{\circ}\text{C}$ .

Таблица 1

| Средние арифметические<br>групп измерений<br>в точках, $^{\circ}\text{C}$ | Экстремальные отклонения<br>от среднего в группе, $^{\circ}\text{C}$ |       |
|---------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|-------|
|                                                                           | от                                                                   | до    |
| -40,80                                                                    | -0,08                                                                | +0,08 |
| -40,27                                                                    | -0,03                                                                | +0,02 |
| -38,15                                                                    | -0,10                                                                | +0,09 |
| -29,32                                                                    | -0,01                                                                | +0,01 |
| -24,95                                                                    | -0,02                                                                | +0,02 |
| -22,73                                                                    | -0,09                                                                | +0,10 |
| -18,95                                                                    | -0,02                                                                | +0,05 |
| -14,93                                                                    | -0,06                                                                | +0,06 |
| -6,01                                                                     | -0,06                                                                | +0,03 |
| +15,11                                                                    | -0,02                                                                | +0,02 |
| +32,52                                                                    | -0,04                                                                | +0,04 |
| +34,53                                                                    | -0,02                                                                | +0,02 |
| +36,94                                                                    | -0,03                                                                | +0,03 |
| +39,52                                                                    | -0,03                                                                | +0,03 |
| +44,26                                                                    | -0,08                                                                | +0,08 |

Температурные градиенты в зоне расположения чувствительных элементов образцового и поверяемого термометров не превышают  $0,0005^{\circ}\text{C}/\text{см}$ .

При поверке или градуировке термометры через отверстия в крышке термостата погружаются в жидкость. Если термометры не имеют гидрозащиты, то их можно разместить в стеклянных пробирках, погружаемых в жидкость. Такой метод не вносит дополнительных погрешностей и одновременно упрощает процесс подготовительных работ.

Термостат может быть использован в комплекте серийно выпускаемой образцовой установки типа УТТ-5 для поверки термометров сопротивления и термопар во всем диапазоне измерений [1].

Например, при градуировке метеорологических термисторов типа МТ-54 с неравновесным измерительным мостом и указателем можно использовать термокриостат, а в качестве образцового средства измерения — платиновый термометр ПТС-10 и измерительный пульт установки УТТ-5 или измерительный мост типа МОД-58. Такой комплекс средств измерения позволяет поверять и градуировать платиновые и медные термометры сопротивления, термопары и полупроводниковые термометры сопротивления, т. е. является универсальным.

Питание термокриостата осуществляется от сети переменного тока 220 В. Потребляемая мощность не более 0,5 кВт. Необходимое количество жидкости для залива в термокриостат 16 л. Хорошая теплоизоляция позволяет экономно использовать хладагент. Время, необходимое для проверки одной партии термометров, не превышает 5 часов, а расход углекислоты — 30 кг.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фатеев Н. П. Поверочные схемы для метеорологических измерений. — «Тр. ГГО», 1973, вып. 313, с. 145—155.
2. Куров Б. В. Лобозина Н. В. Применение тиристорных схем в измерительной и поверочной аппаратуре. — «Тр. ГГО», 1975, вып. 345, с. 109—116.
3. Сущинский Б. Л., Тихмянов Г. Г. Жидкостный термокриостат для проверки термометров сопротивления. — «Тр. ГГО», 1969, вып. 240, с. 138—147.

*Б. Л. Сущинский, Н. П. Фатеев*

### **ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОБОСНОВАНИЮ МЕТОДИКИ КОНТРОЛЯ ГРАДУИРОВОЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПАРАМЕТРОВ ВЕТРА ТИПА М-63М-1 В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

Первичная поверка приборов и измерительных преобразователей типа М-63М, являющихся основными средствами измерения параметров ветра в Гидрометслужбе, в настоящее время осуществляется при выпуске их на заводе-изготовителе и в ГГО после ремонта с применением образцовых аэродинамических труб. При метрологическом обслуживании приборов на сети станций необходима их периодическая поверка и контроль работы в процессе эксплуатации. Метрологический контроль может осуществляться путем поэлементной поверки преобразователей и косвенной оценки их градуировочных характеристик. В рассматриваемой статье приводятся результаты исследования и анализ возможностей этого метода. В основу исследований была положена зависимость градуировочных характеристик преобразователей М-63М от геометрических размеров винта и моментов трения в осях винта и флюгарки. Наличие такой зависимости дает возможность проверять сохранность характеристик преобразователей посредством измерения и контроля указанных параметров. Этому способствуют также важные особенности конструкции и технологии изготовления ветроприемника на М-63М, который выполняется в виде 4-лопастного литого винта из стеклопластика, что повышает надежность и стабильность его аэродинамических свойств.

Выходным параметром преобразователя М-63М является число оборотов в единицу времени, преобразуемое в импульсы. Винт под воздействием флюгарки устанавливается в плоскости, перпендикулярной направлению воздушного потока. Число импульсов  $N$  в единицу времени на выходе преобразователя пропорционально измеряемой скорости потока  $v$ , т. е.

$$N = f(v). \quad (1)$$

При установившемся движении градуировочное уравнение преобразователя с учетом сил трения и индуктивного сопротивления (1) имеет вид

$$u = v \operatorname{tg}(\alpha - \gamma), \quad (2)$$

где  $u$  — линейная скорость вращения винта в точке с радиусом  $r$  (м/с);  $v$  — скорость воздушного потока (м/с);  $\alpha$  — угол атаки лопастей винта (град·мин);  $\gamma$  — угол, зависящий от сил трения и индуктивного сопротивления и равный 3—5°.

Зависимость линейной скорости от числа оборотов винта  $N$  определяется уравнением

$$u = \frac{\pi r}{30} N. \quad (3)$$

С учетом (3) уравнение (2) принимает вид

$$N = \frac{30}{\pi r} \operatorname{tg}(\alpha - \gamma) v. \quad (4)$$

Уравнение (4) представляет собой зависимость выходного параметра первичного измерительного преобразователя — количества импульсов в минуту от скорости воздушного потока и от свойств винта, характеризующихся в основном углом атаки его лопастей. Отклонение угла атаки от номинального значения приводит к неидентичности винтов и погрешности в измерении скорости. В качестве угла атаки, характеризующего винт, целесообразно принимать среднее значение из углов атаки четырех лопастей. Что касается угла, зависящего от сил трения (угол  $\gamma$ ), то он определяется типом винта и практически не отражает индивидуальных особенностей винтов данного типа. Учитывая это, выражение для градуировочной характеристики (4) целесообразно представить в виде

$$N = k v. \quad (5)$$

Здесь  $k$  является коэффициентом, определяющим градуировочные свойства винта:

$$k = \frac{30}{\pi r} \operatorname{tg}[(\alpha - \gamma) \pm \Delta\alpha], \quad (6)$$

где  $\Delta\alpha$  — отклонение угла атаки лопастей винта от номинального значения.

При существующей методике поверки первичных преобразователей скорости ветра с применением аэродинамических труб коэффициент  $k$  определяют в ходе поверки и в дальнейшем вводят в поверочное свидетельство в виде коэффициента пересчета. Выражение (5) может быть использовано при определении абсолютной и относительной погрешностей первичного преобразователя скорости.

Выходные абсолютная и относительная погрешности  $\Delta_{\text{вых}}$  и  $\sigma_{\text{вых}}$  при этом будут соответственно равны

$$\Delta_{\text{вых}} = N_{\text{изм}} - kv_{\text{т}}, \quad (7)$$

$$\sigma_{\text{вых}} = \left( \frac{N_{\text{изм}}}{kv_{\text{т}}} - 1 \right) \cdot 100, \quad (8)$$

где  $N$  — число импульсов в минуту на выходе преобразователя;  $k = N_{\text{изм}}/v_{\text{т}}$  — коэффициент из градуировочных данных ( $v_{\text{т}}$  — скорость воздушного потока в аэродинамической трубе).

Иногда коэффициент  $k$  используют при анализе данных, характеризующих винты, как отношение числа оборотов (импульсов) в минуту к скорости воздушного потока в метрах в секунду (т. е. об·с/м·мин) [3].

Важной метрологической характеристикой первичного преобразователя скорости ветра наряду с градуировочным коэффициентом  $k$  является момент трения на оси вращения винта. Показано, что в режиме трогания момент аэродинамических сил, действующих на лопасти винта, уравнивается моментом трения  $M_{\text{тр}}$  (1)

$$M_{\text{тр}} = 0,5mrc_y \rho v_0^2 S, \quad (9)$$

где  $m$  — число лопастей винта,  $r$  — радиус приложения аэродинамических сил,  $c_y$  — коэффициент подъемной силы,  $\rho$  — плотность воздуха,  $v_0$  — порог чувствительности по скорости набегающего потока,  $S$  — площадь лопастей.

Решая уравнение (9) относительно порога чувствительности по скорости  $v_0$ , получим

$$v_0 = \sqrt{\frac{2M_{\text{тр}}}{mrc_y \rho S}}. \quad (10)$$

Выражение (10) позволяет определить порог чувствительности по скорости, соответствующий моменту трогания винта ветроприемника с учетом его характеристик.

Что касается порога чувствительности флюгарки по скорости и момента трения на вертикальной оси ветроприемника, то эти характеристики, как и связь между ними, в настоящее время не изучены.

Основные метрологические характеристики и некоторые дополняющие их технические требования, которым должны отвечать преобразователи М-63М, приведены в табл. 1.

На преобразователи более поздних выпусков, используемые в составе станций М-106М, нормативно-техническая документация не разрабатывалась и они выпускались по документации на анеморумбометры М-63М. В ней приводились пределы измерений, учитывающие выходные параметры анеморумбометров и соответствующие суммарные погрешности приборов. Существенно отличается характеристика преобразователей анеморумбометров по скорости, что связано с изменением угла атаки лопастей. Значения порогов чув-

ствительности, моментов трения и дисбалансов преобразователей анеморумбометров М-63М не отличаются от приводимых в табл. 1, а частота импульсов и сдвиг фаз в документации не приводятся.

Из сопоставления технической документации датчиков параметров ветра М-63М и анеморумбометров М-63М (ТУ 25.04.1564-71) следует, что конструктивно указанные преобразователи идентичны, за исключением характеристики винтовых ветроприемников. Их коэффициенты  $k$  соответственно равны 60,167 и 54,000.

Таблица 1

Основные метрологические характеристики преобразователя М-63М

| № пп | Метрологические характеристики                                          | Значение           |
|------|-------------------------------------------------------------------------|--------------------|
| 1.   | Диапазон измерения скорости ветра, м/с . . . . .                        | 1—60               |
| 2.   | Частота импульсов, Гц . . . . .                                         | 1—60               |
| 3.   | Погрешность измерения скорости ветра, м/с . . . . .                     | $\pm(0,3 + 0,04v)$ |
| 4.   | Направление ветра, градусы . .                                          | 0—360              |
| 5.   | Сдвиг фаз между двумя последовательностями импульсов, градусы . . . . . | 0—180              |
| 6.   | Погрешность измерения направления ветра, градусы . . . . .              | $\pm 5$            |
| 7.   | Порог чувствительности по скорости, м/с . . . . .                       | $\leq 0,6$         |
| 8.   | Порог чувствительности по направлению, м/с . . . . .                    | $\leq 1,2$         |
| 9.   | Момент трения на оси винта, г·см . . . . .                              | $\leq 5$           |
| 10.  | Суммарный момент трения флюгарки, г·см . . . . .                        | $\leq 60$          |
| 11.  | Дисбаланс винта, градусы . . .                                          | $< 30$             |
| 12.  | Дисбаланс флюгарки, градусы . .                                         | $< 45$             |

В выпущенной позднее технической документации на анеморумбометры М-63М-1 большинство их метрологических параметров приведено без изменения, однако из технических требований исключены моменты трения на осях винта и флюгарки. Что касается номинального значения угла атаки лопастей и его допустимого отклонения, то они в технической документации отсутствуют.

К основным метрологическим характеристикам преобразователя параметров ветра, определяемым при поверке, относятся пороги чувствительности и погрешности измерения скорости и направления ветра. Поверка указанных параметров должна осуществляться при

выпуске преобразователей из производства и после их ремонта (первичная поверка), а также в ходе их эксплуатации (периодическая поверка). При первичной поверке определение порогов чувствительности по скорости и направлению ветра и погрешности по диапазону измерения скорости ветра осуществляют в аэродинамических трубах заводов-изготовителей, пользуясь руководством по поверке [7] и методами поверки, изложенными в технических условиях. Определение погрешностей в диапазоне измерения направления ветра осуществляют с применением частотомера в соответствии с методикой, изложенной в технических условиях или в методических указаниях «Методы и средства поверки».

Определение порога чувствительности по скорости заключается в определении скорости, при которой начинает устойчиво вращаться винтовой ветроприемник преобразователя. Определение порога чувствительности по направлению состоит в определении скорости, при которой флюгарка, будучи отведена на  $15^\circ$  от направления воздушного потока, под воздействием последнего возвращается в исходное положение с погрешностью, не превышающей  $\pm 10^\circ$ .

Погрешность преобразователя в диапазоне измеряемых скоростей ветра определяют путем создания воздушного потока в аэродинамической трубе, в которой размещается поверяемый преобразователь. В ходе поверки находят величину абсолютной погрешности преобразователя по его выходу или входу. Полученное значение сопоставляют с допустимой погрешностью, предусматриваемой технической документацией. Погрешность преобразователя по направлению ветра определяют путем сравнения угла сдвига фаз на выходе преобразователя, измеряемого образцовым прибором, с задаваемыми посредством лимба и указателя углами поворота флюгарки относительно исходного ее положения. Значение абсолютной погрешности сравнивают со значением допустимой погрешности, предусматриваемой документацией.

Рассмотренные методы определения основных метрологических характеристик преобразователя основаны на применении аэродинамической трубы с диапазоном скорости воздушного потока до 60 м/с. Такая труба должна иметь отградуированные отверстия, соединяемые с микроманометром. Для периодической поверки преобразователей может быть применена малая аэродинамическая труба [5, 6] с диапазоном скорости воздушного потока в ней 0,7—20 м/с и с потребляемой мощностью около 5 кВА.

Погрешность преобразователя при измерении направления воздушного потока определяется разностью между заданным установкой по лимбу направлением флюгарки и фазовым сдвигом между опорной и одной из измеряемых последовательностей импульсов на выходе преобразователя. Угол фазового сдвига между двумя последовательностями импульсов может быть измерен с применением частотомера, устройства для проверки каналов параметров ветра [7], или имитатора датчиков для поверки УАТГМС-4М.

Сущность метода проверки сохранности градуировочной характеристики преобразователя скорости ветра заключается в опреде-

лении момента трения на оси винта и отклонения угла установки лопастей винта от номинальных допустимых значений. Допустимые момент трения на оси винта и отклонение угла установки его лопастей при этом должны нормироваться. Принцип проверки сохранности метрологических характеристик преобразователя параметров ветра по направлению отличается тем, что определение порога чувствительности по направлению осуществляется не в аэродинамической трубе, а посредством определения момента трения на оси флюгарки. Применение указанных принципов было предложено при разработке анеморумбометра типа М-63М-1.

Проверку преобразователя этого прибора предполагалось осуществлять непосредственно на местах эксплуатации с использованием разработанного для этой цели комплекта приспособлений [9].

В состав комплекта приспособлений входят контршаблон, предназначенный для проверки угла установки лопастей винта, ролики для передачи усилия грузика на оси винта и флюгарки, разновесы и раскручивающее приспособление для задания оборотов оси анемометра. Последнее необходимо не только для проверки работы импульсаторов преобразователя, формирующих последовательности импульсов, но и для обеспечения поступлений серий импульсов при определении погрешностей в диапазоне измерения направления.

Контршаблон представляет собой массивное металлическое основание с устройством для установки и фиксации на нем винта с проверяемыми лопастями и микрометра часового типа.

Микрометр устанавливается с помощью углового шаблона, снимаемого в дальнейшем. Раскручивающее приспособление состоит из синхронного электродвигателя, закрепляемого на корпусе преобразователя и двух шестерен, связывающих двигатель с осью винта. Один из роликов крепится на оси винта, а второй — с помощью кронштейна, входящего в состав комплекта приспособлений, на стойке преобразователя.

Как было показано, в основу проверки сохранности градуировочных характеристик преобразователя положена их связь с геометрическими и механическими параметрами ветроприемника. Порог чувствительности винтового преобразователя скорости ветра определяется суммарным моментом трения и нагрузки преобразователя [11]. Порог чувствительности количественно измеряется скоростью воздушного потока при равенстве момента трения и нагрузки. Пользуясь выражением (10) по измеренному значению момента трения с учетом элементов нагрузки на оси винта можно определить порог чувствительности ветроприемника по скорости. Нагрузка на оси винта может быть оценена элементарными расчетами. Момент трения и нагрузка на оси винта, определяющие порог чувствительности, сказываются также на градуировочной характеристике в области малых скоростей. Это связано с тем, что в формуле (2) угол  $\gamma$ , представляющий собой угол между относительным вектором скорости и плоскостью конца лопасти при установившемся вращении винта, в процессе эксплуатации может меняться на  $\pm 1,5^\circ$ .

Не менее существенна зависимость (5), которая является градуировочным уравнением винта. Коэффициент  $k$  этого уравнения позволяет оценивать изменение градуировочной характеристики винта в зависимости от изменения угла атаки лопастей, т. е. отклонения угла их установки от номинальных значений.

На основании перечисленных зависимостей выполнены соответствующие расчеты, представленные в табл. 2—6. При расчетах номинальный угол наклона лопасти в сечении винта, отстоящего от его оси вращения на 140 мм, принимался равным  $50^{\circ}10'$  (угол атаки),

Таблица 2

Расчетные значения коэффициента  $k$  и число оборотов винта в зависимости от радиуса и угла атаки винта при различных  $v$

| $r$          | $\Delta \alpha$ | $k$  | $v$ м/с    |            |            |           |
|--------------|-----------------|------|------------|------------|------------|-----------|
|              |                 |      | 5          | 15         | 35         | 60        |
| 0,200        | 0               | 54,0 | 270,0      | 810,0      | 1890       | 3240      |
| 0,200        | —40             | 52,7 | 263,7      | 791,2      | 1846       | 3165      |
| 0,200        | 40              | 55,3 | 276,4      | 829,2      | 1935       | 3317      |
| 0,148        | 0               | 54,6 | 272,8      | 818,3      | 1909       | 3273      |
| 0,148        | —40             | 53,3 | 266,4      | 799,2      | 1865       | 3197      |
| 0,148        | 40              | 55,8 | 279,2      | 837,6      | 1954       | 3350      |
| $\Delta N_p$ | —               | —    | $\pm 18,9$ | $\pm 35,1$ | $\pm 67,5$ | $\pm 108$ |

а длина лопасти винта — 200 мм. По формуле (6) оценивали влияющие изменения  $r$  и  $\alpha$  в допускаемых пределах на выходные значения  $N$  преобразователя и на возникающие при этом абсолютные и относительные погрешности. Для этого, пользуясь статической характеристикой винтового ветроприемника преобразователя, определяли сначала угол ( $\alpha - \gamma$ ), который соответствует  $48^{\circ}31'$ . Затем вычисляли при задаваемых скоростях (5, 15, 35 и 60 м/с) номинальные и предельные значения  $N$ , соответствующие им абсолютные и относительные погрешности.

В табл. 2 приведены номинальные значения коэффициента  $k$  и число оборотов винта при четырех скоростях, а также предельные допустимые отклонения количества оборотов  $\Delta N_p$ , полученные с учетом погрешности  $\Delta v = \pm (0,2 \div 0,03 v)$ , переведенные в погрешность числа оборота  $\Delta N_p$ .

Из табл. 2 следует, что коэффициенты  $k$  при различных скоростях и число оборотов винта зависят от радиуса и угла атаки последнего. Наименьшие значения коэффициента и числа оборотов соответствуют винту с номинальным радиусом и уменьшенным углом атаки, а наибольшие — винту с уменьшенным радиусом и увеличенным углом атаки.

В существующей нормативно-технической документации допустимые погрешности преобразователей скорости ветра представляются как погрешности входной, а не выходной величины. В связи с этим представляет интерес выразить погрешность преобразователя, обусловленную отклонением угла установки лопастей  $\Delta\alpha$  от номинального, в единицах скорости (м/с). Используя с этой целью формулу (7), имеем

$$\Delta N = N_{\text{изм}} - kv.$$

Разделив левую и правую части выражения на  $k$  и учитывая, что

$$k = \frac{N}{v},$$

выразим погрешность  $\Delta N$  через  $\Delta v$ , пользуясь формулой (6),

$$\Delta v = \frac{\operatorname{tg}(\alpha - \gamma \pm \Delta\alpha) \cdot v}{\operatorname{tg}(\alpha - \gamma)} - v. \quad (11)$$

Принимая значение угла  $(\alpha - \gamma) = 48^\circ 31'$ , погрешности определяли по формуле (11) при различных линейных отклонениях  $\Delta\alpha$  в миллиметрах. Однако значения  $\Delta\alpha$  в миллиметрах могут быть переведены в угловые ( $\Delta\alpha^\circ$ ) (табл. 3).

Таблица 3

Расчетные погрешности  $\Delta v$  измерения скоростей, обусловленные отклонением угла атаки винтов от номинального

| $v$ м/с      | $\Delta\alpha$ мм (градусы) |      |      |      |      |      |      | 0,03 $v$ м/с |
|--------------|-----------------------------|------|------|------|------|------|------|--------------|
|              | 0,5                         | 0,8  | 1,0  | 1,5  | 2,0  | 2,5  | 3,0  |              |
| 5            | 0,07                        | 0,11 | 0,14 | 0,21 | 0,28 | 0,35 | 0,41 | 0,15         |
| 15           | 0,22                        | 0,33 | 0,42 | 0,63 | 0,84 | 1,07 | 1,21 | 0,45         |
| 35           | 0,50                        | 0,80 | 1,00 | 1,47 | 1,98 | 2,47 | 2,82 | 1,05         |
| 40           | 0,60                        | 0,90 | 1,15 | 1,65 | 2,28 | 2,80 | 3,24 | 1,20         |
| 60           | 0,85                        | 1,40 | 1,75 | 2,52 | 3,40 | 4,23 | 4,85 | 1,80         |
| $\Delta v$ % | 1,4                         | 2,3  | 2,8  | 4,2  | 5,6  | 7,0  | 8,2  | 3,0          |

Из табл. 3 следует, что по сравнению с применяемой предельной погрешностью 0,03  $v$  расчетные значения погрешностей оказываются допустимыми при углах отклонений, не превышающих 1,0 мм.

В целях проверки идентичности винтов с применением контршаблона был осуществлен замер отклонений углов атаки лопастей пяти винтов от номинального их значения. Работа эта проводилась двумя поверителями независимо.

Каждый поверитель выполнял измерения в следующем объеме и последовательности:

а) на контршаблоне укреплялся индикатор и с помощью шаблона определяли его начальный отсчет, соответствующий углу  $51^\circ 06'$ ;

б) шаблон снимался, после чего на контршаблоне устанавливался очередной винт;

в) для каждой из четырех лопастей винта осуществлялось 10 групп измерений, содержащих по пять отсчетов;

г) для группы из пяти отсчетов определялось ее среднее значение — средний отсчет группы;

д) определялось среднее отклонение угла установки лопастей как разность между средним и начальным отсчетами индикатора для каждой серии.

По результатам выполненных измерений были получены исходные данные для табл. 4, в которой представлены средние из 10 серий

Таблица 4

Отклонения углов установки лопастей  $\Delta \alpha$  и случайные погрешности их измерения  $S$

| № винта | Поверитель | Величина        | № лопасти |       |       |       | Средние отклонения для винта |
|---------|------------|-----------------|-----------|-------|-------|-------|------------------------------|
|         |            |                 | 1         | 2     | 3     | 4     |                              |
| 260     | 1          | $\Delta \alpha$ | 1,56      | 0,76  | 0,74  | 0,78  | 0,96                         |
|         |            | $S$             | 0,008     | 0,010 | 0,005 | 0,007 | 0,96                         |
|         | 2          | $\Delta \alpha$ | 1,54      | 0,77  | 0,74  | 0,74  | 0,96                         |
|         |            | $S$             | 0,007     | 0,007 | 0,011 | 0,010 |                              |
| 35      | 1          | $\Delta \alpha$ | 1,45      | 0,80  | 1,16  | 0,93  | 1,08                         |
|         |            | $S$             | 0,015     | 0,008 | 0,003 | 0,006 | 1,06                         |
|         | 2          | $\Delta \alpha$ | 1,40      | 0,80  | 1,12  | 0,87  | 1,05                         |
|         |            | $S$             | 0,007     | 0,018 | 0,007 | 0,008 |                              |
| 309     | 1          | $\Delta \alpha$ | 0,78      | 1,10  | 1,34  | 1,43  | 1,16                         |
|         |            | $S$             | 0,007     | 0,017 | 0,012 | 0,007 | 1,17                         |
|         | 2          | $\Delta \alpha$ | 0,75      | 1,23  | 1,33  | 1,43  | 1,18                         |
|         |            | $S$             | 0,003     | 0,014 | 0,009 | 0,007 |                              |
| 337     | 1          | $\Delta \alpha$ | 0,86      | 0,78  | 0,81  | 1,49  | 0,98                         |
|         |            | $S$             | 0,015     | 0,003 | 0,006 | 0,013 | 0,98                         |
|         | 2          | $\Delta \alpha$ | 0,85      | 0,79  | 0,79  | 1,48  | 0,98                         |
|         |            | $S$             | 0,008     | 0,007 | 0,006 | 0,015 |                              |
| 110     | 1          | $\Delta \alpha$ | —0,06     | 3,64  | 2,04  | 0,49  | 1,53                         |
|         |            | $S$             | 0,014     | 0,062 | 0,001 | 0,003 | 1,54                         |
|         | 2          | $\Delta \alpha$ | —0,06     | 3,63  | 2,06  | 0,51  | 1,54                         |
|         |            | $S$             | 0,007     | 0,076 | 0,012 | 0,010 |                              |
| Среднее | 1          | $\Delta \alpha$ | 0,92      | 1,42  | 1,22  | 1,02  | 1,14                         |
|         | 2          | $S$             | 0,90      | 1,44  | 1,21  | 1,01  | 1,14                         |
|         | 1          | $\Delta \alpha$ | 0,012     | 0,024 | 0,005 | 0,008 | 0,012                        |
|         | 2          | $S$             | 0,006     | 0,020 | 0,009 | 0,010 | 0,011                        |

отклонения  $\Delta\alpha$ , измеренные каждым поверителем, а также средние квадратические отклонения  $S$ , характеризующие случайную погрешность каждой группы. Эти погрешности характеризуют собой случайную погрешность групп из пяти отсчетов.

Оценка СКО производилась по формуле

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta\alpha_i - \overline{\Delta\alpha})^2}, \quad (12)$$

где  $n$  — число данных в серии наблюдений;  $\Delta\alpha_i$  — результат измерения отклонения угла  $\Delta\alpha$  в  $i$ -той группе наблюдений;  $\overline{\Delta\alpha}$  — среднее арифметическое значение отклонения угла из 10 групп.

Таблица 5

Расчетные значения числа оборотов при измеренных отклонениях углов атаки лопастей и заданных скоростях

| № винта | $\Delta\alpha$ | $K_p$ | Скорость, м/с |     |       |
|---------|----------------|-------|---------------|-----|-------|
|         |                |       | 5             | 15  | 35    |
| 260     | 1°45'          | 57,47 | 287,4         | 862 | 2011  |
| 337     | 1 46           | 57,51 | 287,6         | 863 | 2013  |
| 35      | 1 50           | 57,64 | 288,2         | 865 | 2017  |
| 309     | 1 55           | 57,81 | 289,0         | 867 | 2023  |
| 110     | 2 13           | 58,43 | 292,2         | 876 | 20,45 |

Из табл. 4 следует, что во всех случаях, кроме одного (винт 110, лопасти 1 и 2), отклонения угла установки лопастей от заданного шаблоном имеют положительные значения в пределах от 0,49 до 2,04 мм, а средние отклонения четырех лопастей всех винтов имеют положительные значения, превышающие 0,95 мм. Лопасти винта 110 характеризуются большим разбросом углов их установки и одна из них (вторая) далеко выходит за допустимые значения, в связи с чем велико и СКО, полученное при измерении отклонения угла ее установки. В остальных случаях СКО групп измерения не превышают 0,018 мм.

Проведенные двумя поверителями измерения показывают, что полученные ими результаты отличаются незначительно, о чем свидетельствуют последние четыре строки табл. 4. Среднее значение полученных ими СКО не превышает 0,012 мм при среднем измеренном значении отклонения по всем измерениям, равном 1,14 мм. Отсюда относительная погрешность, обуславливаемая двойным СКО ( $2S$ ), не превышает 2% измеряемой величины или 3,5% допустимого отклонения (0,80 мм).

Из сказанного следует, что применяемый метод измерения отклонения углов установки лопастей, состоящий из пяти измерений

каждого из них, вполне обеспечивает необходимую точность таких измерений.

Полученные из проведенных измерений отклонения углов атаки установки лопастей от заданного угла с помощью шаблона позволили с достаточной точностью определить средние их значения, характеризующие исследуемые винты. Эти отклонения для винтов № 260, 337, 35, 309 и 110 соответственно составляют 0,96, 0,98, 1,06, 1,17, 1,54 мм или  $1^{\circ}45'$ ,  $1^{\circ}46'$ ,  $1^{\circ}50'$ ,  $1^{\circ}55'$ ,  $2^{\circ}13'$ .

Приведенные численные значения  $\Delta\alpha$  были использованы для расчета числа оборотов при заданных отклонениях углов атаки и скоростях воздушного потока (табл. 5).

Т а б л и ц а 6

Погрешности, обусловленные отклонениями углов атаки лопастей

| № винта                | Угол отклонения |                  | Скорость ветра, м/с |      | Погрешность, % |
|------------------------|-----------------|------------------|---------------------|------|----------------|
|                        | мм              | градусы и минуты | 15                  | 35   |                |
| 260                    | 2,20            | $1^{\circ}45'$   | 0,96                | 2,25 | 6,4            |
| 337                    | 2,22            | $1^{\circ}46'$   | 0,97                | 2,27 | 6,5            |
| 35                     | 2,30            | $1^{\circ}50'$   | 1,01                | 2,36 | 6,7            |
| 309                    | 2,41            | $1^{\circ}55'$   | 1,06                | 2,47 | 7,1            |
| 110                    | 2,78            | $2^{\circ}13'$   | 1,23                | 2,87 | 8,2            |
| Допустимая погрешность |                 |                  | 0,45                | 1,05 | 8,0            |

Число оборотов винтов после измерения отклонения углов их установки и атаки определялось в аэродинамической трубе ГГО при скоростях воздушного потока 5,15 и 35 м/с.

Винты последовательно устанавливались на преобразователь М-63М, помещенный в открытой рабочей части трубы. На каждом значении скоростей определялись средние значения числа импульсов в минуту на выходе преобразователя. Полученные при этом данные показали, что изменение числа оборотов исследуемых винтов при изменении угла атаки лопастей в пределах  $1-2^{\circ}$  незначительно.

Для выявления действительных погрешностей  $\Delta n$  исследуемых винтов при скоростях 15 и 35 м/с, выраженных в м/с, использована формула (11). Полученные данные приведены в табл. 6.

Из табл. 6 следует, что во всех случаях имеющие место погрешности по скорости более чем в 2 раза превышают допустимые. При сравнении данных, приведенных в табл. 3 и 6, получены близкие значения погрешностей при соответствующих углах атаки.

При исследовании зависимости порога чувствительности преобразователя М-63М от момента трения на осях винта были получе-

ны расчетные и экспериментальные данные с применением рабочей формулы, полученной из выражения (10) и имеющей вид

$$v_0 = 80\sqrt{M_{\text{тр}}}. \quad (13)$$

Результаты расчетов даны в табл. 7, из которой видно, что расчетные значения порога чувствительности в диапазоне 0,36—0,8 м/с соответствуют измеренным моментам трения 2—12 г·см. Измерение моментов трения осуществлялось с применением разновесов от 0,1 до 5 г, ролика диаметром 15,6 мм и пластмассовой чашки массой 2,1 г для размещения граммовых и миллиграммовых разновесов.

Таблица 7

Расчетные значения порогов чувствительности по скорости в зависимости от моментов трения

| $M_{\text{тр}}$ г·см | $v_0$ м/с | $M_{\text{тр}}$ г·см | $v_0$ м/с |
|----------------------|-----------|----------------------|-----------|
| 2                    | 0,36      | 8                    | 0,72      |
| 3                    | 0,44      | 9                    | 0,76      |
| 4                    | 0,50      | 10                   | 0,80      |
| 5                    | 0,57      | 11                   | 0,84      |
| 6                    | 0,62      | 12                   | 0,88      |
| 7                    | 0,67      |                      |           |

Моменты трения вычислялись при многократном определении массы грузов  $P$ , при которой винт начинал устойчиво вращаться, как произведение массы груза на радиус ролика

$$M_{\text{тр}} = Pr, \quad (14)$$

После этого определение порогов чувствительности преобразователей осуществлялось в аэродинамической трубе ГГО по принятой методике [4] (табл. 8).

Таблица 8

Погрешности определения порогов чувствительности преобразователей ветра М-63М-1

| № преобразователя | $v_0$ м/с | $\bar{\Delta}$ | $S$   | $S_x$ |
|-------------------|-----------|----------------|-------|-------|
| 114               | 0,38      | 0,00           | 0,024 | 0,007 |
| 214               | 0,45      | —0,01          | 0,107 | 0,032 |
| 187               | 0,52      | 0,00           | 0,036 | 0,029 |
| 35                | 0,73      | 0,01           | 0,156 | 0,047 |
| 192               | 0,98      | 0,00           | 0,009 | 0,003 |

Из табл. 8 следует, что пороги чувствительности изменяются в пределах 0,38—0,98 м/с. Требованиям технической документации отвечают преобразователи № 114, 214 и 187. Преобразователи № 35 и 192 этим требованиям не отвечают. Средние значения отклонений от средних арифметических  $\bar{\Delta}$  не превышают  $\pm 0,01$ , СКО достигают значения 0,156 при  $v_0$ , равном 0,73, и СКО среднего арифметического — 0,047.

На основании приведенных выше данных можно сделать следующие выводы:

1. Расчетные значения погрешностей числа оборотов, обусловленных отклонением угла установки лопастей от номинальных, в основном не выходят из допустимых пределов, предусматриваемых нормативно-технической документацией, что свидетельствует о правильности выбора допустимых отклонений геометрических параметров винтов.

2. Объем проведенных с помощью контршаблона измерений отклонений углов установки лопастей позволил оценить двойное СКО, которое не превысило 3,5% допустимого отклонения (0,80 мм), а также рекомендовать метод 5-кратного измерения отклонения каждой из лопастей.

3. Получена экспериментальная зависимость числа оборотов и коэффициентов винта от скорости воздушного потока и от отклонения углов атаки лопастей и углов атаки винтов.

4. В целом применение метода проверки сохранности градуировочных характеристик винта посредством определения отклонений угла установки лопастей следует считать целесообразным.

5. Расчетная зависимость порога чувствительности преобразователя по скорости от момента трения на оси винта не согласуется с экспериментальной и требует проведения дополнительной проверки.

6. Проведенные различными способами многократные измерения моментов трения на оси винта позволяют оценить среднее квадратическое отклонение, которое достигает почти 6% значения моментов трения. Для их определения при проверке преобразователя необходимо проводить не менее пяти измерений.

7. Значение допустимого момента трения, предусмотренное технической документацией, не согласуется с полученным экспериментальным значением, которое не превышает 3,5 г·см.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Протопопов Н. Г. Некоторые вопросы теории и расчеты винтовых ветрочувствительных элементов. — «Тр. ГГО», 1966, вып. 199, с. 3—32.
2. Метеорология. Термины и определения. ГОСТ 16263—70. М., Изд-во стандартов, 1972. 54 с.
3. Баханов В. Е. К вопросу поверки механических ветроизмерительных приборов. — «Тр. ГГО», 1969, вып. 240, с. 132—137.
4. Руководство по поверке метеорологических приборов. Под ред. И. А. Покровской. Л., Гидрометеиздат, 1967. 419 с.

5. Фатеев Н. П. Аппаратура для поверки метеорологических приборов. — «Тр. ГГО», 1969, вып. 240, с. 109—123.
6. Фатеев Н. П. и др. Исследование малогабаритной аэродинамической трубы для поверки анемометров. — «Тр. ГГО», 1969, вып. 260, с. 152—162.
7. Роголев Ю. В. и др. К методике поверки каналов параметров ветра станции М-106 с применением имитирующих устройств. — «Тр. ГГО», 1974, вып. 340, с. 118—129.
8. Организация и порядок проведения поверки, ревизии и экспертизы средств измерений. ГОСТ 8.002-71.
9. Шестопалов Л. А., Крайцберг А. С. Унифицированный датчик ветра. — «Тр. НИИ ГМП», 1972, вып. 26, с. 3—12.
10. Содержание и построение поверочных схем ГОСТ 8.071-73.
11. Протопопов Н. Г. Влияние моментов трения и нагрузки анемометра на точность измерения скорости ветра. — «Тр. ГГО», 1969, вып. 240, с. 77—84.

*Г. П. Резников, Ю. В. Роголев*

**ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОБОСНОВАНИЮ ВОЗМОЖНОСТИ  
ПОВЕРКИ АВТОМАТИЧЕСКИХ МЕТЕОСТАНЦИЙ  
В ЕСТЕСТВЕННЫХ УСЛОВИЯХ МЕТОДОМ  
НЕПОСРЕДСТВЕННОГО СЛИЧЕНИЯ  
(ПО КАНАЛАМ ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ  
И ТЕМПЕРАТУРЫ)**

В ранее выполненной работе была дана оценка возможных путей проведения в естественных условиях поверки средств измерения метеоэлементов и выявлены условия предотвращения погрешностей при использовании в этом случае метода непосредственного сличения. Показано, что корректированием функции динамического преобразования одного из сличаемых средств измерения ее с функцией динамического преобразования другого можно исключить влияние динамических погрешностей на результат сличения, независимо от характера изменения метеоэлемента.

В основу образцовых средств измерения с корректируемой функцией динамического преобразования целесообразно положить существующие образцовые средства измерения. Возможные технические способы корректирования функции динамического преобразования обсуждаются в [1]. Одним из таких способов является установка перед чувствительным элементом своего рода физического фильтра колебаний (демпфера).

Динамические свойства первичных измерительных преобразователей влажности воздуха (ИПВ) и температуры (ИПТ) в первом приближении могут быть описаны линейным дифференциальным уравнением первого порядка [2], т. е. представляют собой апериодические звенья первого порядка, характеризующиеся постоянной времени (коэффициентом инерции). Для выполнения условия совпадения функций динамического преобразования поверяемого преобразователя и образцового средства измерения необходимо, следовательно, предусмотреть такую конструкцию демпфера, которая бы совместно с чувствительным элементом образцового средства измерения позволяла изменять постоянную времени до значения постоян-

ной времени соответствующего поверяемого измерительного преобразователя.

Принимаемая динамическая модель преобразователей в виде апериодического звена является идеализацией, поскольку очевидно, что поверяемое и образцовое средства относятся реально к классу нелинейных нестационарных преобразователей с распределенными параметрами. Аналитическое описание динамических свойств последних дается нелинейными дифференциальными уравнениями в частных производных выше первого порядка. Однако использованная идеализация допустима, так как назначение этой модели — ориентировочная оценка средних значений параметров образцового средства измерения с регулируемой функцией динамического преобразования, а более точное совмещение этих параметров с параметрами динамической характеристики поверяемого измерительного преобразователя неизбежно должно производится экспериментальным путем.

При совпадающих динамических характеристиках образцового и поверяемого средств измерения реакции их на входное воздействие, имеющее любую форму, должны быть идентичными. Отсюда вытекает методика экспериментального совмещения функций динамического преобразования, которая заключается в изменении регулируемых параметров демпфирующего устройства до максимального совпадения реакций преобразователей при одном и том же входном воздействии.

Ниже описываются эксперименты по изучению образцовых средств измерения влажности и температуры воздуха, имеющих регулируемую функцию динамического преобразования, и сравниваются результаты сличений с ними первичных измерительных преобразователей этих величин в естественных и лабораторных условиях.

Основой поверяемого первичного измерительного преобразователя влажности воздуха служит хлористолитиевый подогревный влажочувствительный элемент, в котором температура насыщенного раствора хлористого лития, находящегося в динамическом равновесии с влагой воздуха, измеряется платиновым термометром сопротивления. Время переходного процесса преобразователя при положительных значениях температуры анализируемого воздуха составляет около 4 мин и возрастает до больших значений при отрицательной температуре. В сравнении с образцовым гигрометром точки росы он является намного более инерционным. Отсюда следует, что при корректировании функции динамического преобразования образцового средства измерения влажности (ОСИВ) постоянную времени демпфирующего устройства необходимо увеличивать. Демпфер ОСИВ содержит резервуар с входным и выходным патрубками. Выходной патрубок присоединен к штуцеру гигрометра точки росы. Элементы демпфера изготовлены из стекла, вакуумной резины и нержавеющей стали, которые слабо сорбируют влагу на своей поверхности. Для исключения возможного влияния частиц,

сорбирующих и десорбирующих влагу, внутренние поверхности демпфера промывались и высушивались.

Постоянная времени демпфера, определенная из решения дифференциального уравнения, прямо пропорциональна его объему и длине патрубков и обратно пропорциональна сечению патрубков и скорости потока.

При исследованиях использовались гигростат ПО-34 с установленным в нем психрометром, гигрометры точки росы типа М-116 № 810 и 817, разработанные в ГГО. Измерения сопротивлений термисторов гигрометров производились с помощью мостов типа Р-329 класса 0,05 и гальванометров типа М-198/1 в качестве нуль-индикаторов с ценой деления  $10^{-8}$  А.

При сличениях приборов с помощью таблиц отыскивались по измеренным сопротивлениям значения температуры точки росы  $\tau_{810}$  и  $\tau_{817}$  и вычислялись средние значения  $\bar{\Delta}$  разностей измеренных значений точки росы при сличениях и средние квадратические отклонения  $\sigma$  от  $\bar{\Delta}$ . Результаты наблюдений объединялись в серии по 7—8 отсчетов в каждой и всего было проведено около 300 сличений.

В первом из экспериментов ставилась цель убедиться в том, что введение демпфера в тракт измерения не приводит к дополнительной систематической погрешности. С этой целью предварительно сличались два гигрометра (№ 810 и 817) без демпфера в гигростате и определялось среднее значение разностей показаний. В этом эксперименте среднее значение разности показаний составило  $\bar{\Delta} = \tau_{810} - \tau_{817} = 0,13^\circ\text{C}$  при  $\sigma = 0,04^\circ\text{C}$ . Затем № 817 демпфировался, и все дальнейшие сличения производились с гигрометрами, один из которых (№ 810) оставался недемпфированным. В результате сличений выявлено, что  $\bar{\Delta}$  осталась почти неизменной в пределах погрешностей эксперимента и составила  $0,16^\circ\text{C}$  при  $\sigma = 0,20^\circ\text{C}$ . Аналогичными оказались результаты и в других сериях этого эксперимента.

Таким образом, выяснилось, что введение демпфера не приводит к появлению систематической погрешности гигрометра при неизменном во времени среднем значении влажности анализируемого воздуха.

Следует обратить внимание на то, что среднее квадратическое отклонение разностей от средней в случае, когда сличается демпфированный гигрометр с недемпфированным, значительно больше по сравнению со случаем, когда сличаемые гигрометры оба недемпфированные. Объяснение этого основано на том, что в первом случае динамические характеристики гигрометров отличаются, тогда как они одинаковы во втором. Поэтому реакции гигрометров на флуктуации влажности в гигростате относительно заданного среднего значения различаются в первом случае и не различаются во втором.

Следующий эксперимент сводился к изучению фильтрующих свойств демпфированного гигрометра по сравнению с недемпфированным в условиях повышенной стабильности среднего значения температуры точки росы в гигростате при наличии флуктуаций вследствие процесса регулирования. По результатам одновременных от-

счетов были определены средние значения точки росы по каждому из гигрометров и средние квадратические отклонения от средних. Из сравнения численных оценок средних квадратических отклонений от средних значений, определенных по каждому из гигрометров, получено  $\sigma_{817}(0,05^{\circ}\text{C}) < \sigma_{810}(0,13^{\circ}\text{C})$ , чего и следовало ожидать.

Вышеописанные эксперименты доказывают, во-первых, что введение демпфера не приводит к дополнительной систематической погрешности, и, во-вторых, что демпфер действительно сглаживает и фильтрует высокочастотные составляющие пульсаций и флуктуаций.

Для экспериментального совмещения динамической характеристики ОСИВ с динамической характеристикой измерительного преобразователя влажности можно было бы в качестве испытательных сигналов подавать на входы ИПВ и ОСИВ импульс значения температуры точки росы или парциального давления водяного пара. Однако ввиду того, что используемый в составе ОСИВ гигрометр точки росы содержит преобразователь температуры в сопротивление, имеющий нелинейную статическую характеристику (термистор), усложняется регистрация реакции (запись переходной или импульсной переходной характеристики). Кроме того, воспроизводимость скачка или импульса парциального давления пара не обеспечивалась имевшейся в распоряжении аппаратурой. Можно, однако, воспользоваться тем, что в гигростате ПО-34 предусмотрена возможность программного задания влажности по любому закону, в том числе по линейному.

Среднее значение разности результатов измерений по двум сличаемым приборам ИПВ и ОСИВ представляет собой сумму двух слагаемых. Первое из этих слагаемых — разность статических погрешностей, а второе — разность динамических погрешностей. Принимая во внимание, что второе слагаемое может оказаться равным нулю в случае совпадения динамических характеристик сличаемых приборов, можно, задавая изменение влажности по линейному закону [3], воздействием на объем и сечение демпфера ОСИВ достичь того, что среднее значение разности результатов по ИПВ и ОСИВ в этом режиме будет равно среднему значению, предварительно определенному в стационарном режиме. Это в свою очередь свидетельствует о совпадении их динамических характеристик.

В соответствии с этим методом определялась средняя разность и среднеквадратическое отклонение сличением демпфированного № 817 (объем демпфера 10 л) и недемпфированного № 810 гигрометров. Получено, что при отсутствии изменения влажности среднее арифметическое разностей  $\Delta = 0,22^{\circ}\text{C}$  при  $\sigma = 0,12^{\circ}\text{C}$ . Тогда как при наличии линейного хода (точка росы уменьшалась во времени по приблизительно линейному закону)  $\bar{\Delta} = -1,05^{\circ}\text{C}$ ,  $\sigma = 0,21^{\circ}\text{C}$ . Таким образом, если пренебречь малой инерционностью недемпфированного гигрометра по сравнению с демпфированным, можно считать, что динамическая погрешность демпфированного гигрометра составляет по абсолютной величине  $1,27^{\circ}\text{C}$ , т. е.  $0,22^{\circ}\text{C} - (-1,05^{\circ}\text{C})$ . Скорость изменения точки росы составляла  $0,11^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ . Исходя из того что

в этом случае динамическая погрешность равна произведению коэффициента инерции на скорость изменения величины, можно оценить коэффициент инерции демпфированного гигрометра, который оказался равным 11,5 мин. Это дает представление о связи между физическими параметрами демпфера и инерционностью демпфированного гигрометра.

Увеличение  $\sigma$  от 0,12°C в стационарном режиме до 0,21°C при изменении влажности по линейному закону объясняется также различием динамических характеристик сличаемых гигрометров и связано с усилением флуктуаций влажности при ее программном задании, а также с неполным соответствием закона регулирования линейному и с трудностью отсчета по недемпфированному гигрометру значений величины, меняющейся со скоростью, сравнимой с временем отсчета.

Различие значений  $\sigma$  в этих экспериментах служит еще одной иллюстрацией характера реакции двух однотипных приборов, отличающихся лишь динамическими характеристиками, на величину, изменение которой во времени подчинено сложному закону. Можно заметить, что такое соотношение между значениями  $\sigma$  сохраняется и в двух последующих экспериментах. В первом из этих экспериментов определялась степень изменения динамической характеристики за счет изменения объема демпфера (от 10 до 3 л), а во втором — за счет изменения сечения патрубка. Динамическая погрешность демпфированного гигрометра теперь составила 0,34°C при скорости изменения точки росы 0,074°C/мин, откуда коэффициент инерции демпфированного гигрометра равен 4,6 мин.

Поскольку зависимость между коэффициентом инерции и объемом демпфера линейная, то можно оценить количественно эту связь (при фиксированных значениях скорости потока и сечения патрубка), используя ее в дальнейшем как параметр градуировочной характеристики демпфера. Отношение полученного в эксперименте изменения коэффициента инерции к изменению объема равно 1 мин/л, т. е. изменению объема демпфера на 1 л соответствует изменение коэффициента инерции на 1 мин.

Из экспериментальных данных можно определить, в какой мере изменяется коэффициент инерции за счет изменения сечения патрубка при сохранении значений скорости потока и объема демпфера прежними. Уменьшение сечения привело к увеличению динамической ошибки демпфированного гигрометра. Ее значение составило 0,56°C. Следовательно, учитывая скорость уменьшения точки росы (0,083°C/мин), можно определить, что коэффициент инерции равен 6,6 мин, т. е. увеличился на 2 мин (6,6—4,6 мин).

Этими экспериментами доказывается, что возможности регулирования динамических свойств гигрометра с демпфером (ОСИВ) неограниченны как при ступенчатом, так и при плавном способах изменения. Полученные в предыдущих экспериментах сведения о возможностях регулирования динамических свойств демпфированного гигрометра точки росы позволили перейти к необходимому экспериментальному совмещению динамических характеристик

ИПВ и ОСИВ. С этой целью, предварительно несколько уменьшив инерцию ОСИВ (за счет некоторого увеличения сечения выходного патрубка демпфера) и, как в предыдущих экспериментах, задавая линейный закон изменения влажности в камере, производили сличения гигрометров № 810, № 817 (ОСИВ) и ИПВ. Из результатов сличений выяснилось, что средние значения разностей отличаются друг от друга вследствие различной инерционности сличаемых средств измерения. Сличение тех же приборов в условиях неизменной влажности, показывает, что по № 810 и ИПВ  $\bar{\Delta} = 0,08^{\circ}\text{C}$ , а по № 817 и ИПВ  $\bar{\Delta} = -0,07^{\circ}\text{C}$ .

Из сопоставления значения  $\bar{\Delta}$  в динамическом режиме при линейно изменяющейся влажности со значением ее в статическом режиме видно, что инерционность демпфированного гигрометра № 817 несколько больше, чем у ИПВ, так как в динамическом режиме  $\bar{\Delta} = +0,04^{\circ}\text{C}$  (при идентичных динамических характеристиках в динамическом режиме  $\bar{\Delta}$  должно быть равно  $-0,07^{\circ}\text{C}$ ). Поэтому инерционность ОСИВ была уменьшена путем еще большего увеличения сечения патрубка и проведена новая серия сличений.

Средняя разность значений точки росы по ОСИВ и ИПВ в динамическом режиме теперь составила  $-0,11^{\circ}\text{C}$ . В пределах погрешности измерений это значение можно считать достаточно близким к среднему значению разности в статическом режиме, а функции динамического преобразования, следовательно, одинаковыми.

Следующий, последний эксперимент был поставлен с целью прямого доказательства, что в случае идентичных динамических характеристик поверяемого и образцового средств измерения средняя разность результатов измерения одной и той же величины не зависит от характера ее изменения во времени, который в общем случае может определяться случайным нестационарным процессом. Иначе говоря, значение этой разности остается неизменным при статическом и динамическом режимах сличений.

ИПВ, ОСИВ и гигрометр № 810 находились в естественных условиях и сличались между собой. Из наблюдений следует, что за 2 часа точка росы изменилась на  $1^{\circ}\text{C}$  (увеличилась), монотонно меняя значения и испытывая флуктуации. Среднее значение разности результатов измерений по № 810 и ИПВ составило  $-0,14^{\circ}\text{C}$  при  $\sigma = 0,18^{\circ}\text{C}$ , т. е. это среднее сильно отличается от средней разности в статическом режиме ( $+0,08^{\circ}\text{C}$ ). При этом  $\sigma = 0,18^{\circ}\text{C}$ . Среднее же значение разности результатов синхронных измерений ОСИВ и ИПВ  $\bar{\Delta} = -0,12^{\circ}\text{C}$ , что совпадает в пределах ошибок определения со значением этой разности в статическом режиме ( $\bar{\Delta} = -0,07^{\circ}\text{C}$ ) при  $\sigma = 0,11^{\circ}\text{C}$ .

Таким образом, если среднее значение разности результатов сличений ОСИВ и ИПВ в статическом режиме принимать за меру точности ИПВ, то последним экспериментом доказано, что при указанных условиях она может быть с той же надежностью определена в естественных условиях на месте эксплуатации ИПВ.

Первичный измерительный преобразователь температуры воздуха (ИПТ) представляет собой аспирируемый с двойной радиационной защитой платиновый термометр сопротивления. Время переходного процесса, согласно документации, составляет 9 минут, что намного больше времени переходного процесса (15 секунд) платинового термометра сопротивления ТСПН-1, примененного в качестве чувствительного элемента в исследуемом ниже образцовом средстве измерения температуры (ОСИТ). Отсюда следует, что при корректировании функции динамического преобразования ОСИТ постоянную времени (коэффициент инерции) его необходимо увеличивать.

Реально коэффициент инерции термометра или ИПТ представляет собой величину сложной структуры. Однако для оценок в первом приближении считают, что при кондуктивно-конвективном теплообмене коэффициент инерции прямо пропорционален массе и удельной теплоемкости и обратно пропорционален площади теплообмена и коэффициенту теплообмена. Последний зависит не только от свойств поверхности теплообмена, но и ряда других факторов (скорости потока, степени турбулентности, вязкости и т. д.), связанных между собой несколькими критериями  $Nu$ ,  $Gr$ ,  $Re$ ,  $Pr$  и др. [4]. Каждая из величин, определяющих коэффициент инерции, может быть использована для изменения этого коэффициента. В частности, увеличением площади теплообмена можно его уменьшать, а увеличением массы — увеличивать. Очевидно, что сложность зависимости коэффициента теплообмена от других величин, его относительная неустойчивость и, что главное, технические трудности, связанные с реализацией этих зависимостей, не позволяют воспользоваться им для направленного изменения коэффициента инерции. Такое сопоставление возможностей приводит к решению выполнить ОСИТ как малоинерционный платиновый терморезистор, находящийся в тепловом контакте с другим узлом переменной массы, который, по существу, выполняет роль демпфера и выполнен в виде объема с жидкостью.

Определение реакций ИПТ и ОСИТ производилось по записи на самописце воздействием на них теплового импульса или скачка.

Выходы ИПТ и ОСИТ последовательно подключались к клеммам «Х» моста Р-329, а с клемм его «Г» напряжение подавалось на самописец ПСР-1. Чувствительность ИПТ составляет  $2 \text{ Ом}/^\circ\text{C}$ , а ОСИТ  $0,2 \text{ Ом}/^\circ\text{C}$  (сопротивление их чувствительных элементов соответственно 500 и 50 Ом при  $0^\circ\text{C}$ ). Чтобы можно было произвести сравнение реакций в графической форме, т. е. чтобы независимо от сопротивления чувствительного элемента одному и тому же изменению температуры соответствовало одно и то же перемещение каретки потенциометра, на мосте устанавливалось отношение постоянных плеч  $1000 : 1000$  при подключении ИПТ и  $100 : 100$  при подключении ОСИТ. Подбором напряжения на клеммах моста «Б» (около 1,3 В) устанавливается масштаб записи —  $1 \text{ мВ}/^\circ\text{C} = 10 \text{ дел}/^\circ\text{C}$  (всей шкале самописца соответствует напряжение 10 мВ). Скорость перемещения ленты выбрана  $360 \text{ мм}/\text{ч} = 6 \text{ мм}/\text{мин}$ .

Тепловой импульс или скачок создавался перемещением измерительного преобразователя из воздушного объема с установившейся температурой в другой воздушный объем с установившейся, но более высокой температурой.

Длительность тепловых импульсов составляла 10 сек, амплитуда  $50^{\circ}\text{C}$ , амплитуда скачка температуры — около  $3^{\circ}\text{C}$ . Время установления показаний для исследуемых измерительных преобразовате-

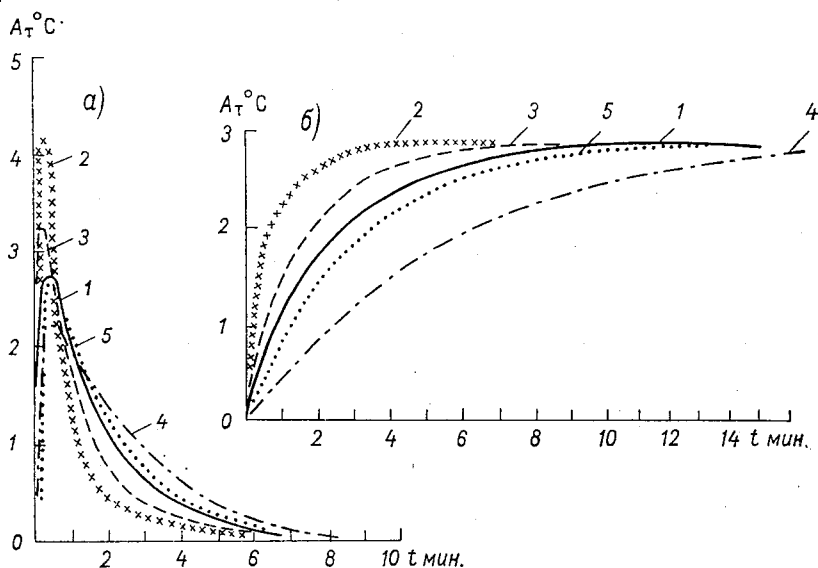


Рис. 1. Импульсная (а) и переходная (б) динамические характеристики ИПТ и ОСИТ при амплитуде испытательного импульса  $A_{\text{ти}}=50^{\circ}\text{C}$  и длительности его  $\Delta t=10$  с.

1 — ИПТ, 2 — ОСИТ незаполненный, 3 — ОСИТ, заполненный на 0,5 объема спиртом, 4 — ОСИТ, заполненный водой, 5 — ОСИТ, заполненный 70%-ным водным раствором глицерина.

лей составляет несколько минут, а время пробега кареткой самописца всей шкалы, согласно описанию, — не более 10 сек, поэтому влияние динамических свойств самописца на результат регистрации пренебрежимо мало.

На рис. 1 представлены результаты экспериментов в виде кривых, перенесенных с ленты самописца на миллиметровую бумагу. Вначале снимались импульсная и переходная характеристики ИПТ станции и ОСИТ без заполнения жидкостью. Из рисунка видно, насколько сильно кривые отличаются друг от друга. Затем резервуар ОСИТ заполнялся жидкостью до уровня, при котором снимаемая характеристика в наибольшей степени приближалась к характеристике ИПТ. Характеристики ИПТ копировались с ленты на кальку, которая затем накладывалась для сравнения на записанную характеристику ОСИТ.

Как и ожидалось, меняя количество жидкости, хотя и можно добиться уравнивания времени переходного процесса ИПТ и ОСИТ, полное совмещение характеристик возможно не при любой жидкости. Это связано с тем, что динамические свойства измерительного преобразователя такой конструкции определяются не только массой и удельной теплоемкостью жидкости, а и коэффициентами теплопередачи (как функции коэффициента теплопроводности) и температуропроводности, так как последний определяет скорость распространения температурной волны при одних и тех же прочих параметрах термометра. Определение наилучшей жидкости в смысле наибольшего совпадения динамических характеристик производилось экспериментально. В качестве жидкостей использовались вода, спирт и 70%-ный водный раствор глицерина (температура замерзания  $-39^{\circ}\text{C}$ ).

Результаты записи динамических характеристик наглядно иллюстрирует их зависимость от вида использованных жидкостей при одном и том же их объемном количестве—0,5 от максимального объема резервуара (см. рис. 1). Как видно из записи динамических характеристик, в наибольшей степени вид импульсной переходной характеристики ИПТ приближается к виду соответствующих характеристик ОСИТ при использовании в нем водного раствора глицерина. Некоторое уменьшение количества водного раствора глицерина в резервуаре ОСИТ привело к полному (в пределах погрешности эксперимента) совмещению динамических характеристик ИПТ и ОСИТ.

Таким образом, показана возможность экспериментального отождествления динамических характеристик ОСИТ и ИПТ.

Следующая группа экспериментов посвящена прямому доказательству того, что результаты сличений ИПТ и ОСИТ в естественных условиях не отличаются от результатов сличений существующими методами, если соблюдены вышеуказанные требования.

В качестве вторичного ИП для измерительного преобразователя температуры использовалось центральное устройство (ЦУ) станции М-106М, а для образцового измерительного преобразователя температуры — потенциометр Р-307 с нормируемой погрешностью класса 0,015 и образцовая катушка сопротивления Р-333 класса 0,01 с номинальным сопротивлением 100 Ом. Нуль-индикатором служил микроампервольтметр типа М-193 с ценой деления  $10^{-8}$  А.

Эксперименту по определению погрешности в естественных условиях предшествовало определение погрешности ИПТ по существующей методике, т. е. сличением чувствительного элемента поверяемого измерительного преобразователя с чувствительным элементом образцового средства измерения в жидкостном термостате при стабильных значениях температуры в нем. Из результатов обработки видно, что среднее значение разности показаний ИПТ и ОСИТ  $\bar{\Delta} = -0,1^{\circ}\text{C}$  при СКО  $\sigma = 0,02^{\circ}\text{C}$  (следует заметить, что в этом эксперименте в качестве вторичного ИП для ИПТ, в отличие от всех последующих, вместо ЦУ станции использовался потенциометр, что и привело к уменьшению погрешности).

Далее, естественно, нужно было провести сличения ИПТ с некорректированным ОСИТ в воздухе. Из этих сличений следует, что  $\bar{\Delta}=0,39^{\circ}\text{C}$  при  $\sigma=0,12^{\circ}\text{C}$  и  $\bar{\Delta}=0,26^{\circ}\text{C}$  при  $\sigma=0,18^{\circ}\text{C}$ . Существенное отличие  $\bar{\Delta}$  от установленного значения в предыдущем эксперименте связано, с одной стороны, с большим различием динамических характеристик ИПТ и ОСИТ и, с другой,— с наличием монотонного изменения температуры воздуха в помещении, а большее значение  $\sigma$  обусловлено, кроме первой причины, случайными колебаниями температуры.

Затем ранее описанным способом корректировалась функция динамического преобразования заполнением объема ОСИТ наполовину раствором глицерина в воде, и предыдущий эксперимент повторялся. Результаты этого эксперимента:  $\bar{\Delta}=0,12^{\circ}\text{C}$  при  $\sigma=0,07^{\circ}\text{C}$  и  $\bar{\Delta}=0,21^{\circ}\text{C}$  при  $\sigma=0,05^{\circ}\text{C}$ . Как видно,  $\sigma$  сильно уменьшилась, уменьшилось также значение  $\bar{\Delta}$ , не достигнув, однако, значения  $\bar{\Delta}$  при сличениях в жидкости. Предполагается, что это связано с пространственной неоднородностью температуры. Для проверки этого на расстоянии 5 м от сличаемых преобразователей устанавливался вентилятор, поток от которого направлялся в их сторону. Результаты сличений подтвердили правильность предположения:  $\bar{\Delta}=0,00^{\circ}\text{C}$  при  $\sigma=0,07^{\circ}\text{C}$ .

После этих предварительных экспериментов ИПТ и ОСИТ были размещены в радиационной защите и установлены в естественных условиях. Сличения производились на протяжении всего дня, при этом отмечались погодные условия. Из анализа пяти серий по восемь отсчетов в каждой следует, что наиболее часто встречаются значения  $\bar{\Delta}=-0,05^{\circ}\text{C}$  и  $\sigma=0,07^{\circ}\text{C}$ , а наибольшие значения  $\bar{\Delta}=-0,09^{\circ}\text{C}$  и  $\sigma=0,14^{\circ}\text{C}$  (в первой серии), при этом не выявлено связи их с характером погоды. Анализ поведения значения разностей отдельных отсчетов не обнаруживает какого-либо закономерного изменения в течение дня. Таким образом, результат поверки в естественных условиях совпадает с результатом поверки по установленной методике, о причине же больших значений  $\bar{\Delta}$  уже говорилось выше.

Проверка показала, что эти серии принадлежат к одной статистической совокупности, а выводы по такой совокупности обладают большей статистической надежностью, в частности, разность между результатами измерений ИПТ и ОСИТ лишь в трех случаях достигла предельного значения  $0,3^{\circ}\text{C}$ . Это служит основой для рекомендаций при дальнейшем использовании методики.

Таким образом, экспериментально подтверждена возможность корректирования функций динамического преобразования образцовых средств измерения (без нарушения их статических метрологических качеств) до совпадения с функцией динамического преобразования поверяемого средства измерения.

Экспериментально также подтверждено, что, когда удовлетворяется это требование, результаты сличений ИПВ с ОСИВ и ИПТ

с ОСИТ, проведенных в естественной среде при произвольном характере изменения величины, не отличаются от результатов, полученных в лабораторных условиях.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Резников Г. П., Рогалев Ю. В. Гигрометр точки росы для проверки средств измерения влажности воздуха. Авт. свид. № 530300. — Бюлл. откр., изобр., промышл. образцов и товарных знаков, 1976, № 36, с. 111.
2. Шендерович И. М. Анализ динамических характеристик метеорологических датчиков. — «Тр. НИИГМП», 1973, вып. 29, с. 79—88.
3. Резников Г. П. Динамический режим проверки первичных измерительных преобразователей с большой постоянной времени. — «Тр. ГГО», 1972, вып. 280, с. 82—85.
4. Ярышев Н. А. Теоретические основы измерения нестационарных температур. Л., «Энергия», 1967. 299 с.

*Л. И. Леонова, Ю. В. Рогалев,  
Н. П. Фатеев*

## **МЕТОДИКА КОНТРОЛЯ СОХРАННОСТИ ГРАДУИРОВОЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ МЕТЕОСТАНЦИИ**

При метрологическом обслуживании автоматических метеорологических станций производится комплексная и поэлементная поверка по всем измерительным каналам на стационарном поверочном оборудовании [1, 2, 3]. Более эффективной является поверка с применением подвижной поверочной лаборатории (ППЛ), укомплектованной портативным контрольно-поверочным оборудованием и вспомогательными приспособлениями [2]. В предлагаемой статье рассматривается возможность контроля сохранности градуировочной характеристики измерительных преобразователей (ИП) температуры автоматических метеостанций (АМС) в одной точке с использованием жидкостной термостатированной среды.

В качестве ИП температуры в станциях М-106М используются платиновые термометры сопротивления ПТС-500, которые работают в диапазоне от  $-60$  до  $+50^{\circ}\text{C}$ . Предел допускаемой погрешности ПТС-500 в указанном диапазоне по каналу в целом составляет  $\Delta_{\text{д.к}} = \pm 0,25^{\circ}\text{C}$ . Для чувствительного элемента ИП эта величина не превышает  $\Delta_{\text{д.ип}} = \pm 0,15^{\circ}\text{C}$ .

В соответствии с Положением о Международной практической температурной шкале (МПТШ) [4, 5], поверка ПТС осуществляется по четырем реперным точкам, что требует сложной и громоздкой контрольно-измерительной аппаратуры.

В работе [6] для диапазона температур  $\pm 60^{\circ}\text{C}$  показана возможность ограничить число точек поверки до двух ( $0$  и  $100^{\circ}\text{C}$ ) и дан расчет погрешности градуировки по двум точкам. Для воспроизведения двух реперных точек необходимы специальные термостаты (термостат точки  $0^{\circ}\text{C}$  и термостат точки  $100^{\circ}\text{C}$ ), которые разместить

в ППЛ не представляется возможным, а для измерения электрического сопротивления термометров требуется аппаратура с высокой чувствительностью, создание надлежащих температурных условий, а главное разборка ИП температуры.

Поверку по двум реперным точкам целесообразно осуществлять при первичной поверке и в случае ремонта ИП станции.

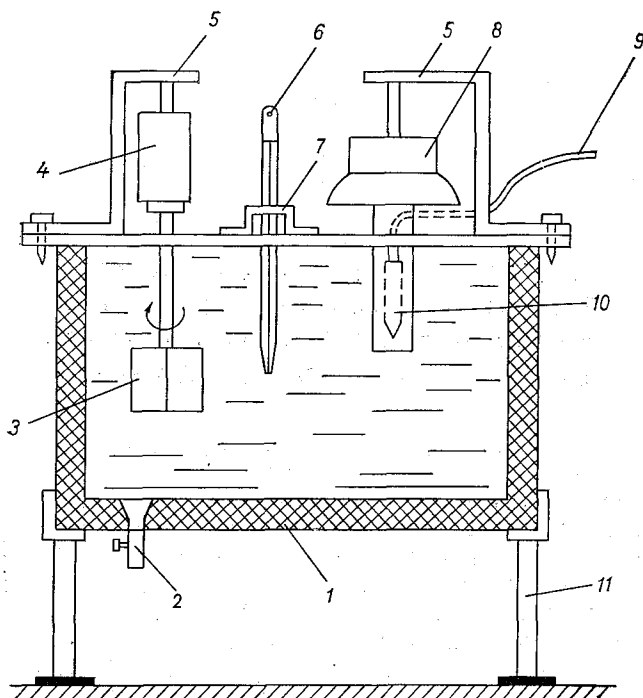


Рис. 1. Общий вид жидкостной термованны с размещенными в ней образцовыми и поверяемыми средствами измерения температуры.

1 — термостатированные стенки, 2 — сливной кран, 3 — лопасти перемешивания жидкости, 4 — электродвигатель, 5 — кронштейны, 6 — образцовый термометр, 7 — втулка крепления термометра, 8 — ИП температуры станции, 9 — соединительный кабель, 10 — ПТС-500, 11 — стойки.

При периодической проверке сохранности градуировочной характеристики канала измерения температуры на месте эксплуатации можно, не нарушая конструкции ИП, помещать его целиком в термостатированную среду комнатной температуры. В качестве поверочного оборудования можно рекомендовать жидкостную ванну с теплоизолированными стенками и с перемешиванием жидкости

в ней с помощью электродвигателя (рис. 1). В качестве образцового прибора можно использовать ртутный термометр ТЛ-4 (ГОСТ 215-73). В этом случае, однако, возникает задача о правомерности распространения результата поверки в одной точке по всему диапазону измерения температуры.

Ниже будет показано, что результаты поверки в одной точке измеряемого диапазона температуры могут быть использованы для оценки погрешности во всем диапазоне.

Оптимальное число точек поверки обычно выбирается таким, чтобы можно было достоверно определить систематическую составляющую погрешности и установить поправки термометра во всем диапазоне измерений. При поверке на ограниченном числе точек результаты поверки приходится экстраполировать на весь диапазон. Для ПТС-500 поверка в одной точке может быть применена при условии достаточной стабильности чувствительного элемента. В ПТС она определяется постоянством во времени значения  $R_0$  и  $R_{100}$ . Результаты поверки в одной точке можно использовать, если смещение градуировочной характеристики ИП со временем, относительно первоначальной градуировки, происходит по известному закону (например, параллельное смещение).

Были проведены исследования по определению временного смещения градуировочных характеристик вида  $R_t=f(t)$  термометров ПТС-500. Сравнивались характеристики градуировки 1975 и 1970 гг., выполненные в ГГО и на Рижском заводе ГМП. Градуировка ПТС-500 осуществлялась в двух реперных точках, 0 и 100°C. Затем для каждого термометра рассчитывалась градуировочная характеристика  $R_t=f(t)$  в диапазоне температур от -60 до 50°C. Расхождения  $\Delta R$  и  $\Delta t$  между двумя градуировками ИП температуры воздуха через 10°C представлены в табл. 1. Данные табл. 1 показывают, что за 5 лет все точки градуировочной характеристики ПТС-500 сместились параллельно градуировке 1970 г. на значения от 0,06 до 0,08°C (в среднем  $\bar{\Delta t}=0,07^\circ\text{C}$ ) для ПТС-500 № 30, от -0,08 до -0,13°C (в среднем  $\bar{\Delta t}=0,11^\circ\text{C}$ ) для ПТС-500 № 44 и от -0,05 до -0,06°C (в среднем  $\bar{\Delta t}=0,05^\circ\text{C}$ ) для ПТС-500 № 4. Это дает возможность проверять сохранность градуировочной характеристики канала измерения температуры воздуха по одной из точек диапазона измерения.

Для проверки выбранной методики ИП станции помещался в жидкостную ванну и сличался с образцовым термометром. В качестве последнего был выбран ртутный лабораторный термометр ТЛ-4 с пределом допускаемой погрешности, равным  $\pm 0,1^\circ\text{C}$ . Соотношение погрешностей образцового термометра и поверяемого ИП составило 1 : 2,5.

Для ИП № 44 было проделано 30 сличений. Для измерения сопротивления термометров в одном случае использовалась компенсационная схема с потенциометром Р-307, в другом — отсчеты температуры снимались с центрального устройства станции. Вентиля-

Значения расхождений  $\Delta R$  и  $\Delta t$  между градуировками

| Год градуировки ПТС        | Диапазон температур, °С |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|----------------------------|-------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                            | -60                     | -50    | -40    | -30    | -20    | -10    | 0      | 10     | 20     | 30     | 40     | 50     |
| ПТС-500 № 30               |                         |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| 1970 г.                    | 379,45                  | 399,70 | 419,85 | 439,95 | 460,05 | 480,10 | 500,00 | 519,90 | 539,70 | 559,50 | 579,20 | 598,90 |
| 1975 г.                    | 379,29                  | 399,53 | 419,68 | 439,82 | 459,87 | 479,91 | 499,85 | 519,75 | 539,59 | 559,34 | 579,08 | 598,78 |
| $\Delta R$ Ом              | +0,16                   | +0,17  | +0,17  | +0,13  | +0,18  | +0,19  | +0,15  | +0,15  | +0,11  | +0,16  | +0,12  | +0,12  |
| $\Delta t^{\circ}\text{C}$ | +0,08                   | +0,08  | +0,08  | +0,07  | +0,09  | +0,09  | +0,08  | +0,08  | +0,06  | +0,08  | +0,06  | +0,06  |
| ПТС-500 № 44               |                         |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| 1970 г.                    | 379,41                  | 399,65 | 419,80 | 439,90 | 460,00 | 480,04 | 499,94 | 519,84 | 539,64 | 559,44 | 579,13 | 598,83 |
| 1975 г.                    | 379,57                  | 399,83 | 419,99 | 440,09 | 460,20 | 480,26 | 500,16 | 520,07 | 539,88 | 559,68 | 579,39 | 599,09 |
| $\Delta R$ Ом              | -0,16                   | -0,18  | -0,19  | -0,19  | -0,20  | -0,22  | -0,22  | -0,23  | -0,24  | -0,24  | -0,26  | -0,26  |
| $\Delta t^{\circ}\text{C}$ | -0,08                   | -0,09  | -0,10  | -0,10  | -0,10  | -0,11  | -0,11  | -0,12  | -0,12  | -0,12  | -0,13  | -0,13  |
| ПТС-500 № 4                |                         |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| 1973 г.                    | 379,46                  | 399,66 | 419,81 | 439,96 | 460,00 | 480,05 | 499,95 | 519,80 | 539,65 | 559,39 | 579,14 | 598,79 |
| 1976 г.                    | 379,55                  | 399,75 | 419,90 | 440,05 | 460,11 | 480,16 | 500,06 | 519,91 | 539,76 | 559,52 | 579,27 | 598,92 |
| $\Delta R$ Ом              | -0,09                   | -0,09  | -0,09  | -0,09  | -0,11  | -0,11  | -0,11  | -0,11  | -0,11  | -0,13  | -0,13  | -0,13  |
| $\Delta t^{\circ}\text{C}$ | -0,05                   | -0,05  | -0,05  | -0,05  | -0,06  | -0,06  | -0,06  | -0,06  | -0,06  | -0,06  | -0,06  | -0,06  |

ция ИП температуры при этом была отключена. Полученные результаты сличений обрабатывались по формуле [8]

$$S(\Delta) = \sqrt{\frac{\sum (x_{ij} - \bar{x}_i)^2}{n-1}}, \quad (1)$$

где  $n$  — число отсчетов в серии.

Значения температуры в первом случае определялись по градуировке термометров 1970 г. Результаты обработки представлены в табл. 2. Расчет погрешности по каналу станции в целом осуществлялся по формуле

$$\Delta_{\text{д.к}} = \pm [2S(\Delta) + |\Delta_{\text{с}}|], \quad (2)$$

где  $S(\Delta)$  — случайная составляющая погрешности,  $\Delta_{\text{с}}$  — систематическая составляющая погрешности.

Таблица 2

Экспериментальные значения метрологических параметров  
на выходе канала измерения температуры воздуха

| Выход канала | Метрологический параметр |             |              |                                               |
|--------------|--------------------------|-------------|--------------|-----------------------------------------------|
|              | $\Delta_{\text{с}}$      | $S(\Delta)$ | $2S(\Delta)$ | $\Delta_{\text{д.к}} \text{ } ^\circ\text{C}$ |
| РТА          | 0,00                     | 0,10        | 0,20         | 0,20                                          |
| Р-307        | —0,16                    | 0,01        | 0,02         | 0,18                                          |

Как видно из табл. 2, значение  $\Delta_{\text{с}}$  при измерении сопротивления с помощью потенциометра Р-307 получилось большим, чем с выхода канала измерения станции. Такое различие объясняется особенностями измерительной мостовой схемы, заложенной в центральном устройстве станции и работающей на принципе поразрядного уравнивания, в которой данные об измеренной температуре округляются до  $0,1^\circ\text{C}$ . Обычно мостовая схема измерения настраивается на усредненную статическую характеристику из семейства характеристик ПТС-500. Конкретно под каждый аналоговый ИП температуры осуществляется подгонка шунтов реохорда моста по паспортным данным подключаемого ИП температуры, а также добавочных и корректирующих резисторов, с помощью которых выдерживается крутизна наклона характеристики и исключается возможность появления погрешности за счет нелинейности зависимости  $R_t = f(t)$ .

Так как мост с поразрядным уравниванием имеет дискретную шкалу, вес младшей единицы которой при измерении температуры воздуха составляет около  $0,2 \text{ Ом}$ , то погрешность измерения, обусловленная дискретностью, при подстройке нуля моста под ИП температуры также будет равна  $0,2 \text{ Ом}$  или около  $0,1^\circ\text{C}$ . В центральном устройстве станции погрешность дискретности уменьшена до  $0,1 \text{ Ом}$  ( $0,05^\circ\text{C}$ ) путем смещения характеристики измерительного

моста в положительной и отрицательной области на 0,1 Ом. В любом случае регистрация значений температуры на выходе канала на РТА осуществляется с дискретностью  $\pm 0,1^\circ\text{C}$ , т. е. только при переходе характеристики через середину шага квантования ( $0,05^\circ\text{C}$ ) на РТА зафиксированное округленное до  $0,1^\circ\text{C}$  значение температуры.

В работе был рассмотрен второй способ проверки сохранности градуировочной характеристики канала измерения температуры, предусматривающий поэлементную поверку в условиях ППЛ. При этом способе ИП температуры отключается от центрального устройства

Таблица 3

Данные расчета  $\Delta t_{\text{пов}}$  в зависимости от  $N$

| Тип измерительного прибора | $N$   | $\Delta t^\circ\text{C}$ |       |       | $\Delta t_{\text{пов}}$ |
|----------------------------|-------|--------------------------|-------|-------|-------------------------|
|                            |       | -60                      | 0     | +60   |                         |
| МО-61                      | 0,050 | 0,096                    | 0,130 | 0,166 | 0,168                   |
| P-39 (МО-2)                | 0,020 | 0,038                    | 0,050 | 0,060 | 0,064                   |
| P-306, P-307               | 0,015 | 0,030                    | 0,040 | 0,050 | 0,053                   |
| P-348                      | 0,002 | 0,004                    | 0,005 | 0,006 | 0,011                   |

станции и проверяется по одной точке в жидкостной ванне, расположенной в ППЛ. Центральное устройство поверяется с помощью имитирующих устройств [9, 10], входящих в комплект ППЛ. В этом случае погрешность поверки ИП температуры будет определяться погрешностью выбранной схемы измерения  $R_t$ , т. е. классом точности измерительного моста  $\Delta_1$ , погрешностью из-за нестабильности температуры среды  $\Delta_2$  и погрешностью образцового прибора  $\Delta_3$ . Составляющей  $\Delta_2$  можно практически пренебречь, так как проведенные исследования показали, что за 1 час температура жидкости в термованне изменяется на  $0,01\text{—}0,02^\circ\text{C}$ . Составляющую  $\Delta_3$  можно свести к минимуму, выбрав образцовый термометр, удовлетворяющий требованию соотношения погрешностей поверяемого и образцового приборов не хуже 1 : 3 [7]. Для определения степени влияния составляющей  $\Delta_1$  был произведен расчет погрешности измерения температуры  $\Delta t$  в зависимости от класса точности применяемого измерительного прибора. Значение  $\Delta t$  рассчитывалось по формуле

$$\Delta t = \frac{R_t N}{\alpha R_0 \cdot 100}, \quad (3)$$

где  $R_t$  — измеряемое сопротивление поверяемого термометра при температуре  $t^\circ\text{C}$ ,  $N$  — класс точности измерительного прибора,  $\alpha$  — температурный коэффициент термометра, равный  $0,3923 \cdot 10^{-2} 1/^\circ\text{C}$ ,  $R_0$  — сопротивление термометра при  $t=0^\circ\text{C}$  (из паспорта).

По формуле (3) были рассчитаны значения  $\Delta t$  для  $t=-60^\circ\text{C}$ ,  $t=0^\circ\text{C}$  и  $t=+60^\circ\text{C}$  в случаях применения различных типов измери-

тельных мостов и вычислена погрешность поверки  $\Delta t_{\text{пов}}$  по формуле

$$\Delta t_{\text{пов}} = \sqrt{(\Delta_1)^2 + (\Delta_2)^2 + (\Delta_3)^2}. \quad (4)$$

Результаты расчета сведены в табл. 3. Как видно из таблицы, в качестве измерительного прибора следует применять потенциометры типа Р-348 или Р-307. Эти потенциометры следует рекомендовать в комплект поверочного оборудования ППЛ.

В заключение можно сделать следующие выводы:

1. Периодическая проверка сохранности градуировочной характеристики преобразователей температуры автоматической метеостанции в одной точке диапазона может быть рекомендована для метрологического контроля за работой АМС в условиях эксплуатации.

2. Анализ экспериментальных данных, полученных при апробировании предложенной методики, показал, что целесообразней нормировать величину допускаемой погрешности по каналу измерения  $\Delta_{\text{д.к}}$  значением  $\pm 0,3^\circ\text{C}$ , а не  $\pm 0,25^\circ\text{C}$ , так как за счет масштаба регистрации значения температуры на выходе канала измерения на РТА выдаются до десятых долей градуса.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фатеев Н. П. Аппаратура для поверки метеорологических приборов. — «Тр. ГГО», 1969, вып. 240, с. 109—123.
2. Фатеев Н. П. Методические основы поверки метеорологической аппаратуры. — В кн.: Методические основы автоматизированной системы метеорологических наблюдений. Л., Гидрометеиздат, 1971, с. 45—68.
3. Фатеев Н. П. Поверка метеорологических приборов. Л., Гидрометеиздат, 1975. 310 с.
4. Сосновский А. Г., Столярова Н. И. Измерение температур. М., Изд-во стандартов, 1970, 257 с.
5. Олейник Б. Н. Новое положение о Международной практической температурной шкале. — «Измерительная техника», № 7, 1961, с. 20—23.
6. Алиева Ф. В. Градуировка платинового термометра сопротивления в двух точках. — «Измерительная техника», № 11, 1962, с. 30—35.
7. Фатеев Н. П. Поверочные схемы для метеорологических измерений. — «Тр. ГГО», 1973, вып. 313, с. 145—155.
8. Кудряшева Ж. Ф., Рабинович С. Г., Резник К. А. Методы обработки результатов наблюдений при измерениях. — «Тр. ВНИИМ», 1972, вып. 134 (194), с. 8—51.
9. Рогалев Ю. В., Сущинский Б. Л., Кузьминых И. П. К методике поверки каналов параметров ветра станции М-106 с применением имитирующих устройств. — «Тр. ГГО», 1974, вып. 340, с. 118—129.
10. Рогалев Ю. В. Некоторые результаты поверки аналоговых каналов станций М-106. — «Тр. ГГО», 1974, вып. 340, с. 130—137.

*Ю. В. Рогалев, М. А. Андреев*

### **АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ПОВЕРКИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ МЕТЕОСТАНЦИИ В ЕСТЕСТВЕННЫХ УСЛОВИЯХ**

Проведение поверки автоматических метеостанций на месте эксплуатации связано с рядом проблем, включающих в себя выбор надлежащей методики сравнений, образцового прибора, корректный учет возникающих динамических погрешностей и ряда других факторов, влияющих на оценку погрешности измерения метеопараметра.

В статье анализируются результаты сравнения КРАМС по каналу измерения атмосферного давления с образцовым ртутным барометром, полученные на месте эксплуатации, и дается оценка пределу допускаемой погрешности измерения атмосферного давления (АД) по каналу в целом  $\Delta_{д.к.}$ .

Полная погрешность измерения АД станцией при поверке в естественных условиях будет складываться из погрешности измерения и преобразования центрального устройства (ЦУ)  $\Delta P_{ЦУ}$ , инструментальной погрешности первичного измерительного преобразователя (ПИП)  $\Delta P_{пип}$ , погрешности образцового прибора —  $\Delta P_{об}$  и динамической погрешности  $\Delta P_{дин}$ , определяемой характеристиками ПИП и временными колебаниями атмосферного давления в моменты отсчетов. Она может быть записана в виде

$$\delta p_k = \delta p_{ст.ик} + \Delta p_d, \quad (1)$$

где первый член, характеризующий предельную допустимую погрешность измерения атмосферного давления при поверке в статическом режиме, может быть сам представлен в виде

$$\delta p_{ст.ик} = \Delta P_{ЦУ} + \Delta P_{пип} + \Delta P_{об}. \quad (2)$$

Как показали экспериментальные исследования центрального устройства станции КРАМС, составляющая погрешности  $\Delta P_{ЦУ}$  имеет величину порядка  $\pm 0,01$  мбар. Исследования погрешности

ПИП атмосферного давления показали, что с учетом динамической погрешности значение  $\Delta P_{\text{пип}} = \pm 0,18$  мбар [1, 2].

При поверке в естественных условиях решается задача о соответствии полученной погрешности измерения по каналу для единичного отсчета  $i$  нормированному ее значению. Обычно градуировочная характеристика канала измерения метеопараметра определяется путем поверки в статическом режиме и только для ПИП давления без учета погрешности устройства автоматики станции. Иногда осуществляют поверку канала в целом, включая и устройство автоматики, но при этом добиваются стабилизации во времени задаваемой на вход ПИП измеряемой среды, т. е. по возможности исключают влияние ее пульсаций. При сличениях в условиях эксплуатации в каждом из единичных отсчетов возможно присутствие динамической составляющей погрешности  $\delta_{\text{дин}}$ . Тогда значение поля допуска погрешности  $\Delta X$  с учетом  $\delta_{\text{дин}}$  как в случае поверки в статическом режиме, так и в случае сличений в естественных условиях может быть определено по формуле

$$\Delta X = \pm \sqrt{\Delta_{\text{д.к}}^2 + \Delta P_{\text{об}}^2}, \quad (3)$$

где  $\Delta X$  — численное значение поля допуска,  $\Delta_{\text{д.к}}$  — нормированная погрешность измерения по каналу в целом,  $\Delta P_{\text{об}}$  — нормированная погрешность измерения образцового прибора.

Для рассматриваемого случая сличения в естественных условиях по каналу АД станции КРАМС получено, что при  $\Delta_{\text{д.к}} = \pm 0,5$  мбар и  $\Delta P_{\text{об}} = \pm 0,13$  мбар, соответственно по формуле (3), значение  $\Delta X = \pm 0,51$  мбар.

Поверка в динамическом режиме требует учитывать динамические свойства как образцового прибора, так и поверяемого канала АД в том случае, если воздействующая на ПИП измеряемая величина за короткие промежутки времени значительно изменяется. Динамические свойства канала давления определяются постоянной времени  $\tau_k$  и в основном за счет инерционных свойств ПИП.

Атмосферное давление представляет собой метеопараметр, который обладает определенной изменчивостью во времени и пространстве. Пространственное и временное изменения АД, связанные с турбулентностью среды, представляют собой долгопериодный процесс, в котором присутствует высокочастотная составляющая микропульсаций АД. Ранее проведенные исследования [3] показали, что максимальная амплитуда таких пульсаций может достигать 0,01—0,05 мм рт. ст. (или 0,07 мбар). Применяемые в качестве образцовых ртутные барометры обладают значительными коэффициентами инерции  $\tau_{\text{об}} = 15 \div 25$  с. Исследования динамических характеристик ПИП давления станции КРАМС, изложенные в [2], показали, что  $\tau_{\text{пип}} = 0,43$  с, т. е. он практически мгновенно реагирует на изменения АД. В целом же канал измерения АД обладает еще инерционностью, обусловленной временем преобразования входной величины в центральном устройстве станции.

Воздействие изменяющегося во времени АД на образцовый прибор одинаково, и динамическая погрешность появляется лишь в случае различия постоянных времени поверяемого канала АД и образцового барометра  $\tau_k \neq \tau_{об}$ . Равенство постоянных времени необходимо выполнять в случае значительных колебаний по амплитуде АД.

Как отмечалось выше, высокочастотные колебания (микропульсации) АД малы по амплитуде и они будут осредняться образцовым прибором и каналом измерения станции. Погрешность за счет осреднения микропульсаций АД, отнесенная ко всему диапазону измерения

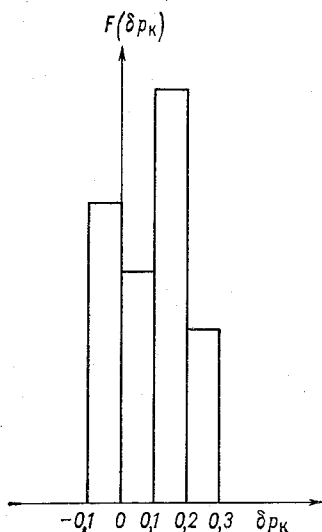


Рис. 1. Вид закона распределения погрешности на выходе канала АД по результатам сличения в естественных условиях.

АД станцией,  $\Delta P = 2 \cdot 10^{-3}$  мбар. Нормированный предел допускаемой погрешности измерения АД по каналу в целом  $\Delta_{д-к} = \pm 0,5$  мбар, т. е. вкладом погрешности осреднения в результат измерения можно пренебречь. Как образцовый прибор, так и поверяемый канал при синхронных сличениях будет реагировать на низкочастотные колебания АД, имеющие длительный период во времени. В среднем интервал времени между отсчетами в серии  $t = 2$  мин. Изменение АД за этот период времени по экспериментальным данным составило:  $\Delta P = 0,009 \div 0,015$  мбар по КР и  $\Delta P = 0,001 \div 0,020$  мбар.

При сличениях в качестве образцового прибора использовались контрольные ртутные барометры КР, погрешность измерения которых  $\Delta P_{об} = 0,2$  мбар. При нормированной  $\Delta_{д-к} = 0,5$  мбар соотношение погрешностей поверяемого канала и образцового прибора составляет 1:2, т. е. полученное при окончательной обработке значе-

ние  $\Delta_{д-к}$  будет характеризоваться только погрешностью измерения АД каналом станции. Образцовые барометры располагались на одном уровне с ПИП давления станции в помещении. Сличения проводились сериями по пять отсчетов в каждой с интервалом между сериями, равным одному часу. Длительность серии из пяти отсчетов  $t = 10 \div 12$  мин. Отсчеты производились синхронно в момент измерения каналом станции значения АД. Сличения проводились при текущем значении АД. Всего было проведено 11 серий сличений. Были вычислены средние значения отклонений в каждой из серий  $\bar{\Delta P}_i$  для случаев сличений КР с каналом АД и с ПИП, случайная составляющая погрешности в каждой из серии сличений  $S(\bar{\Delta})$ , внутрисерийная дисперсия  $S_1^2$  и межсерийная дисперсия  $S_2^2$  по всей совокупности результатов сличений по каналу.

Расчеты, выполненные при статистической обработке экспериментальных данных сличений, показали, что средняя арифметическая погрешность в сериях не превысила  $|0,3|$  мбар при сличениях между КР и выходом канала и  $|0,29|$  мбар при сличениях между КР и ПИП давления станции. Предел допускаемой погрешности измерения значений АД оказался равным соответственно для первого случая  $\Delta_{д-к} = 3S(\Delta) = \pm 0,3$  мбар, для второго случая  $\Delta_{д-к} = 3S(\Delta) = \pm 0,45$  мбар.

Как в первом, так и во втором случае полученные численные значения  $\Delta_{д-к}$  не превысили нормированного поля допуска погрешности измерения АД по каналу в целом.

В заключение можно сделать следующие выводы:

1. Влиянием динамической погрешности  $\delta_{дин}$  при сличениях в естественных условиях можно пренебречь ввиду относительной устойчивости АД во времени и в данной точке пространства.

2. На рис. 1 представлена гистограмма распределения погрешности измерения АД на выходе канала станции  $\Delta_{д-к}$  по результатам сличений. Анализируя гистограмму можно сказать, что такое распределение представляет собой композицию из дискретного и нормального распределений, причем видна асимметрия закона со смещением центра распределения в правую часть.

3. Для получения достоверных результатов сличений в естественных условиях при определении сохранности градуировочных характеристик канала главными требованиями являются синхронность отсчетов по образцовому прибору и КРАМС в моменты измерения АД станцией и соблюдение достаточно высокого соотношения погрешностей поверяемого и образцового приборов. Это соотношение должно быть не менее 1 : 2. При соблюдении этих условий возможна поверка в естественных условиях канала АД по одной точке диапазона измерения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карпуша В. Е. Компенсационный датчик атмосферного давления. — «Тр. ГГО», 1967, вып. 216, с. 106—138.
2. Карпуша В. Е. Результаты экспериментального исследования компенсационного датчика атмосферного давления. — «Тр. ГГО», 1969, вып. 240, с. 74—76.
3. Гольцман М. И. Основы методики аэрофизических измерений. М., Гостехиздат, 1950. 360 с.

*Ю. В. Рогалев, Л. И. Леонова*

### **АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПОВЕРКИ И ГРАДУИРОВКИ ПЕРВИЧНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ АМС**

В статье рассмотрены погрешности поверки первичных измерительных преобразователей (ПИП) температуры воздуха автоматических метеорологических станций (АМС). В качестве ПИП температуры воздуха в станциях М-106, М-106М и КРАМС применяются платиновые термометры сопротивления с  $R_0=500$  Ом (ПТС-500). В нормативно-технической документации на ПТС-500 обычно указываются значения  $R_0$  и отношения  $R_{100}/R_0$ , приводятся градуировочные данные на ПТС-500 в интервале диапазона измерения температуры от  $-90$  до  $+100^\circ\text{C}$  через каждые  $10^\circ\text{C}$ . Нормирован и предел допускаемой погрешности измерения температуры ПИП, который равен  $\Delta_d = \pm 0,15^\circ\text{C}$ .

В общем виде погрешность поверки преобразователя можно представить как сумму составляющих:

$$\delta_n = \Delta_m + \Delta_{об} + \Delta_{из. сх}, \quad (I)$$

где  $\Delta_m$  — погрешность метода поверки,  $\Delta_{об}$  — погрешность применяемого образцового прибора,  $\Delta_{из. сх}$  — погрешность схемы измерения температуры.

Погрешность метода определяется выбором числа реперных точек, в которых необходимо осуществить поверку ПИП. Положение о Международной практической температурной шкале (МПТШ) предусматривает поверку по трем реперным точкам (для диапазона температур  $t > 0^\circ\text{C}$ ) и четырем реперным точкам (для диапазона  $t < 0^\circ\text{C}$ ) [1, 2, 3]. Проведение полной поверки во всех реперных точках требует сложной контрольно-измерительной аппаратуры, применения материалов высокой чистоты и не всегда экономически выгодно, исходя из конкретных требований, предъявляемых к ПИП температуры воздуха.

В работе [4] предложена методика градуировки ПТС в двух реперных точках,  $0$  и  $100^\circ\text{C}$  и дан расчет погрешностей измерения

температуры за счет осреднения коэффициентов  $B$  и  $C$ . Расчет приведен для низкоомных ПТС.

Рассмотрим погрешности поверки ПТС-500 в диапазоне температур от  $-90$  до  $+60^\circ\text{C}$  по двум реперным точкам. Если термометры градуировать только в двух реперных точках, то формулы МПТШ

$$W_t = \frac{R_t}{R_0} = 1 + At + Bt^2 \text{ для } t > 0^\circ\text{C} \quad (2)$$

и

$$W_t = \frac{R_t}{R_0} = 1 + At + Bt^2 + C(t - t_{100})t^3 \text{ для } t < 0^\circ\text{C} \quad (3)$$

могут быть преобразованы к следующему виду:

$$W_t = \frac{t}{t_2} W_2 + k(t, t_2) \quad (4)$$

или

$$R_t = \frac{t}{t_2} R_2 + k(t, t_2) R_1 = R_0 \left[ \frac{t}{t_2} \frac{R_2}{R_0} + k_t \right], \quad (5)$$

где

$$W_2 = \frac{R_2}{R_1}, \quad R_1 = R_0, \quad R_2 = R_{100},$$

а

$$k(t > 0, t_2) = 1 - \frac{t}{t_2} (1 - Btt_2 + Bt_2^2), \quad (6)$$

$$k(t < 0, t_2) = k(t > 0, t_2) + C(t - t_2)t^3. \quad (7)$$

Как видно из выражения (4), коэффициент  $k(t, t_2)$  не зависит от  $k_2$ . В [3] приведены значения коэффициентов  $B = (-0,5857 \pm \pm 0,001) \cdot 10^{-6}^\circ\text{C}^{-2}$  и  $C = (-4,35 \pm 0,05) \cdot 10^{-12}^\circ\text{C}^{-4}$ . При изменении  $B$  и  $C$  в указанных пределах была проанализирована погрешность измерения температуры  $\Delta t$  в случае, когда взяты средние значения  $B_{\text{ср}}$  и  $C_{\text{ср}}$ . Были выбраны постоянные точки  $t_1 = 0^\circ\text{C}$  и  $t_2 = 100^\circ\text{C}$ . Для этих точек была построена серия кривых, выражающая зависимость  $\Delta t = f(t)$  для различных значений  $B$  и  $C$  (рис. 1). Из рисунка видно, что при максимальных отклонениях коэффициентов  $B$  и  $C$  в диапазоне температур от  $-60$  до  $+100^\circ\text{C}$  значение  $\Delta t$  не превышает  $\pm 0,003^\circ\text{C}$ . В диапазоне от  $-90^\circ$  до  $-60^\circ\text{C}$   $\Delta t = 0,005^\circ\text{C}$ .

Для ПТС-500, изготовленных из платины марки ПЛ-1, также были рассчитаны погрешности измерения температуры  $\Delta t$  при взятых средних коэффициентах  $B_{\text{ср}}$  и  $C_{\text{ср}}$  на точках  $+60$  и  $-90^\circ\text{C}$ . В табл. 1 представлены исходные данные для расчета. Расчет показал, что при средних  $B$ ,  $C$  и предельных допустимых их значениях в точках  $+60$  и  $-90^\circ\text{C}$  погрешность в измерении температуры составила соответственно  $\pm 0,001$  и  $\pm 0,004^\circ\text{C}$ .

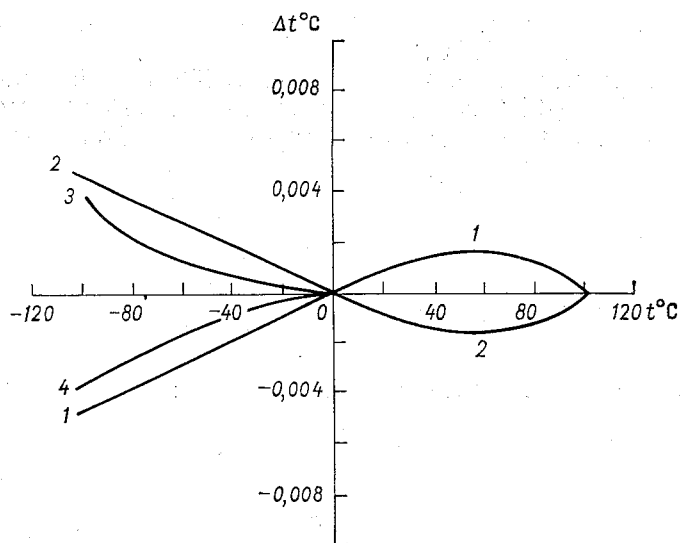


Рис. 1. Семейство кривых для различных значений  $B$  и  $C$  функции  $\Delta t = f(t)$ .

$$1 - B = (-0,5857 + 2 \cdot 10^{-4}) \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}, 2 - B = (-0,5857 - 2 \cdot 10^{-4}) \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}, 3 - C = (-4,35 + 0,05) \cdot 10^{-12} \text{ } ^\circ\text{C}^{-4}, 4 - C = (-4,35 - 0,05) \cdot 10^{-12} \text{ } ^\circ\text{C}^{-4} \quad (n = 1, 2, \dots, 5).$$

Таблица 1  
Исходные данные для расчета  $\Delta t$  в точках  $+60$  и  $-90^\circ\text{C}$

| Величина             | $t^\circ\text{C}$ |          |
|----------------------|-------------------|----------|
|                      | +60               | -90      |
| $R_0 \text{ Ом}$     | 499,95            | 499,95   |
| $A \cdot 10^{-3}$    | 3,9785            | 3,9785   |
| $B_1 \cdot 10^{-6}$  | 0,5867            | 0,5867   |
| $C_1 \cdot 10^{-12}$ | —                 | 4,40     |
| $R_{t_1}$            | 618,2392          | 318,2517 |
| $B_2 \cdot 10^{-6}$  | 0,5857            | 0,5857   |
| $C_2 \cdot 10^{-12}$ | —                 | 4,35     |
| $R_{t_2}$            | 618,2412          | 318,2592 |
| $B_3 \cdot 10^{-6}$  | 0,5847            | 0,5847   |
| $C_3 \cdot 10^{-12}$ | —                 | 4,30     |
| $R_{t_3}$            | 618,2427          | 312,2667 |

При сравнении на этих точках значений температуры, вычисленных по формулам МПТШ, с температурой, вычисленной по формуле (5) в двух реперных точках для заданных  $B_{\text{ср}}$  и  $C_{\text{ср}}$ , оказалось, что на точке  $+60^{\circ}\text{C}$   $\Delta t = 0,001^{\circ}\text{C}$ , а на точке  $-90^{\circ}\text{C}$   $\Delta t = 0,005^{\circ}\text{C}$ . Дифференцируя выражение (5) по  $R_1$  и  $R_2$ , можно показать, что коэффициенты при частных производных  $\frac{\partial R_t}{\partial R_1}$  и  $\frac{\partial R_t}{\partial R_2}$  с достаточной степенью точности будут характеризовать влияние погрешностей градуировки термометра в двух реперных точках  $\delta t_1$  и  $\delta t_2$  на погрешность измерения температуры в целом  $\Delta t$ , т. е.

$$\Delta t = k(t, t_2) \delta t_1 + \frac{t}{t_2} \delta t_2, \quad (8)$$

где  $t$  — температура среды, в которой находится поверяемый ПТС-500,  $t_1$  — реперная точка  $0^{\circ}\text{C}$ ,  $t_2$  — реперная точка  $+100^{\circ}\text{C}$ .

Таблица 2

Значения погрешности  $\Delta t$  при различной температуре

| $t^{\circ}\text{C}$  | +50   | +40   | +30   | +20   | +10   | 0     |
|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\Delta t$ . . . . . | 0,015 | 0,014 | 0,013 | 0,012 | 0,011 | 0,010 |
| $t^{\circ}\text{C}$  | -10   | -20   | -30   | -40   | -50   | -60   |
| $\Delta t$ . . . . . | 0,013 | 0,016 | 0,019 | 0,022 | 0,025 | 0,028 |

Подставив в формулы (6) и (7) численные значения коэффициентов  $B$  и  $C$  и учитывая (8), можно рассчитать значения погрешностей  $\delta t_1$  и  $\delta t_2$  в двух реперных точках ( $0$  и  $+100^{\circ}\text{C}$ ) как для  $t > 0^{\circ}\text{C}$ , так и для  $t < 0^{\circ}\text{C}$ . Для этого перепишем формулы (6) и (7) в виде

$$\left. \begin{aligned} k_{t, t_2} &= 1 - \frac{t}{100} \left[ 1 + (-5,857 \cdot 10^{-5})(100 - t) \right] \\ k_{t, t_2} &= 1 - \frac{t}{100} \left[ 1 + (-5,857 \cdot 10^{-5})(100 - t) \right] + \\ &\quad + (-4,35 \cdot 10^{-12})(t - 100)t^3 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

В выражении (9) коэффициенты  $k$  взяты для марки платины ПЛ-1. Расчет показал, что  $\delta t_{t=0} = 0,01^{\circ}\text{C}$ , а  $\delta t_{t=100} = 0,02^{\circ}\text{C}$ . По формуле (8), для диапазона измерения температур ПИП станции с интервалом через  $10^{\circ}\text{C}$ , была рассчитана погрешность  $\Delta t$ . Результаты расчета представлены в табл. 2.

На рис. 2 представлена зависимость  $\Delta t$  от  $t$ . Из рисунка видно, что максимальная возможная погрешность поверки за счет граду-

ировки в двух реперных точках, 0 и  $+100^{\circ}\text{C}$ , в диапазоне температур от  $-90$  до  $0^{\circ}\text{C}$  изменяется по линейному закону и достигает при  $t=-90^{\circ}\text{C}$  значения  $0,037^{\circ}\text{C}$ . В диапазоне от 0 до  $+60^{\circ}\text{C}$  зависимость также линейна, а максимальная погрешность поверки достигает  $0,016^{\circ}\text{C}$  при  $t=+60^{\circ}\text{C}$ . Различная крутизна прямых, характеризующих зависимость  $\Delta t=f(t)$  в областях для  $t>0^{\circ}\text{C}$  и  $t<0^{\circ}\text{C}$ , объясняется различными значениями коэффициентов  $k$  в этих областях.

На границах диапазона измерения температур значение  $\Delta t$  максимально и равно соответственно  $0,04$  и  $0,02^{\circ}\text{C}$ . При более высокой точности воспроизведения реперных точек 0 и  $+100^{\circ}\text{C}$  соответственно понижается погрешность измерения температуры  $\Delta t$ . Погреш-

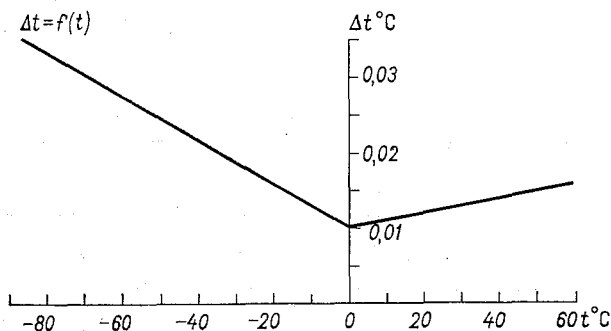


Рис. 2. График зависимости  $\Delta t=f(t)$  в диапазоне температур от  $-90$  до  $+60^{\circ}\text{C}$  для ПТС-500.

ность поверки также будет зависеть от погрешности непосредственной градуировки в реперных точках, определяемой выбранным образцовым прибором и схемой измерения температуры поверяемого ПТС-500.

Оценим погрешности поверки ПТС-500, с которыми определяется сопротивление непосредственно в точках  $R_0$  и  $R_{100}$ . В качестве образцового термометра, в соответствии с требованиями поверочной схемы [5], использовался ПТС-10 первого разряда. Сравнение температуры, вычисленной по формулам МПТШ и по данным, приведенным в [4], а также по двум реперным точкам (были взяты  $B_{\text{ср}}$  и  $C_{\text{ср}}$ ), показало, что для этого термометра расхождение составило  $\pm 0,004^{\circ}\text{C}$  (как для  $t=-60^{\circ}\text{C}$ , так и для  $t=+60^{\circ}\text{C}$ ). Эти результаты совпадают с погрешностью измерения температуры за счет отклонения коэффициента  $B$  от  $B_{\text{ср}}$ , полученными на рис. 1.

Исследованию подвергались пять термометров, изготовленных на Рижском заводе ГМП. Погрешность поверки в точках 0 и  $+100^{\circ}\text{C}$  определялась в нулевом и паровом термостатах на уста-

новке типа УТТ-5. Погрешность определения сопротивления на установке составляет  $\pm 0,02\%$ . Поверяемые термометры подключались к УТТ-5 по 4-проводной схеме.

Следует обратить внимание на возможное возникновение погрешностей при поверке в случае неправильного погружения термометров в тающий лед или в пары кипящей воды. Возникающие при этом погрешности носят систематический характер, а измеренная величина  $R_0$  оказывается завышенной,  $R_{100}$  и  $R_{100}/R_0$  — заниженными. Исследования, приведенные в работе [6], показывают, что оптимальное погружение составляет 300 мм. Необходимо учитывать

Таблица 3

Значения  $R_t$  в точках 0 и  $+100^\circ\text{C}$

| ПТС-500                             | Измерение |        |        |        |        |        |
|-------------------------------------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                                     | 1         | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      |
| Реперная точка $0^\circ\text{C}$    |           |        |        |        |        |        |
| 073                                 | 499,98    | 500,01 | 500,02 | 500,02 | 500,02 | 500,02 |
| 102                                 | 499,95    | 499,95 | 499,93 | 499,97 | 499,97 | 499,94 |
| 457                                 | 499,93    | 499,94 | 499,93 | 499,95 | 499,95 | 499,95 |
| 432                                 | 499,88    | 499,91 | 499,89 | 499,81 | 499,92 | 499,94 |
| 431                                 | 499,85    | 499,86 | 499,88 | 499,88 | 499,88 | 499,88 |
| Реперная точка $+100^\circ\text{C}$ |           |        |        |        |        |        |
| 073                                 | 696,40    | 696,41 | 696,41 | 696,39 | 696,33 | 696,44 |
| 102                                 | 696,32    | 696,36 | 696,32 | 696,29 | 696,20 | 696,31 |
| 457                                 | 696,36    | 696,31 | 696,29 | 696,27 | 696,29 | 696,29 |
| 432                                 | 696,35    | 696,31 | 696,32 | 696,27 | 696,27 | 696,32 |
| 431                                 | 696,21    | 696,21 | 696,19 | 696,19 | 696,17 | 696,18 |

и тепловой приток через выводы термометра при поверке в точке  $0^\circ\text{C}$ , который следует привести в тепловой контакт с ледяной массой в термостате, как это показано, например, в [7].

В термостатах установки УТТ-5 поверяемые термометры выдерживались в течение 30 мин. Температура контролировалась образцовым термометром сопротивления ПТС-10. Температура кипения воды определялась по ртутному барометру с пределом допускаемой погрешности измерения давления 0,2 мм. рт. ст., что соответствует погрешности определения температуры кипения воды  $\pm 0,01^\circ\text{C}$ .

Сопротивление термометров в реперных точках 0 и  $+100^\circ\text{C}$  определялось как среднее из пяти отсчетов с шестикратной повторностью для каждого поверяемого ПТС-500. Средние значения сопротивлений  $R_{t_{cp}}$  в точках 0 и  $+100^\circ\text{C}$ , полученные в результате исследова-

дований, приведены в табл. 3. Статистическая обработка результатов исследования ПТС-500 показала, что предел допустимой погрешности поверки составляет  $0,03^{\circ}\text{C}$  в точке  $0^{\circ}\text{C}$  и  $0,05^{\circ}\text{C}$  в точке  $+100^{\circ}\text{C}$ . Эти данные хорошо согласуются с результатами исследований, приведенными в работе [8]. Погрешности поверки для исследуемых ПТС-500 приведены в табл. 4.

Оценим погрешность поверки, возникающую из-за несоответствия диапазона измерения сопротивления установкой УТТ-5. Пределы измерения УТТ-5 по сопротивлению составляют 1—500 Ом. Диапазон сопротивлений для ПТС-500 в среднем составляет 380—620 Ом (в диапазоне температур от  $-60$  до  $+50^{\circ}\text{C}$ ).

Т а б л и ц а 4

Погрешности поверки  $\Delta_d$  в точках 0 и  $+100^{\circ}\text{C}$   
№ ПТС-500

| Реперная точка                  | 073  | 102  | 457  | 432  | 431  |
|---------------------------------|------|------|------|------|------|
| $0^{\circ}\text{C}$ . . . . .   | 0,03 | 0,03 | 0,02 | 0,03 | 0,02 |
| $100^{\circ}\text{C}$ . . . . . | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,04 | 0,03 |

Необходимо расширить диапазон измерения сопротивления для УТТ-5. Для этого к схеме УТТ-5 параллельно подключалась образцовая катушка сопротивления с  $R_{\text{ном}}=1000$  Ом. Рассчитаем погрешность измерения сопротивления схемой УТТ-5 за счет подключения дополнительной катушки сопротивления  $R_N$ . Общее сопротивление на выходе УТТ-5

$$R_{\text{общ}} = R_T + R_N. \quad (10)$$

Измеренное значение сопротивления представим в виде

$$R_{\text{из}} = \frac{R_T R_{\text{ном}}}{R_T + R_{\text{ном}}}, \quad (11)$$

где  $R_T$ —выходное сопротивление УТТ-5 без подключения  $R_N$ ,  $R_{\text{ном}}$ —сопротивление ПТС-500 при  $t=+60^{\circ}\text{C}$ .

Дифференцируя (11), получим

$$\frac{dR_{\text{из}}}{dR_T} = \left( \frac{R_N}{R_N + R_T} \right)^2,$$

отсюда

$$dR_{\text{из}} = \left( \frac{R_N}{R_N + R_T} \right)^2 dR_T. \quad (12)$$

Переходя далее к конечным разностям и преобразовав выражение (12) к виду удобному для вычислений, получим

$$\Delta R_N = \left( \frac{R_N}{R_N + R_T} \right)^2 \Delta R_t,$$

или

$$\Delta R_t = \frac{\Delta R_N}{\left( \frac{R_N}{R_N + R_T} \right)^2}. \quad (13)$$

Подставляя в формулы (11) и (13) численные значения  $R_N = 1000 \text{ Ом}$ ,  $R_T = 620 \text{ Ом}$ ,  $R_{из} = 383 \text{ Ом}$  и учитывая, что класс точности потенциометра УТТ-5 равен  $0,002\%$ , получим  $\Delta R_N = 0,008 \text{ Ом}$ . Тогда  $\Delta R_T = 0,021 \text{ Ом}$ . Исходя из того, что  $2 \text{ Ом}$  соответствует  $1^\circ\text{C}$  и решив пропорцию, получим, что погрешность в измерении температуры за счет подключения дополнительной катушки сопротивления составит  $\Delta t = \pm 0,0105 = 0,01^\circ\text{C}$ .

Принимая во внимание, что составляющие в (1) являются случайными величинами и подчиняются нормальному закону распределения, суммарную погрешность поверки определим по формуле

$$\Sigma \delta_n = \sqrt{\Delta_m^2 + \Delta_{об. пр}^2 + \Delta_{из. сх}^2}. \quad (14)$$

Подставив численные значения:  $\bar{\Delta}_m = 0,03^\circ\text{C}$  для точки  $0^\circ\text{C}$ ,  $\bar{\Delta}_m = 0,04^\circ\text{C}$  для точки  $100^\circ\text{C}$  и  $\Delta_{об. пр} = 0,004^\circ\text{C}$ ,  $\Delta_{из. сх} = 0,01^\circ\text{C}$ , получим, что  $\Sigma \delta_n(0^\circ) = 0,03^\circ\text{C}$  и  $\Sigma \delta_n(100^\circ) = 0,05^\circ\text{C}$ . Средние значения  $\bar{\Delta}_m$  для  $0$  и  $100^\circ\text{C}$  взяты из табл. 4.

В заключение можно сделать следующие выводы.

1. Погрешность поверки измерительных преобразователей температуры при градуировке их в двух реперных точках согласуется с требованиями поверочной схемы [5]. На границах диапазона измерения температуры значение  $\Delta t$  максимально и составляет  $0,02^\circ\text{C}$  при  $+50^\circ\text{C}$  и  $0,03^\circ\text{C}$  при  $-60^\circ\text{C}$ . Точность измерения температуры будет тем выше, чем ближе коэффициент  $B$  к  $B_{ор}$  и чем ближе искомая температура к выбранным двум точкам.

2. Расчеты погрешностей поверки показывают, что их величины не вносят существенной ошибки в результаты поверки, а погрешность измерения температуры целиком определяется непосредственно погрешностью самого ПИП, его статическими и динамическими характеристиками.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Олейник В. Н. Новое положение о Международной практической температурной шкале. — «Измерительная техника», 1961, № 7, с. 20—23.
2. Орлова М. П. Низкотемпературная термометрия. М., Изд-во стандартов, 1975. 158 с.

3. Сосновский А. Г., Столярова Н. И. Измерение температур. М., Изд-во стандартов, 1970. 257 с.
4. Алиева Ф. В. Градуировка платинового термометра сопротивления в двух точках. — «Измерительная техника», 1962, № 11, с. 30—33.
5. Фатеев Н. П. Поверочные схемы для метеорологических измерений. — «Тр. ГГО», 1973, вып. 313, с. 145—155.
6. Брагин Б. К. О некоторых ошибках при поверке технических термометров сопротивления. — «Измерительная техника», 1961, № 3, с. 17—19.
7. Martin D. L., Snowdon R. L. Apparatus for Ice Point of Capsule Platinum Resistance thermometers. — „Rev. Sci. Instrument”, 1974, 45, N 7, p. 953—955.
8. Фатеев Н. П. Методические основы поверки метеорологической аппаратуры. — В кн.: Методические основы автоматизированной системы метеорологических наблюдений. Л., Гидрометеиздат, 1971. 118 с.

*Ю. В. Рогалев, Н. П. Фатеев*

### **АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИМИТИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ПРИ ПОВЕРКЕ АВТОМАТИЧЕСКИХ МЕТЕОСТАНЦИЙ**

При поверке устройств автоматики и регистрации (УАР) метеостанций применяется образцовая аппаратура, позволяющая имитировать на входе УАР выходные электрические параметры первичных измерительных преобразователей (ПИП) и оценивать точность УАР этих метеостанций. По выходным параметрам имитаторы ПИП разделяются на три группы: на выходе которых формируется последовательность электрических импульсов  $n$ , электрическое сопротивление  $R$ , или отношение сопротивлений  $R_1/R_2$  и в виде постоянного напряжения  $U$ .

С помощью таких имитаторов осуществляется поверка УАР станций по всему диапазону измеряемых метеопараметров. Структурное и схемное построение УАР существующих метеостанций (КРАМС, М-106, М-106М, М-107) различно, но в принципе они сходны по выходным параметрам, подключаемым к ним ПИП, что позволяет применять аналогичные по принципиальным схемам универсальные имитирующие устройства. Независимо от типа метеостанции структурную схему построения имитатора можно представить в виде, изображенном на рис. 1, где устройства (блоки)  $У1$ ,  $У2$ , и  $У3$  представляют собой электрические схемы различной сложности, на выходе которых имитируются величины  $R$ ,  $R_1/R_2$  и  $n$ , соответствующие значениям температуры и влажности воздуха, атмосферного давления, параметров ветра. Кроме того, имитируются метеорологическая дальность видимости и высота нижней границы облаков.

Оценим погрешность имитации по этим параметрам. При имитации выходного параметра ПИП температуры воздуха, в котором применяется платиновый термометр сопротивления ПТС-500, используется набор постоянных резисторов, выполняемых из манганитовой (или константановой) проволоки. Путем переключения резисторов этот набор позволяет имитировать дискретные значения

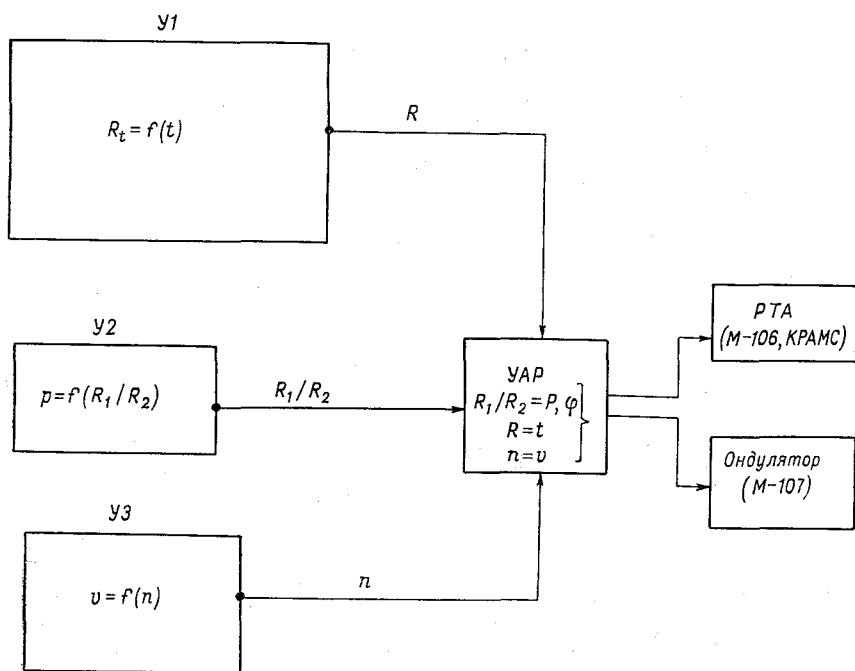


Рис. 1. Блок-схема имитатора выходных параметров ПИП метеостанций.

температуры воздуха в диапазоне от  $-60$  до  $+50^\circ\text{C}$ . Имитируемые значения температуры должны охватывать несколько точек как в отрицательной, так и в положительной областях диапазона измерения.

При оценке погрешности УАР станций можно принять, что предел допускаемой погрешности канала станции делится в равной степени между ПИП и УАР. В этом случае для канала измерения температуры воздуха погрешность имитации может быть принята равной  $\pm 0,12$ . Если допустимое соотношение между погрешностями рабочих и образцовых средств измерения не хуже  $1:2$ , погрешность поверки не должна превышать  $0,06^\circ\text{C}$  (или  $0,12 \text{ Ом}$ ). При значении резистора, имитирующего максимальное значение температуры  $R_{\text{макс}} = 600 \text{ Ом}$ , погрешность имитации составляет  $0,02\%$ . Суммарная погрешность имитируемого сопротивления с учетом погрешности, вносимой переключателем и равной  $0,04 \text{ Ом}$ , не должна превышать  $0,1 \text{ Ом}$ , что соответствует погрешности в имитации температуры на входе УАР, равной  $\pm 0,05$ . Применяемый для этой цели марганец имеет температурный коэффициент  $\alpha_m$ , близкий к  $2 \cdot 10^{-5} 1/^\circ\text{C}$ . Пользуясь формулой

$$\Delta R_m = R \alpha_m \Delta t, \quad (1)$$

где  $\Delta R_m$  — изменение сопротивления марганца при изменении температуры,  $R$  — сопротивление в омах, имитирующее температуру,

$\alpha_m$  — температурный коэффициент манганина, равный  $2 \cdot 10^{-5} 1/^\circ\text{C}$ ,  $\Delta t$  — изменение температуры среды в  $^\circ\text{C}$ , можно оценить погрешность имитации температуры, которая при  $R=600$  Ом и  $\Delta t=20^\circ$  составит 0,24 Ом (или  $0,12^\circ\text{C}$ ).

Имитирующее сопротивление резистора  $R$  при температуре среды  $t_{cp}$  вычисляется по формуле

$$R = R_{20}[1 + \alpha_m(t_{cp} - 20)], \quad (2)$$

где  $R_{20}$  — номинальное сопротивление резистора при  $t_{cp}=20^\circ\text{C}$ ,  $\alpha_m$  — температурный коэффициент манганина,  $t_{cp}$  — температура окружающей среды.

Погрешность резисторов, имитирующих температуру, определяется в основном погрешностью измерения номинального значения в процессе изготовления. Эту погрешность можно рассчитать по формуле

$$\Delta R_{им} = 0,01 R \Delta r, \quad (3)$$

где  $R$  — номинальное значение сопротивления в омах,  $\Delta r$  — погрешность (класс точности) применяемого средства измерения в процентах.

Принимая  $R=600$  Ом и учитывая, что погрешность средства измерения  $\Delta r$  в производственных условиях не превышает 0,05%, значение  $\Delta R_{им}=0,3$  Ом (или  $0,15^\circ\text{C}$ ).

Суммарная погрешность имитируемого сопротивления на входе УАР определится из формулы

$$\Sigma R = \sqrt{\Delta R_{им}^2 + \Delta R_{ном}^2}. \quad (4)$$

После вычислений в переводе на температуру  $\Sigma R = \pm 0,33^\circ\text{C}$ . Из расчета видно, что погрешность имитации одного порядка с нормированной погрешностью канала измерения температуры, что недопустимо. Для уменьшения погрешности имитации следует в качестве резисторов в схеме имитатора использовать либо образцовые катушки сопротивлений, либо магазины сопротивлений высокого класса точности. Так, например, при  $\Delta r=0,02\%$  погрешность имитации температуры  $\Delta t_{им}$  уже составит  $\pm 0,1^\circ\text{C}$ . Однако такую подгонку трудно осуществить в производственных условиях.

Рассмотрим случай применения в схеме имитатора серийно выпускаемых резисторов и оценим погрешность  $\Delta t_{им}$ . Резисторам, выпускаемым серийно, присущи производственные погрешности, которые нормируются в виде разброса в процентах от его номинального значения  $R_{ном}$ . В настоящее время промышленностью выпускаются различного типа резисторы с разбросом относительно  $R_{ном}$  равным  $\pm 0,25$ ,  $\pm 0,5\%$ . Принимая в формуле (3) погрешность номинала резистора  $\Delta r=0,25\%$ , при  $R_t=600$  Ом, получим, что  $\Delta R_{им}=1,5$  Ом (или  $\Delta t_{им}=0,65^\circ\text{C}$ ). Отсюда следует, что погрешность имитации температуры на вход УАР в случае применения серийно выпускаемых резисторов не удовлетворяет требованиям, предъявляемым

к поверочным устройствам, и с их помощью возможна лишь грубая настройка канала или проверка его работоспособности.

Выпускаемые серийно магазины сопротивления высокого класса точности могут быть использованы в качестве имитирующих устройств, обеспечивающих необходимую погрешность имитации.

В настоящее время для поверки УАР станций применяются магазины сопротивлений типа МСР-60М (кл. точности 0,02). Преимущества их применения и, в частности, оценка погрешности имитации  $\Delta t_{\text{им}}$  по каналам температуры воздуха и почвы (для станции М-106) рассмотрены в [1].

Погрешность измерения влажности воздуха в области положительных температур автоматическими станциями (КРАМС, М-106М) составляет  $\pm 5\%$ . Для погрешности имитации, не превышающей 2%, необходимо измерять психрометрическую разность с погрешностью не более  $0,2^\circ\text{C}$ . Это требует имитировать температуру «сухого» и «смоченного» термометров с погрешностью, не превышающей  $\pm 0,1^\circ\text{C}$ . Такая же погрешность должна быть и при имитации температуры точки росы. Из этого следует, что резисторы, заложенные в схеме имитатора, должны иметь сопротивление, отличающееся от номинального не более, чем на 0,2 Ома, что при номинальном их значении  $R_{\text{ном}} = 600$  Ом соответствует погрешности 0,03%. Такую погрешность имитации обеспечивают магазины сопротивлений класса 0,02.

Оценим погрешность имитации по каналу измерения атмосферного давления. Предел допускаемой погрешности измерения по каналу в целом нормирован величиной  $\Delta p_{\text{д.к}} = \pm 0,5$  мбар. Следовательно, имитирующее устройство должно обеспечивать погрешность имитации  $\Delta p_{\text{им}}$ , не превышающую  $\pm 0,1$  мбар. Одним из возможных вариантов создания имитирующего устройства может быть применение в нем потенциометра (аналогично применяемому в ПИП), обеспечивающего возможность имитации любых значений давления в заданном диапазоне измерений. Применение такого потенциометра потребует создания специального редуктора к установочной шкале и фиксатора, что усложнит устройство и не даст заметного уменьшения погрешности  $\Delta p_{\text{им}}$ . Кроме того, после изготовления такого устройства потребуется его градуировка по  $R_1/R_2$ . Так как выходная статическая характеристика ПП линейна, то нет смысла в имитации большего числа точек внутри диапазона измерения. В этом случае целесообразно использовать делитель напряжения, представляющий собой часть плеча мостовой схемы ПИ, что упрощает задачу и позволяет в 2—3 точках диапазона осуществить поверку УАР. Обеспечить погрешность имитации  $\Delta p_{\text{им}} = \pm 0,1$  мбар возможно в случае применения в делителе резисторов, изготовленных с погрешностью, близкой к  $\pm 0,1\%$ .

Используя в качестве имитирующих устройств магазины сопротивлений типа МСР-60М кл. 0,02, получим погрешность задания сопротивления  $\Delta R = \pm 1,0$  Ом, или погрешность имитации  $\Delta p_{\text{им}} = \pm 0,025$  мбар по всему диапазону измерения (для КРАМС).

— При поверке УАР станции М-106М наибольшая погрешность задания сопротивления  $\Delta R = 0,08$  Ом, что составит погрешность имитации атмосферного давления  $\Delta p_{\text{им}} = \pm 0,4$  мбар. Как в первом (поверка УАР КРАМС), так и во втором (поверка УАР М-106М) случае магазины сопротивлений соответствуют требованиям, предъявляемым к поверочным устройствам.

Рассмотрим структуру и погрешности имитирующих устройств для поверки УАР станции по каналам параметров ветра, метеорологической дальности видимости (МДВ) и высоты нижней границы облаков (ВНГО). Эти устройства должны генерировать последовательности импульсов с минимальной погрешностью имитации скорости ветра  $\Delta v_{\text{им}}$ . Блок-схема такого имитирующего устройства должна содержать задающий генератор импульсов (ЗГИ) с делителем частоты следования импульсов. Диапазон имитации скорости ветра должен быть 1—60 м/с с дискретной выдачей имитируемых импульсами скоростей в нескольких точках диапазона.

Статическая характеристика на выходе ПП близка к линейной, поэтому достаточно осуществлять поверку УАР станций в 2—3 точках диапазона измерения.

Погрешность имитации скорости ветра  $\Delta v_{\text{им}}$  на выходе имитатора определяется погрешностью генерации последовательностей импульсов с выхода ЗГИ, обусловленной температурной нестабильностью элементов ЗГИ. В качестве ЗГИ в имитаторах используются схемы симметричных мультивибраторов с коллекторно-базовыми связями.

Имитирующее устройство, разработанное в ГГО [2], позволяет дискретно задавать на вход УАР последовательности электрических импульсов, соответствующие имитируемой скорости ветра от 2 до 46 м/с в пяти точках имитируемого диапазона. При исследовании имитатора в качестве образцового прибора применялся счетчик импульсов ПП-16. Определение основной погрешности частоты следования импульсов  $\Delta F$  с выхода имитатора осуществлялось на каждом из пяти фиксированных положений переключателя скорости ветра. Интервал времени для подсчета импульсов равен 100 секунд. На каждой точке диапазона производилось по 10 отсчетов последовательностей импульсов. Методами статистической обработки определялось среднее значение отклонений импульсов в серии с выхода имитатора  $\Delta n$  относительно образцового прибора. Для каждой точки имитируемого диапазона вычислялось значение средней квадратической погрешности для частоты следования импульсов  $S(\Delta)_{\text{F}}$  за 1 секунду по формуле

$$S(\Delta)_{\text{F}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{i=n} (\Delta n - \bar{n})^2}}{\frac{N-1}{100}}, \quad (5)$$

где  $N$  — количество отсчетов в серии,  $\bar{n}$  — среднее значение откло-

нений между выходом имитатора (для каждой дискретной точки) и образцовым прибором,  $n_i$  — отсчет в серии.

В табл. 1 представлены результаты вычисления по формуле (5) погрешности  $\Delta F$  для трех видов последовательностей импульсов, имитируемых с выхода имитатора (опорной, основной и сдвинутой серий). Как видно из табл. 1, частота следования импульсов осуществляется с большой степенью точности как в режиме задания частоты серий, так и при их подсчете.

Таблица 1

| Положение переключателя | Серия импульсов |                |               |                |               |                |
|-------------------------|-----------------|----------------|---------------|----------------|---------------|----------------|
|                         | основная        |                | сдвинутая     |                | опорная       |                |
|                         | $s_F$           | $zs(\Delta)_F$ | $s(\Delta)_F$ | $zs(\Delta)_F$ | $s(\Delta)_F$ | $zs(\Delta)_E$ |
| 1                       | 0,0000          | 0,0000         | 0,0093        | 0,0280         | 0,0056        | 0,0168         |
| 2                       | 0,0093          | 0,0280         | 0,0076        | 0,0228         | 0,0042        | 0,0126         |
| 3                       | 0,0052          | 0,0156         | 0,0100        | 0,0300         | 0,0063        | 0,0189         |
| 4                       | 0,0066          | 0,0198         | 0,0036        | 0,0108         | 0,0053        | 0,0159         |
| 5                       | 0,0066          | 0,0198         | 0,0057        | 0,0171         | 0,0070        | 0,0210         |

Значения скорости ветра, имитируемой на каждом из пяти поддиапазонов и для всех видов серий импульсов, вычислялись по формуле

$$v = \frac{150}{k+1} \cdot \bar{n}, \quad (6)$$

где  $\bar{n}$  — среднее значение количества импульсов, зафиксированное с выхода имитатора для пяти поддиапазонов,  $k$  — коэффициент пересчета, определяемый из паспортных данных.

В табл. 2 представлены значения скорости ветра в м/с, рассчитанные по формуле (6). Из данных табл. 2 следует, что имитатор позволяет охватить необходимый диапазон скоростей при поверке

Таблица 2

| Положение переключателя | Серия импульсов |          |           | v м/с |
|-------------------------|-----------------|----------|-----------|-------|
|                         | опорная         | основная | сдвинутая |       |
| 1                       | 2,387           | 2,398    | 2,398     | 2,4   |
| 2                       | 6,090           | 6,090    | 6,090     | 6,1   |
| 3                       | 13,150          | 13,079   | 13,145    | 13,1  |
| 4                       | 21,680          | 21,659   | 21,681    | 21,7  |
| 5                       | 46,760          | 46,805   | 46,739    | 46,8  |

Таблица 3

| Положение переключателя | Серия импульсов |               |                |         |           |               |                |         |           |               |
|-------------------------|-----------------|---------------|----------------|---------|-----------|---------------|----------------|---------|-----------|---------------|
|                         | основная        |               |                |         |           | сдвинутая     |                |         |           |               |
|                         | $S_{100}$       | $S(\Delta)_F$ | $3S(\Delta)_F$ | $v$ м/с | $S_{100}$ | $S(\Delta)_F$ | $3S(\Delta)_F$ | $v$ м/с | $S_{100}$ | $S(\Delta)_F$ |
| 1                       | 0,45            | 0,0045        | 0,0135         | 1,69    | 0,52      | 0,0052        | 0,0156         | 1,69    | 0,55      | 0,0055        |
| 2                       | 0,46            | 0,0040        | 0,0138         | 3,85    | 0,62      | 0,0062        | 0,0186         | 3,86    | 0,52      | 0,0052        |
| 3                       | 0,56            | 0,0056        | 0,0168         | 8,70    | 0,42      | 0,0042        | 0,0126         | 8,70    | 0,69      | 0,0069        |
| 4                       | 0,43            | 0,0043        | 0,0129         | 14,10   | 0,80      | 0,0080        | 0,0240         | 14,10   | 0,68      | 0,0068        |
| 5                       | 0,88            | 0,0088        | 0,0264         | 31,40   | 0,93      | 0,0093        | 0,0279         | 31,40   | 0,57      | 0,0057        |

1

Таблица 4

| Имитатор                     |                          |              |                        | Поверяемый пульт анеморумбометров |             |            |            |               |            |            |             |                          |  |
|------------------------------|--------------------------|--------------|------------------------|-----------------------------------|-------------|------------|------------|---------------|------------|------------|-------------|--------------------------|--|
| $v_{\text{макс}}/v_T$<br>м/с | $v_{\text{макс}}$<br>м/с | $v_T$<br>м/с | $v_{\text{ср}}$<br>м/с | $v_{\text{макс}}=47,4$ м/с        |             |            |            | $v_T=2,4$ м/с |            |            |             | $v_{\text{ср}}=24,7$ м/с |  |
|                              |                          |              |                        | $\Delta_c$                        | $S(\Delta)$ | $\Delta_d$ | $\Delta_c$ | $S(\Delta)$   | $\Delta_d$ | $\Delta_c$ | $S(\Delta)$ | $\Delta_d$               |  |
| 46,9/2,4                     | 46,9                     | 2,4          | 24,65                  | 0,54                              | 0,33        | 0,54       | 0,00       | 0,00          | 0,09       | 0,07       | 0,23        |                          |  |
| 21,9/13,2                    | 21,9                     | 13,2         | 17,55                  | 0,10                              | 0,00        | 0,10       | 0,04       | 0,05          | 0,13       | 0,04       | 0,21        |                          |  |
| 13,2/6,1                     | 13,2                     | 6,1          | 9,65                   | 0,01                              | 0,03        | 0,04       | 0,00       | 0,00          | 0,09       | 0,10       | 0,28        |                          |  |

13,2/6,1

УАР станций. Методика поверки УАР станции М-106 с применением имитатора изложена в [2].

В ходе усовершенствования имитатора была разработана схема и изготовлен опытный образец устройства для поверки канала параметров ветра (УПКПВ).

При исследовании метрологических характеристик опытного образца были вычислены значения  $S(\Delta)_F$  и  $3S(\Delta)_F$  частоты следования импульсов с его выхода за 1 секунду и по формуле (6) рассчитаны значения имитируемых скоростей ветра. Полученные данные представлены в табл. 3, из которой следует, что точностные характеристики также удовлетворяют необходимым требованиям для поверочных устройств.

Имитатор УПКПВ позволяет поверять измерительный пульт анеморумбометра М-63М по параметрам максимальной, текущей, средней скоростям и среднему направлению ветра. Экспериментальные работы по поверке измерительного пульта М-63М с применением УПКПВ были произведены по трем имитируемым скоростям ветра: средней ( $v_{ср}$ ), максимальной ( $v_{макс}$ ) текущей ( $v_T$ ) и по его направлению ( $\alpha_{ср}$ ).

Таблица 5

| Имитируемое<br>значение $\alpha^\circ$ | Повторяемый пульт анеморумбометра |            |             |            |
|----------------------------------------|-----------------------------------|------------|-------------|------------|
|                                        | $\alpha_{10}^\circ$               | $\Delta_c$ | $S(\Delta)$ | $\Delta_d$ |
| 320                                    | 313                               | -7,0       | 0,0         | 7,0        |
| 240                                    | 236                               | -4,1       | 1,1         | 1,9        |
| 100                                    | 97                                | -2,8       | 0,63        | 1,5        |

На каждой имитируемой точке для  $v_{ср}$ ,  $v_{макс}$ ,  $v_T$  и  $\alpha_{ср}$  осуществлялось по 10 отсчетов по шкале измерительного пульта М-63М. Были вычислены систематическая составляющая погрешности  $\Delta_c$ , средняя квадратическая составляющая  $S(\Delta)$  и предел допускаемой погрешности измерения  $\Delta_d$ . Значение предела допускаемой погрешности  $\Delta_d$  рассчитывалось по формуле

$$\Delta_d = \pm [2S(\Delta) + \Delta_c]. \quad (7)$$

Нормированные значения  $\Delta_d$  для  $v_{ср}$ ,  $v_{макс}$ ,  $v_T$  и  $\alpha_{ср}$  соответственно составляют:  $\pm (0,2 + 0,035 v)$  м/с,  $\pm (0,7 + 0,035 v)$  м/с,  $\pm (0,3 + 0,035 v)$  м/с и  $\pm 5^\circ$ . Имитируемые значения параметров ветра, приведенные в табл. 4, с учетом этих погрешностей составят, соответственно:

$v_{ср} = 9,65 \pm 0,54$  м/с;  $v_{ср} = 17,55 \pm 0,31$  м/с;  $v_{ср} = 24,65 \pm 1,06$  м/с;  
 $v_{макс} = 13,2 \pm 1,16$  м/с;  $v_{макс} = 21,9 \pm 1,47$  м/с;  $v_{макс} = 46,9 \pm 2,34$  м/с;  
 $v_T = 6,1 \pm 0,51$  м/с;  $v_T = 13,2 \pm 0,76$  м/с;  $v_T = 2,4 \pm 0,36$  м/с.

В табл. 5 представлены результаты исследования метрологических характеристик по  $\alpha_{\text{ср}}$ . Имитатор параметров ветра, разработанный в ГГО и применяемый для поверки УА станций КРАМС, на своем выходе позволяет дискретно задавать имитируемые значения скоростей в семи точках диапазона измерения (от 1,3 до 41,2 м/с). Численные значения имитируемых скоростей ветра на каждой из точек диапазона рассчитывались по формуле

$$v_{\text{им}} = \frac{\bar{n}}{t} \cdot k, \quad (8)$$

где  $\bar{n}$  — среднее значение количества электрических импульсов за 100 секунд,  $t$  — время осреднения, равное 100 с,  $k$  — коэффициент пересчета, равный 0,56.

В качестве средства для подсчета количества импульсов с выхода имитатора использовался счетчик импульсов ПСО2-08. Для всех имитируемых точек были рассчитаны значения  $S(\Delta^\circ)$  и  $3S(\Delta^\circ)$  частоты следования импульсов и значения имитируемой скорости по формуле (8) (табл. 6).

Таблица 6

| Положение переключателя потенциометра | Метрологический параметр |                   |                    |         |
|---------------------------------------|--------------------------|-------------------|--------------------|---------|
|                                       | $\bar{n}_{100}$          | $S(\Delta^\circ)$ | $3S(\Delta^\circ)$ | $v$ м/с |
| 1                                     | 242                      | 0,02              | 0,07               | 1,3     |
| 2                                     | 615                      | 0,02              | 0,06               | 3,4     |
| 3                                     | 1284                     | 0,02              | 0,06               | 7,1     |
| 4                                     | 1906                     | 0,02              | 0,06               | 10,5    |
| 5                                     | 2827                     | 0,02              | 0,06               | 15,5    |
| 6                                     | 5477                     | 0,03              | 0,09               | 30,1    |
| 7                                     | 7486                     | 0,01              | 0,03               | 41,2    |

Следует отметить, что погрешность имитации  $\Delta v_{\text{им}}$  по всему диапазону составила  $\pm 0,12$  м/с. Наименьшая нормированная погрешность КРАМС по каналу измерения скорости ветра составляет 0,56 м/с, следовательно, погрешность имитации вполне удовлетворяет требованиям, предъявляемым к поверочному устройству.

По техническому заданию ГГО в ЦКБ ГМП были изготовлены опытные образцы имитаторов, предназначенных для поверки УАР станций М-106М, ПИП ветра этих станций и пульта прибора М-63М. Были проведены экспериментальные исследования опытных образцов с целью определения их метрологических характеристик. В качестве образцового прибора для регистрации количества импульсов с выхода имитатора использовались автономные счетчики импульсов Ф-588 и ПСО2-08. Диапазон имитируемой скорости ветра

от 3 до 60 м/с разделен на десять точек. Средние значения скорости в этих точках составляют: 3, 5, 10, 16, 21, 26, 31, 36, 41, 60 м/с, причем возможна плавная регулировка значений имитируемой скорости в пределах  $\pm 10\%$ . Имитируемая скорость рассчитывалась по формуле (6). При исследовании погрешности имитации  $\Delta v_{\text{им}}$  вначале были получены частоты при крайних «правом» и «левом» положениях регулировочного потенциометра частоты ЗГИ для определения вариаций имитируемой скорости в каждой точке (табл. 7).

Таблица 7

| $v_{\text{им}}$ м/с | Определяемая величина | Положение потенциометра |        | $v_{\text{им}}$ м/с | Определяемая величина | Положение потенциометра |        |
|---------------------|-----------------------|-------------------------|--------|---------------------|-----------------------|-------------------------|--------|
|                     |                       | левое                   | правое |                     |                       | левое                   | правое |
| 3                   | $f$ имп/с             | 1,97                    | 3,34   | 26                  | $f$ имп/с             | 17,52                   | 30,09  |
|                     | $v$ м/с               | 2                       | 3      |                     | $v$ м/с               | 18                      | 30     |
| 5                   | $f$ имп/с             | 3,56                    | 6,14   | 31                  | $f$ имп/с             | 19,90                   | 34,24  |
|                     | $v$ м/с               | 4                       | 6      |                     | $v$ м/с               | 20                      | 34     |
| 10                  | $f$ имп/с             | 6,83                    | 11,74  | 36                  | $f$ имп/с             | 27,87                   | 47,95  |
|                     | $v$ м/с               | 7                       | 12     |                     | $v$ м/с               | 28                      | 48     |
| 16                  | $f$ имп/с             | 11,63                   | 20,08  | 41                  | $f$ имп/с             | 29,26                   | 50,29  |
|                     | $v$ м/с               | 12                      | 20     |                     | $v$ м/с               | 29                      | 50     |
| 21                  | $f$ имп/с             | 15,28                   | 26,30  | 60                  | $f$ имп/с             | 34,04                   | 58,43  |
|                     | $v$ м/с               | 15                      | 26     |                     | $v$ м/с               | 34                      | 58     |

Кроме этого, имитатор позволяет имитировать направления ветра  $\alpha$ , метеорологическую дальность видимости  $S$ , высоту нижней границы облаков  $H$ , количество жидких осадков  $Q$  и солнечное сияние  $I$ . При разработке имитатора нормировалась расчетная погрешность имитации, которая составила для  $\Delta v_{\text{им}} = \pm 2\%$  от значения скорости ветра,  $\Delta \alpha_{\text{им}} = \pm 2^\circ$ ,  $\Delta S_{\text{им}} = \pm 1$  имп (соответствует 10 м) в диапазоне измерения от 200 до 6080 м, что соответствует количеству импульсов от 1 до 148,  $\Delta H_{\text{им}} = \pm 1$  имп (соответствует 5 м) в диапазоне измерения от 10 до 1000 м, что соответствует количеству импульсов от 2 до 200,  $\Delta Q_{\text{им}} = \pm 0,5$  мм,  $\Delta I_{\text{им}} = \pm 2$  мА.

На рис. 2 изображена область  $I$ , которая характеризует максимальное отклонение от средних значений имитируемой скорости ветра при крайних левом и правом положениях регулировочного потенциометра. На этом же рисунке изображена область  $II$ , которая характеризует значения погрешности имитации скорости ветра в случае фиксированной частоты следования импульсов с выхода имитатора. Такого же эффекта можно добиться при предварительной установке по счетчику последовательностей импульсов. При таком предварительном контроле исключается неопределенность в имитируемых значениях  $v_{\text{им}}$  с выхода имитатора. Плавная регу-

лировка частоты следования импульсов при подключенном к имитатору счетчике импульсов позволяет оценить наименьший шаг квантования при измерении в УАР значений скорости ветра.

При поверке УАР станций М-106М и М-106 имитируемые значения  $v_{им}$ ,  $\alpha_{им}$ ,  $S_{им}$  и  $H_{им}$  контролируются по стрелочному прибору, встроенному в имитатор. Так как 1 Гц соответствует 1 м/с, отсчет числа делений соответствует определенной частоте по шкале прибора  $f_{пр}$ .

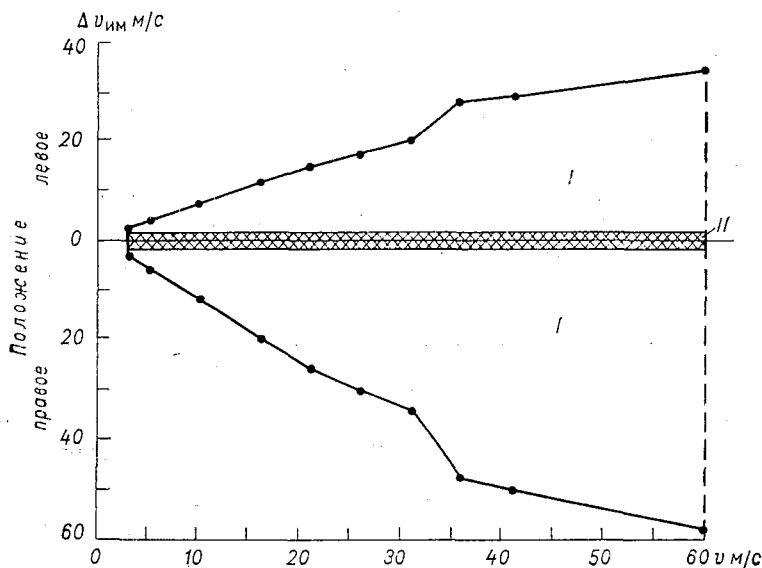


Рис. 2. Области отклонений имитируемых значений скорости ветра при левом и правом граничных положениях потенциометра (I) и значений погрешности имитации при фиксированных значениях частоты исследования импульсов с выхода имитатора (II).

Полное отклонение составляет 100 делений шкалы, т. е. цена одного деления равна 1 Гц. Таким образом, показания частоты по встроенному прибору будут однозначно определять значения  $v_{им}$ , т. е.  $f_{пр} = v_{им}$ .

В ходе лабораторных испытаний проводились исследования погрешностей имитации параметров скорости ветра при пониженных и повышенных напряжениях питания, а также после воздействия предельных температур ( $-60$  и  $+60^{\circ}\text{C}$ ) и повышенной относительной влажности ( $95 \pm 3\%$  при  $t = 30 \pm 3^{\circ}\text{C}$ ). Значение частоты определялось по встроенному прибору и по счетчику импульсов Ф-588. На каждой имитируемой точке диапазона скоростей это делалось при крайних положениях потенциометра плавной регулировки частоты. Задаваемая частота следования импульсов опорной серии  $f$  за ми-

нутный интервал, формируемый автоматически, определялась как

$$f = \frac{N}{t}, \quad (9)$$

где  $t=60$  с,  $N$  — количество импульсов опорной (сдвинутой или основной) серии за минутный интервал, зафиксированное по счетчику.

Вычисление погрешности измерения частоты следования серий импульсов встроенным прибором  $\Delta f_{\text{пр}}$  производилось по формуле

$$\Delta f_{\text{пр}} = \frac{\Delta m}{M} \cdot 100 \%, \quad (10)$$

где  $\Delta m$  — максимальное абсолютное отклонение показаний встроенного прибора от частоты, зафиксированной счетчиком;  $M$  — диапазон измерения скорости встроенным прибором ( $M=50$  м/с).

Предел допускаемой погрешности  $\Delta_d$  имитации  $\Delta v_{\text{им}}$ ,  $\Delta \alpha_{\text{им}}$ ,  $\Delta S_{\text{им}}$  и  $\Delta H_{\text{им}}$  определялся из выражения

$$\Delta_d = \Delta_c + 3S(\dot{\Delta}), \quad (11)$$

где  $\Delta_c$  — систематическая составляющая погрешности имитации,  $S(\dot{\Delta})$  — случайная составляющая погрешности имитации.

По результатам обработки материалов для случая нормированного колебания напряжения предельная погрешность измерения частоты следования импульсов по счетчику  $\Delta f$  оказалась равной  $\pm 0,5\%$  для встроенного прибора, тогда  $\Delta v_{\text{им}} = \pm 0,93$  м/с (или  $1,9\%$ ), т. е. погрешность имитации по всему диапазону измерения скорости соответствует требованиям для поверочного устройства. После воздействия предельных температур и дальнейшей выдержке в нормальных условиях были произведены измерения частоты следования импульсов по счетчику и встроенному прибору по всем имитируемым точкам диапазона измерения  $v$ . Статистическая обработка полученных данных показала, что  $\Delta_c = -0,09$ ,  $S(\dot{\Delta}) = 0,22$  и соответственно  $\Delta v_{\text{им}} = \pm 0,75$  м/с, что от скорости ветра составляет  $1,5\%$ .

Погрешность имитации  $\Delta \alpha_{\text{им}}$  определялась по временному сдвигу между сдвинутой и опорной сериями импульсов путем подключения двух частотомеров, при этом один работал в режиме измерения периода импульсов опорной серии ( $T$ ), второй — в режиме определения временного сдвига между импульсами сдвинутой и опорной сериями ( $t$ ). Реальное значение имитируемого  $\alpha_{\text{им}}$  вычислялось по формуле

$$\alpha_{\text{им}} = \frac{t}{T} \cdot 360^\circ. \quad (12)$$

Одновременно определялись показания  $\alpha_{\text{им}}$  по встроенному прибору. Весь комплекс измерений производился при различных значениях питающего напряжения, а также различных значениях скорости по всему диапазону имитации  $\alpha$  через каждые  $10^\circ$ . Анализ

результатов показал, что погрешность имитации по прибору  $\Delta\alpha_{\text{им}} = \pm 1^\circ$ , а вычисленная по измерениям частотомеров (по  $T$  и  $t$ )  $\Delta\alpha_{\text{им}} = 0,4^\circ$ . После воздействия предельных температур погрешность имитации по встроенному прибору  $\Delta\alpha_{\text{им}} = \pm 1^\circ$ , а вычисленная по формуле (12)  $\Delta\alpha_{\text{им}} = 0,6^\circ$ . Таким образом, погрешность имитации направления ветра также удовлетворяет требованиям, предъявляемым к поверочным устройствам.

Анализ материалов испытаний при исследовании погрешности имитации  $\Delta S_{\text{им}}$ ,  $\Delta H_{\text{им}}$  показал, что в любой точке имитируемого диапазона как для  $S$ , так и для  $H$  систематическая составляющая погрешности  $\Delta_s = 0$ ,  $S(\Delta) = 0$  и соответственно  $\Delta S_{\text{им}} = 0$ ,  $\Delta H_{\text{им}} = 0$ .

Рассмотрим погрешность имитации влажности воздуха. Для этого воспользуемся случаем имитации относительной влажности, измеренной волосным гигрометром (для станции КРАМС). При изменении относительной влажности от 30 до 100 % на выходе ПИП напряжение изменяется от 0,24 до 0,8 В. Схема имитатора выполняется в виде делителя напряжения, с помощью которого на вход УАР дискретно поступают различные значения напряжений  $U$ . Резисторы, составляющие делитель, могут быть изготовлены из манганиновой проволоки или выбираются из числа серийно выпускаемых с разбросом относительно  $R_{\text{ном}}$ , не превышающим 0,5 %.

Погрешность имитации  $\Delta\varphi_{\text{им}}$  в процентах может быть определена по формуле

$$\Delta\varphi_{\text{им}} = \frac{D \Delta\varepsilon}{R_d}, \quad (13)$$

где  $D$  — диапазон измерения  $\varphi$ ,  $\Delta\varepsilon$  — погрешность делителя в омах,  $R_d$  — суммарное сопротивление делителя.

Принимая во внимание, что

$$\Delta\varepsilon = 0,01 R_d \Delta r, \quad (14)$$

где  $\Delta r$  — погрешность относительно  $R_{\text{ном}}$ , применяемых в делителе резисторов (в %), формулу (13) перепишем в виде

$$\Delta\varphi_{\text{им}} = 0,01 D \Delta r. \quad (15)$$

При  $\varphi_{\text{им}} = 100\%$  суммарное сопротивление делителя составит 80 Ом. Этому сопротивлению соответствует диапазон  $D = 85\%$ . Используя резисторы с допустимым отклонением от  $R_{\text{ном}} = \pm 0,5\%$ , можно рассчитать по формуле (15) погрешность  $\Delta\varphi_{\text{им}}$ , которая составит 0,35 % относительной влажности. Учитывая нелинейную зависимость сопротивления делителя фиксируемой влажности, подчиняющуюся числам Гей-Люссака, предел допускаемой погрешности имитации  $\Delta\varphi_{\text{им}}$  можно принять равным 1 % ( $\Delta_d = 1\%$ ).

В заключение можно сделать следующие выводы.

1. Поверку аналоговых каналов устройств автоматики автоматических метеорологических станций целесообразно производить с применением магазинов класса 0,02.

2. Поверку импульсных каналов следует производить с применением специально разработанных импульсных устройств (имитаторов) и серийно выпускаемых счетчиков импульсов.

3. Погрешность имитации при поверке аналоговых станций М-106М и КРАМС с применением серийно выпускаемых магазинов сопротивлений обеспечивает требуемое соотношение точностей образцового и поверяемого устройств. По экспериментальным исследованиям предел допускаемой погрешности имитации аналоговых параметров составил: по температуре воздуха  $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ , по относительной влажности воздуха  $\pm 2\%$ , по температуре точки росы  $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ , по атмосферному давлению  $\pm 0,025$  мбар.

4. Предел допускаемой погрешности имитации  $\Delta_d$  импульсных выходных параметров ПИП составил: по скорости ветра  $\pm 1$  м/с, по направлению ветра  $\pm 1^{\circ}$ , по метеорологической дальности видимости и по высоте нижней границы облаков 0.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рогалев Ю. В. Некоторые результаты поверки аналоговых каналов станции М-106. — «Тр. ГГО», 1974, вып. 340, с. 130—137.
2. Рогалев Ю. В., Сущинский Б. Л., Кузьминых И. П. К методике поверки каналов параметров ветра станции М-106 с применением имитирующих устройств. — «Тр. ГГО», 1974, вып. 340, с. 118—129.

*Ю. В. Роголев*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ЦЕНТРАЛЬНОГО УСТРОЙСТВА МЕТЕОСТАНЦИЙ КРАМС

В статье приведены результаты экспериментального исследования погрешности центрального устройства (ЦУ) станции КРАМС по каналу измерения скорости ветра и атмосферного давления, показан вид закона распределения погрешностей на выходе ЦУ при измерении скорости ветра и дана методика расчета имитируемых значений атмосферного давления на вход ЦУ.

Исследования по каналу измерения скорости ветра проводились с применением разработанного в ГГО для этих целей имитатора, позволяющего получать на выходе электрические импульсы, частота следования которых охватывает диапазон от 100 до 1700 Гц, соответствующий диапазону имитируемых скоростей ветра (1—60 м/с).

Поскольку число оборотов ветроприемника станции (частота следования импульсов  $f$ ) линейно зависит от скорости воздушного потока  $v$  [1], расчет значений  $v$  по заданным (фиксированным) частотам с выхода имитатора можно осуществить по формуле

$$v = k \cdot f, \quad (1)$$

где  $k$  — коэффициент пересчета для конкретного ветроприемника;  $f$  — постоянное число импульсов с выхода имитатора.

Коэффициент пересчета  $k$  определяется по верхнему пределу скорости ветра, измеряемой станцией ( $v = 60$  м/с), и соответствующему этому пределу числу импульсов, вырабатываемых с выхода ветроприемника ( $n = 108$ ), по формуле

$$k = \frac{v}{n} = \frac{60}{108} = 0,55. \quad (2)$$

Для расчета значений  $v$  м/с с выхода имитатора применялась формула

$$v = k \frac{\bar{n}}{t}, \quad (3)$$

где  $\bar{n}$  — среднее из 10 отсчетов число импульсов, зафиксированных

с выхода имитатора для каждой из семи фиксированных точек;  $t$  — время осреднения, равное 100 с.

При подсчете импульсов с выхода имитатора применялся пересчетный прибор ПСО2-08. Результаты расчета по формуле (3) при  $k=0,55$  представлены в табл. 1.

Погрешность имитации скорости ветра  $v$  м/с на выходе имитатора будет определяться двумя составляющими:  $\delta v'$  вызывается нестабильностью вырабатываемых импульсов задающим генератором импульсов (ЗГИ) и  $\delta v''$  вызывается несинхронностью включения и выключения секундомера и контрольного счетчика импульсов за интервал осреднения, равный 100 с.

Таблица 1

|                                     |      |      |       |       |       |       |       |
|-------------------------------------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Число импульсов в 1 с . . . . .     | 2,42 | 6,15 | 12,84 | 19,06 | 28,27 | 54,77 | 74,86 |
| Исследуемая скорость, м/с . . . . . | 1,3  | 3,4  | 7,1   | 10,5  | 15,5  | 30,1  | 41,2  |

Составляющую  $\delta v'$  примем равной нулю, так как температурный режим работы ЗГИ и всех его составных элементов находится в пределах  $20 \pm 5^\circ\text{C}$  и уход параметров составных элементов находится в допустимых пределах и не вносит ошибки в последовательность импульсов с выхода имитатора.

В основном погрешность имитации скорости  $v_{\text{им}}$  будет определяться составляющей  $\delta v''$ . По полученным экспериментальным дан-

Таблица 2

| Статистическая характеристика | Положения переключателя диапазона частот имитатора |       |       |       |       |       |       |
|-------------------------------|----------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                               | 1                                                  | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     |
| Частота импульсов             |                                                    |       |       |       |       |       |       |
| $S(\Delta)$                   | 2,42                                               | 6,15  | 12,84 | 19,06 | 28,27 | 54,77 | 74,86 |
| $3S(\Delta)$                  | 0,022                                              | 0,019 | 0,016 | 0,022 | 0,020 | 0,030 | 0,031 |
| $\bar{n}_{10}$ имп/с          | 0,07                                               | 0,06  | 0,05  | 0,07  | 0,07  | 0,09  | 0,09  |
| Скорость ветра                |                                                    |       |       |       |       |       |       |
| $S(\Delta)$                   | 1,33                                               | 3,38  | 7,06  | 10,48 | 15,55 | 30,12 | 41,18 |
| $3S(\Delta)$                  | 0,010                                              | 0,010 | 0,010 | 0,012 | 0,012 | 0,018 | 0,010 |
| $\bar{v}_{10}$ м/с            | 0,03                                               | 0,03  | 0,03  | 0,04  | 0,04  | 0,05  | 0,03  |

ным для семи фиксированных значений частот с выхода имитатора были рассчитаны характеристики  $S(\Delta)$  и  $3S(\Delta)$  и их значения в тех же фиксированных точках диапазона в величинах скорости ветра (табл. 2).

Как показали исследования, разброс импульсов, определяемый за 1 с и достигающий наибольшего значения  $\Delta n=9$ , несущественно влияет на погрешность имитации скорости ветра для любой из фиксированных точек. Значение скорости будет изменяться в сотом зна-

ке, что в нашем случае вполне допустимо, тем более, что информация о параметрах ветра с выхода ЦУ фиксируется до целых метров.

Таким образом, точностные характеристики имитатора обеспечивают допустимую погрешность имитации значений скорости ветра с 3-кратным запасом по точности.

В процессе поверки на каждой из поверяемых точек диапазона было проделано по 15 отсчетов для значений  $v_{\text{ср}}$  и  $v_{\text{макс}}$ . Общее количество измерений составило 210. С выхода имитатора задается

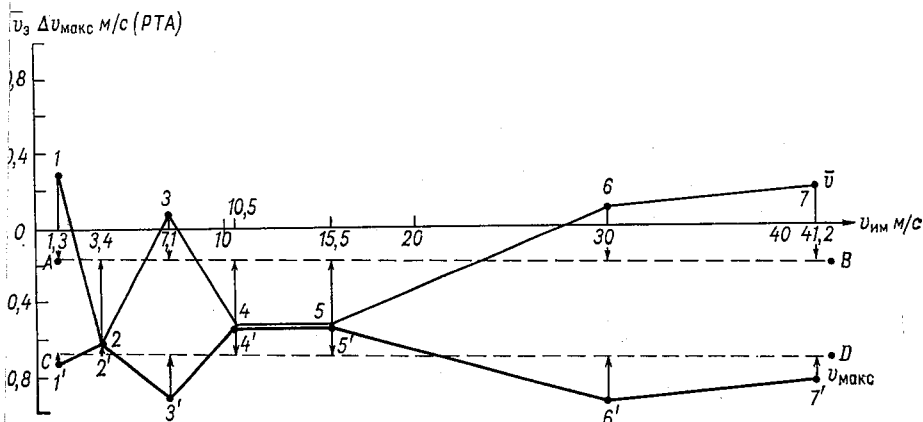


Рис. 1. Распределение погрешности показаний для  $v_{\text{ср}}$  и  $v_{\text{макс}}$  на выходе ЦУ по диапазону.

одно и то же значение имитируемой скорости ветра, т. е. процесс поверки осуществляется в статическом режиме и, следовательно, фиксируемые численные значения  $v_{\text{ср}}$  и  $v_{\text{макс}}$  следует брать не за 10-минутный интервал осреднения, а рассчитывать за 2-минутные интервалы, так как  $\bar{v}_1 = \bar{v}_2 = \dots = \bar{v}_{10}$ . Метод дискретно-скользящего осреднения за 2-минутные интервалы, выполняемые ЦУ станции, исследован в [2, 3].

На рис. 1 показано отклонение средних арифметических значений  $\bar{v}_{\text{ср}}$  и  $\bar{v}_{\text{макс}}$  в точках поверки. По характеру и знаку они относятся к систематическим  $\Delta_c$  (табл. 3).

Как видно из рис. 1 и табл. 3, знак и численное значение систематической составляющей  $\Delta_c$  меняется при переходе с одной точки поверки на другую для  $v_{\text{ср}}$ . Для  $v_{\text{макс}}$  знак остается одним и тем же, но меняется его численное значение. И в том и другом случае имеется разброс относительно некоторого среднего значения скорости ветра, регистрируемого на выходе ЦУ. Требуется отыскать теоретическую результирующую функцию, которая удовлетворяет условию наименьшего отклонения экспериментальных результатов поверки. По полученной экспериментальной функции распределения погрешностей измерения ЦУ значений  $\bar{v}_{\text{ср}}$  и  $\bar{v}_{\text{макс}}$  требуется охарактеризо-

вать и нормировать эти погрешности. За исходную функцию распределения погрешностей  $\varphi$  примем функцию, полученную экспериментально  $y_a = \Delta\varphi(v)$ , где  $v$  — измеряемая величина, причем в результате поверки обычно принимаются дискретные значения  $v$  и  $\Delta\varphi$ . Теоретическую результирующую функцию напомним в виде  $y_t = \Delta\varphi(v)$  и потребуем, чтобы она удовлетворяла условию наименьшего отклонения от нее полученных экспериментальных точек поверки (точки 1—1', 2—2', 3—3', ..., 7—7' на рис. 1), а также наилучшим образом описывала закон изменения погрешностей преобразования ЦУ по диапазону. В нашем случае полученную экспериментально функцию

Таблица 3

| $v_{\text{нм}}$ м/с | $\Delta v$ м/с | $v_{\text{зм}}$ м/с | $\Delta v$ м/с |
|---------------------|----------------|---------------------|----------------|
| 1,3                 | +0,7           | 15,5                | -0,5           |
|                     | -0,7           |                     | -0,5           |
| 3,4                 | -0,6           | 30,1                | +0,1           |
|                     | -0,6           |                     | -0,9           |
| 1,7                 | +0,1           | 41,2                | +0,7           |
|                     | -0,9           |                     | -0,8           |
| 10,5                | -0,5           |                     |                |
|                     | -0,5           |                     |                |

$y_a = \Delta\varphi(v)$  представляется целесообразным интерполировать теоретической линейной функцией вида  $y_t = av + b$ , где постоянные коэффициенты  $a$  и  $b$  выбираются наилучшим образом, а  $v$  — дискретные значения измеряемой величины. При замене  $y_a$  на  $y_t$  возникает погрешность интерполяции  $\varepsilon$ , которая может быть ограничена методом приближения средних, или методом наименьших квадратов [4, 5].

Выражение для  $\varepsilon$  можно записать в виде

$$\varepsilon = y_t - y_a = av + b - y_a. \quad (4)$$

Так как в процессе поверки было выбрано семь точек, то, следовательно, для любой из семи точек диапазона составляется начальное уравнение вида

$$\varepsilon_n = a v_n + b - y_{a_n}, \quad (5)$$

где  $n = 1, 2, \dots, 7$ .

Обработку результатов поверки будем производить методом наименьших квадратов, так как этот метод дает однозначный ответ и не зависит от способа группировки начальных уравнений. Рассчитаем уравнение интерполяционной прямой по данным поверки для  $v_{\text{ср}}$ . Исходные данные представлены в табл. 4.

$\sum_{i=1}^n \varepsilon_n^2 = \min$ . Для каждой точки проверки по диапазону составлены начальные уравнения в виде

$$\varepsilon_n^2 = (av_{cp}n + b - y_{\varepsilon_n})^2. \quad (6)$$

Возведя в квадрат и суммируя по  $n$  точкам поверки, получим:

$$\sum_{i=1}^{i=n} (a^2 v_{\text{cp}}^2 n + b^2 + y_{\text{sn}}^2 + 2av_{\text{cp}}nb - 2av_{\text{cp}}ny_{\text{sn}} - 2y_{\text{sn}}b) = \sum_{i=1}^{i=n} \epsilon_n^2. \quad (7)$$

Беря частную производную из (7) по параметру  $a$  и принимая при этом  $b = \text{const}$ , имеем

$$\frac{\partial}{\partial a} \sum_{i=1}^{i=n} = \sum_{i=1}^{i=n} (2av_{2p}n + 2v_{cp}nb - 2v_{cp}ny_{s_n}) = 0. \quad (8)$$

Аналогично для  $b$  при  $a = \text{const}$  получим

$$\frac{\partial}{\partial b} \sum_{i=1}^{i=n} = \sum_{i=1}^{i=n} (2b + 2av_{cp}n - 2y_{\mathfrak{z}_n}) = 0. \quad (9)$$

Из (8) и (9) видно, что для нахождения интерполяционной прямой левую часть каждого начального уравнения (для нашего случая количество начальных уравнений равно семи) необходимо умножить

Таблица 4

| Контрольные точки     | Положение переключателя диапазона скоростей имитатора |      |      |      |      |      |      |
|-----------------------|-------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|
|                       | 1                                                     | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    |
| $v_{им} = x$          | 1,3                                                   | 3,4  | 7,1  | 10,5 | 15,5 | 30,1 | 41,2 |
| $\Delta v_{рТА} = y$  | +0,3                                                  | -0,6 | +0,1 | -0,5 | -0,5 | +0,1 | +0,2 |
| $\Delta v_{макс} = y$ | -0,7                                                  | -0,6 | -0,9 | -0,5 | -0,5 | -0,9 | -0,8 |

на соответствующий коэффициент при первом неизвестном параметре с дальнейшим сложением получаемых произведений и приравниваем их к нулю. Используя экспериментальные данные поверки (табл. 4), для  $v_{\text{ср}}$  получим:

$$\begin{array}{ll}
 (a \cdot 1,3 + b - 0,3) \cdot 1,3 & a \cdot 1,3 + 1 \cdot b - 0,3 \\
 (a \cdot 3,4 + b - 0,6) \cdot 3,4 & a \cdot 3,4 + 1 \cdot b - 0,6 \\
 (a \cdot 7,1 + b - 0,1) \cdot 7,1 & a \cdot 7,1 + 1 \cdot b - 0,1 \\
 \dots & \dots \\
 (a \cdot 41,2 + b - 0,2) \cdot 41,2 & a \cdot 41,2 + 1 \cdot b - 0,2
 \end{array}$$

Произведя умножение, а затем сложение почленно, получим два нормальных уравнения:

$$\left. \begin{aligned} 3017,64a + 109,1b - 27,39 &= 0 \\ 109,10a + 7,0b - 2,3 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Решая систему полученных уравнений (10) относительно  $a$  и  $b$ , находим численные их значения, которые соответственно будут равны  $-0,0064$  и  $0,42$ . Окончательно уравнение интерполяционной прямой примет вид

$$y = -0,0064v_{\text{ср}} + 0,42. \quad (11)$$

Аналогично для  $v_{\text{макс}}$  уравнение прямой (используя данные табл. 4) будет

$$y = 0,0045v_{\text{макс}} + 0,62. \quad (12)$$

Полученные уравнения интерполяционных прямых для  $v_{\text{ср}}$  и  $v_{\text{макс}}$  будут наилучшим образом характеризовать результирующую функцию распределения погрешности преобразования ЦУ по диапaзону.

Таблица 5

| Проверяемый параметр, м/с | Положение переключателя диапaзона скоростей имитатора |       |       |       |       |       |       |
|---------------------------|-------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                           | 1                                                     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     |
| $\overline{\Delta v}$     | +0,45                                                 | -0,45 | +0,24 | -0,34 | -0,33 | +0,29 | +0,74 |
| $\Delta v_{\text{макс}}$  | -0,06                                                 | +0,04 | -0,24 | +0,16 | -0,26 | -0,22 | -0,10 |

Отклонения от интерполяционных прямых для  $v_{\text{ср}}$  (прямая  $AB$  на рис. 1) и для  $v_{\text{макс}}$  (прямая  $CD$  на рис. 1) можно принять за центрированную случайную погрешность и описать ее вероятностными статистическими характеристиками, т. е. определить  $S(\hat{\Delta})$ ,  $3S(\hat{\Delta})$  и  $\delta_{\text{пр}}$  по диапaзону измерения ( $1,3 \div 41,2$  м/с). Отклонения значений  $\Delta v_{\text{ср}}$  и  $\Delta v_{\text{макс}}$  от полученных интерполяционных прямых представлены в табл. 5. Как видно из рис. 1 интерполяционные прямые будут соответствовать погрешности преобразования ЦУ значений  $v_{\text{ср}}$  и  $v_{\text{макс}}$ , которая постоянна по диапaзону измерения (аддитивная погрешность) и равна для  $\gamma_{v_{\text{ср}}} = -0,17$  м/с и для  $\gamma_{v_{\text{макс}}} = -0,67$  м/с.

Расчет значений  $S(\hat{\Delta})$  и  $3S(\hat{\Delta})$  показал, что в этом случае для  $v_{\text{ср}}$  величина  $S_{v_{\text{ср}}} = 0,39$ , а  $3S_{v_{\text{ср}}} = 1,17$  м/с, а для  $v_{\text{макс}}$  величина  $S_{v_{\text{макс}}} = 0,16$  и  $3S_{v_{\text{макс}}} = 0,48$  м/с. Так как составляющая погрешности  $\gamma$  не зависит от значения измеряемой величины  $v$ , то ее следует нормировать в виде абсолютной погрешности  $|\gamma|$ , а предел допускаемой погрешности измерения ЦУ по всему диапaзону — двучленной формулой вида

$$\Delta_{\text{д. ЦУ}} = \pm [|\gamma| + 2S(\hat{\Delta})]. \quad (13)$$

В соответствии с (13) для  $v_{\text{ср}}$  численное значение  $\Delta_{\text{д. ЦУ}} = \pm[0,17+0,82] = \pm 0,99$  м/с, а для  $v_{\text{макс}}$  значение  $\Delta_{\text{д. ЦУ}} = \pm[0,67+0,28] = \pm 0,95$  м/с.

При определении вида закона распределения погрешности на выходе ЦУ по каналу параметров ветра следует учитывать, что в системе ПП-БВПВ-ЦУ текущее значение входного параметра  $v$  преобразуется путем равномерного квантования в дискретные значения с шагом  $\Delta h = 0,55$  м/с.

Из анализа полученных при проверке погрешностей ( $\Delta v_{\text{ср}}$  и  $\Delta v_{\text{макс}}$ ), можно заключить, что все возможные значения  $\Delta v_{\text{ср}}$  и  $\Delta v_{\text{макс}}$  равновероятны и лежат в пределах некоторого интервала  $[-\alpha; +\alpha]$ , т. е. распределение погрешностей равномерно. Отсюда значения дифференциальной функции распределения равномерно распределенных случайных погрешностей в данном интервале постоянны, а вне его равны нулю:

$$f(\Delta \bar{v}_{\text{ср}}, \Delta v_{\text{макс}}) = \begin{cases} 0 & \text{при } -\infty < \Delta v_{\text{ср}}, \Delta v_{\text{макс}} < -\alpha \\ C & \text{при } -\alpha < \Delta v_{\text{ср}}, \Delta v_{\text{макс}} < +\alpha \\ 0 & \text{при } +\alpha < \Delta v_{\text{ср}}, \Delta v_{\text{макс}} < +\infty \end{cases} \quad (14)$$

Значение  $C$  находят из условия нормирования функции (14) в виде

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(\Delta v_{\text{ср}}, \Delta v_{\text{макс}}) d(\Delta v_{\text{ср}}, \Delta v_{\text{макс}}) = \int_{-\alpha}^{+\alpha} C d(\Delta v_{\text{ср}}, \Delta v_{\text{макс}}) = 2 \alpha C = 1, \quad (15)$$

откуда  $C = 1/2\alpha$ .

По результатам распределений частных отклонений разностей между имитированными значениями скорости и значениями, полученными на выходе ЦУ (по всей совокупности измерений), была построена гистограмма для определения вида закона распределения погрешностей для  $v_{\text{ср}}$  и  $v_{\text{макс}}$ . Как показали исследования, распреде-

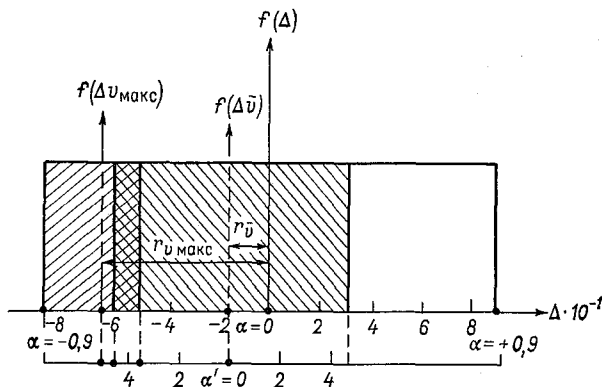


Рис. 2. Вид закона распределения погрешности на выходе ЦУ для  $v_{\text{ср}}$  и  $v_{\text{макс}}$  в диапазоне от 1 до 41 м/с.

ление погрешностей  $\Delta v_{\text{ср}}$  и  $\Delta v_{\text{макс}}$  можно аппроксимировать равномерным законом (рис. 2), причем центр распределения смещен в левую область на величину  $\gamma$ .

Имитируемые значения атмосферного давления охватывают диапазон 950—1080 мбар.

Действие первичного измерительного преобразователя основано на весокомпенсационном принципе измерения атмосферного давления [6] с пропорциональным преобразованием на выходе его отношения электрического сопротивления.

Таким образом, на вход ЦУ необходимо имитировать отношение  $R_1/R_2$  сопротивлений плеч потенциометра.

Расчет имитируемых значений  $R_1$  и  $R_2$  осуществляется исходя из данных потенциометра, а именно  $R_1 + R_2 = R_{\text{общ}} = 5000$  Ом и  $\Delta p = 130$  мбар по формулам:

$$\left. \begin{aligned} R_2 &= \left( \frac{R_{\text{общ}}}{\Delta p} \right) (p' - p_0) \\ R_1 &= R_{\text{общ}} - R_2 \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

где  $p'$  — требуемое значение имитируемого атмосферного давления в мбар,  $p_0 = 950$  мбар — начальная установка давления, заложенная в ЦУ.

Таблица 6

| $p'$ мбар | $R_1$ Ом | $R_2$ Ом | $p'$ мбар | $R_1$ Ом | $R_2$ Ом |
|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
| 950       | 5000     | 0        | 1020      | 2307,8   | 2692,4   |
| 960       | 4615,4   | 384,6    | 1030      | 1923,2   | 3076,8   |
| 970       | 4230,8   | 769,2    | 1040      | 1538,6   | 3461,4   |
| 980       | 3846,2   | 1153,8   | 1050      | 1154,0   | 3846,0   |
| 990       | 3461,6   | 1538,4   | 1060      | 769,4    | 4230,6   |
| 1000      | 3077,0   | 1823,0   | 1070      | 384,8    | 4615,2   |
| 1010      | 2692,4   | 2307,6   | 1080      | 0        | 5000     |

В табл. 6 представлен расчет значений  $R_1$  и  $R_2$  по формуле (16) через 10 мбар в диапазоне от 950 до 1080 мбар.

В качестве устройств, имитирующих отношение сопротивлений плеч потенциометра, использовались магазины сопротивлений МСР-60М, подключаемые ко входу ЦУ.

Погрешность имитации  $p$  определяется погрешностью задания  $R_1$  и  $R_2$  и в свою очередь классом точности применяемых магазинов сопротивлений. Изменению атмосферного давления  $\Delta p$  на 130 мбар должно соответствовать изменение сопротивления потенциометра на 5000 Ом. Таким образом, на 1 мбар приходится 38,46 Ом. Максимальная погрешность имитации  $\Delta p_{\text{им}}$  будет наблюдаться в гранич-

ных точках поверяемого диапазона при  $R_1=5000$  Ом,  $R_2=0$  и  $R_1=0$ ,  $R_2=5000$  Ом. Изменение имитируемого сопротивления  $R_1$  и  $R_2$  на 0,384 Ом будет соответствовать значению  $\Delta p_{\text{им}}=0,01$  мбар. Принимая во внимание класс точности магазина 0,02%, погрешность задания величин  $R_1$  и  $R_2$  составит  $\Delta R_1=\Delta R_2=\pm 0,02$  Ом, что в значении атмосферного давления  $\Delta p_{\text{им}}=0,0005$  мбар и вполне обеспечивает необходимую погрешность имитации.

Поверка осуществлялась в семи точках диапазона измерения, включая и граничные точки. Значение температуры воздуха при ПИП давления имитировалось магазином сопротивлений, на котором было установлено сопротивление, соответствующее температуре  $t_b=\pm 20,0^\circ\text{C}$ . Поверка осуществлялась также при  $t_b=-49,57^\circ\text{C}$  и  $t_b=+51,39^\circ\text{C}$ . В этом случае поправка на температуру  $\Delta p_t$  рассчитывалась по формуле и вводилась в результат, регистрируемый на выходе ЦУ:

$$\Delta p_t = k(t_b - 20^\circ\text{C}), \quad (17)$$

где  $t_b$  — имитируемая температура воздуха в  $0^\circ\text{C}$ ,  $k$  — температурная поправка, равная  $-0,05$  мбар и заложенная как постоянная величина в ЦУ станции. Полученные экспериментальные результаты поверки показали, что при  $t_b=+20,00^\circ\text{C}$  погрешность преобразования ЦУ оказалась равной нулю ( $\Delta_{\text{д. ЦУ}}=0$ ) на любой из поверяемых точек диапазона. При имитации  $t_b=+51,39^\circ\text{C}$  в точках поверки 950 и 1080 мбар отклонение от имитируемых на вход ЦУ значений  $p_{\text{им}}$  и полученных на выходе (РТА) при многократных измерениях ( $n=30$ ) составило  $\Delta p=-0,02$  мбар. При имитировании  $p_{\text{им}}=960$  мбар отклонение  $\Delta p=-0,07$  мбар. В точках поверки 990, 1010 и 1050 мбар отклонения  $\Delta p=0$ .

При имитации  $t_b=-49,57^\circ\text{C}$  в точках поверки, где  $p_{\text{им}}=950$  мбар,  $p_{\text{им}}=960$  мбар и  $p_{\text{им}}=1080$  мбар, отклонения  $\Delta p$  на выходе ЦУ от имитированных значений составили  $\Delta p=-0,02$  мбар (при  $n=30$ ). В точках поверки, где  $p_{\text{им}}=1010$  мбар и  $p_{\text{им}}=1050$  мбар, значение  $\Delta p=0$ .

Учитывая, что максимальное отклонение  $\Delta p$  на выходе ЦУ составляет 0,07 мбар, предел допускаемой погрешности измерения ЦУ в диапазоне  $t_b$  от  $+50$  до  $-50^\circ\text{C}$  и в диапазоне давления от 950 до 1080 мбар следует нормировать величиной

$$\Delta_{\text{д. ЦУ}} = p_{i(\text{РТА})} - p_{i(\text{им})} \leq \pm 0,07 \text{ мбар}. \quad (18)$$

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грушин С. И., Протопопов Н. Г. Датчик параметров ветра. — «Тр. ГГО», 1966, вып. 199, с. 69—77.
2. Протопопов Н. Г. Метод и устройство для осуществления «скользящего» осреднения и их использование для регистрации скорости ветра. — «Тр. ГГО», 1960, вып. 103, с. 103—112.

3. Афиногенов Л. П., Протопопов Н. Г., Шадренова Л. Е., Мисонжников Е. Я. Измерение параметра ветра аэродромной автоматической метеорологической станцией. — «Тр. ГГО», 1971, вып. 259, с. 78—83.
4. Зайдель А. Н. Ошибки измерений физических величин Л., «Наука», 1974, с. 69—76.
5. Долинский Е. Ф. Обработка результатов измерений. М., Изд. «Стандарт», 1973, с. 48—118.
6. Карпуша В. Е. Компенсационный датчик атмосферного давления. — «Тр. ГГО», 1968, вып. 216, с. 106—137.

*Ю. В. Роголев*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ УСТРОЙСТВА АВТОМАТИКИ И РЕГИСТРАЦИИ СТАНЦИИ М-106М

В технической документации на автоматические метеорологические станции приводятся нормированные значения предельной допустимой погрешности измерения на первичные измерительные преобразователи (ПИП)  $\Delta_{\text{д. пип}}$  и на канал измерения в целом  $\Delta_{\text{д. к.}}$ . Погрешность устройства автоматики и регистрации (УАР) —  $\Delta_{\text{д. уар}}$  не нормируется. Между тем составляющую погрешности, вносимую УАР, а также закон распределения этой погрешности необходимо учитывать при оценке погрешности на выходе канала измерения и при выполнении поверочных работ в процессе эксплуатации станции.

Для обоснования нормирования величины  $\Delta_{\text{д. уар}}$  нами были проведены метрологические исследования УАР, результаты которых приводятся в настоящей статье.

Устройство автоматики и регистрации современных автоматических метеорологических станций (АМС) представляет собой сложное электронное устройство, осуществляющее операции по обработке и измерению электрических сигналов, поступающих с ПИП, в физические значения измеряемых метеоэлементов.

Преобразованные в ПИП значения метеоэлементов реализуются на их выходе в виде аналоговых и импульсных сигналов, которые поступают на вход УАР в виде функциональных зависимостей:

$$\left. \begin{aligned} R_t &= f(t) \\ R_1/R_2 &= f(p) \\ n &= f(v) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $p$  — атмосферное давление,  $t$  — температура воздуха,  $v$  — скорость ветра,  $R$  — электрическое сопротивление,  $n$  — число импульсов.

Наиболее жесткие требования предъявляются к точности измерения температуры и влажности воздуха, атмосферного давления

и скорости ветра. Поэтому анализ погрешности измерения УАР целесообразно было проводить прежде всего по этим элементам.

Величину  $\Delta_{д.к}$  по любому из каналов измерения АМС можно представить в общем виде суммой двух составляющих:

$$\Delta_{д.к} = \Delta_{д.УАР} + \Delta_{д.ПВП}, \quad (2)$$

где  $\Delta_{д.УАР}$  — предел допускаемой погрешности преобразования входного сигнала от ПВП в УАР,  $\Delta_{д.ПВП}$  — предел допускаемой погрешности измерения метеозлемента ПВП.

Рассмотрим источники погрешностей  $\Delta_{д.УАР}$  для случая измерения аналоговых параметров.

Устройство измерения аналоговых параметров (УИАП) представляет собой автоматические уравнивающиеся мосты с позарядным уравниванием двух типов: мосты для измерения активных сопротивлений и мосты для измерения отношения активных сопротивлений. Уравнивающим элементом мостов является реохорд, в котором осуществляется позарядное уравнивание с набором кода в численном соответствии с измеряемой физической величиной (метеозлементам) [1, 2].

При аналого-цифровом преобразовании неизбежно возникают принципиально не устранимые погрешности, являющиеся погрешностями методическими. Выходная величина аналоговых ПВП преобразуется в код, для образования которого измеряемая непрерывная величина квантуется по параметру и по времени. При этом одновременно осуществляется операция интерполяции (линейная и ступенчатая) функций (1). Исходя из этого и учитывая, что при работе УАР возможно появление погрешностей за счет неточности подгонки нуля (или уход нуля) моста и изменение наклона характеристик, величина  $\Delta_{д.УАР}$  может быть представлена суммой составляющих:

$$\Delta_{д.УАР} = \delta_{п} + \delta_{в} + \delta_0 + \delta_{н.х}, \quad (3)$$

где  $\delta_{п}$  — погрешность квантования по параметру (уровню),  $\delta_{в}$  — погрешность квантования по времени,  $\delta_0$  — погрешность, обусловленная уходом нуля измерительного моста,  $\delta_{н.х}$  — погрешность, обусловленная изменением наклона (крутизны) характеристик.

Рассмотрим причины возникновения этих погрешностей.

1. Из семейства градуировочных характеристик аналоговых ПВП в УИАП закладывается усредненная статическая характеристика, которую можно представить в виде

$$Y = a \pm KR_t(t), \quad (4)$$

где  $a$  — коэффициент, определяющий начальную установку моста (установка нуля),  $K$  — коэффициент, определяющий крутизну (наклон) характеристики моста. Следует отметить, что функциональная зависимость  $R_t = f(t)$ , реализуемая на выходе УАР, не имеет экстремальных значений и изменяется плавно, представляя собой экспоненциальную функцию. Поэтому квантование по параметру

обычно делается равномерным, т.е. значение каждого кванта  $\Delta h$  выбирается равным по всему диапазону. В результате этого непрерывная функция  $R_t = f(t)$  заменяется ступенчатой. Кроме этого функция  $R_t = f(t)$  непрерывного аргумента  $t$  становится функцией дискретного аргумента  $\Delta t$  и любое значение  $R_t$  округляется до ближайшего значения  $R_{t_i}$ .

В этом случае процесс квантования аналоговой величины по параметру можно представить в виде равенства:

$$R_{t_i} = R_t \pm \frac{1}{2} \Delta h, \quad (5)$$

где  $\Delta R_t = \Delta h$  — шаг квантования.

Очевидно, что при достаточно малом  $\Delta h$  погрешность квантования будет равна

$$\Delta_{\Delta h} = R_t(t) - R_t(\Delta t), \quad (6)$$

т.е. методическая погрешность квантования будет тем меньше, чем меньше  $\Delta h$ , но до определенного предела, представляющего собой максимальное значение случайной помехи  $\varepsilon$  ( $\varepsilon < 0,5 \Delta h$ ). Тогда мгновенная погрешность в интервале квантования может быть представлена как изменяющаяся линейно в диапазоне от  $+0,5 \Delta h$  до  $-0,5 \Delta h$ . Диапазон  $D$  измерения и преобразования входных сигналов от ПИП много больше  $\Delta h$ , т.е.  $D \gg \Delta h$  и незначительное изменение  $R_t(t)$  становится соизмеримо с  $\Delta h$ . Таким образом, в некоторый момент измерения  $R_{t_i}$  функция  $R_t(t)$  с равной вероятностью будет принимать любое значение в пределах  $\Delta h$  около одного из уровней с интервалом  $R_{t_{i-1}} \leq R_{t_i} \leq R_{t_{i+1}}$  и  $\Delta_{\Delta h}$  будет являться случайной погрешностью, для которой можно определить среднюю квадратическую погрешность квантования по параметру  $S(\Delta)$ . В этом случае закон распределения будет равномерным с равномерной плотностью распределения  $\Delta_{\Delta h}$ , для которого справедливо выражение

$$\left. \begin{aligned} y = (\Delta_{\Delta h}) &= \frac{1}{\Delta h} \text{ при } \Delta_{\Delta h} \leq \Delta h \\ y = (\Delta_{\Delta h}) &= 0 \text{ при } \Delta_{\Delta h} > \Delta h \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Отсюда, дисперсию  $d_{\Delta h}$  случайной величины  $\Delta_{\Delta h}$  найдем относительно среднего значения шага квантования  $0,5 \Delta h$ .

Учитывая (7), получим

$$d_{\Delta h} = \frac{1}{\Delta h} \int_0^{\Delta h} \left( \Delta_{\Delta h} - \frac{\Delta h}{2} \right)^2 d \Delta_{\Delta h} = \frac{(\Delta h)^2}{12}. \quad (8)$$

Выражение для  $S(\Delta)$  получим, исходя из (8), как

$$S(\Delta) = \sqrt{d_{\Delta h}} = \sqrt{\frac{(\Delta h)^2}{12}} = \frac{\Delta h}{2\sqrt{3}}. \quad (9)$$

Формулы (8) и (9) справедливы при операции уравнивания моста с односторонним действием (подход к точке равновесия осуществляется всегда с одной стороны). В этом случае закон распределения  $\Delta_{\Delta h}$  будет равномерным, несимметричным. При реверсном подходе к точке равновесия закон распределения  $\Delta_{\Delta h}$  будет равномерным и симметричным, а выражение для  $S(\Delta)$  переписется в виде

$$S(\Delta) = \frac{\Delta h}{\sqrt{3}}. \quad (10)$$

Для данного случая, при  $\Delta h = 0,05^\circ\text{C}$ , значение  $S(\Delta) = 0,03^\circ\text{C}$ .

2. Составляющая погрешности  $\delta_b$  обусловливается выбором числа отсчетов в зависимости от вида закона изменения измеряемой входной величины. Как отмечалось ранее, зависимость  $R_t = f(t)$  является экспонентой, ограниченной участком диапазона измерения и преобразования УАР значений сопротивления  $R_t$ . Таким образом, требуется выбрать удовлетворительный критерий частоты квантования по времени путем замены преобразуемой входной функции более простой аппроксимирующей функцией удовлетворяющей заданной погрешности аппроксимации.

В УАР станции осуществляется одновременно кусочно-линейная и ступенчатая аппроксимации, т. е. составляющая  $\delta_b$  является функцией двух составляющих  $\delta_b = f(\Delta_{л.а}, \Delta_{с.а})$ , где  $\Delta_{л.а}$  — составляющая погрешности линейной аппроксимации и  $\Delta_{с.а}$  — составляющая погрешности ступенчатой аппроксимации.

При кусочно-линейной аппроксимации широко применяется интерполяционная формула Ньютона [3, 4], представляющая собой полином. При аппроксимации функции  $R_t = f(t)$  полиномом  $\varphi_t = f(t)$ , совпадающим с заданной функцией в  $n$  точках, погрешность аппроксимации определяется остаточным членом интерполяционной формулы:

$$| \delta_{л.а}(t) | \leq \frac{1}{2} \frac{d^2 R(t)}{dt^2} (n - n_i)(n - n_{i+1}), \quad (11)$$

где  $n$ ,  $n_i$  и  $n_{i+1}$  — интервалы между точками отсчетов  $n_i < n < n_{i+1}$ .

Из формулы (11) видно, что погрешность при кусочно-линейной аппроксимации будет наибольшей на тех участках изменения функции  $R_t = f(t)$ , где модуль второй производной достигает наибольшего значения. Не делая промежуточных преобразований, которые подробно изложены в литературе [5, 6, 7, 8, 9, 10], и считая, что допустимое значение абсолютной погрешности от аппроксимации ( $\Delta_{л.а}$ ) обычно задано при конструкторской разработке, можно

определить необходимый интервал квантования по времени  $\Delta t$ , при котором погрешность от квантования будет наименьшей:

$$\Delta t = \sqrt{\frac{8 \Delta_{\text{л. а}}}{\frac{d^2 R(t)}{dt^2}}}. \quad (12)$$

Учитывая привязку измерительного моста УАР в  $n$  точках диапазона (обычно  $n=10 \div 12$ ), составляющая погрешности  $\Delta_{\text{л. а}}$  определяется из формулы

$$\Delta_{\text{л. а}} \leq \frac{1}{(\Delta h)^2} \frac{\left[ \frac{d^2 R(t)}{dt^2} \right]_{\text{макс}}}{8}. \quad (13)$$

Эта погрешность зависит также от числа аппроксимирующих прямых и от крутизны аппроксимирующей прямой  $R_t = f(t)$  относительно центра этой прямой. Расчет показал, что  $\Delta_{\text{л. а}} = 0,10^\circ\text{C}$ .

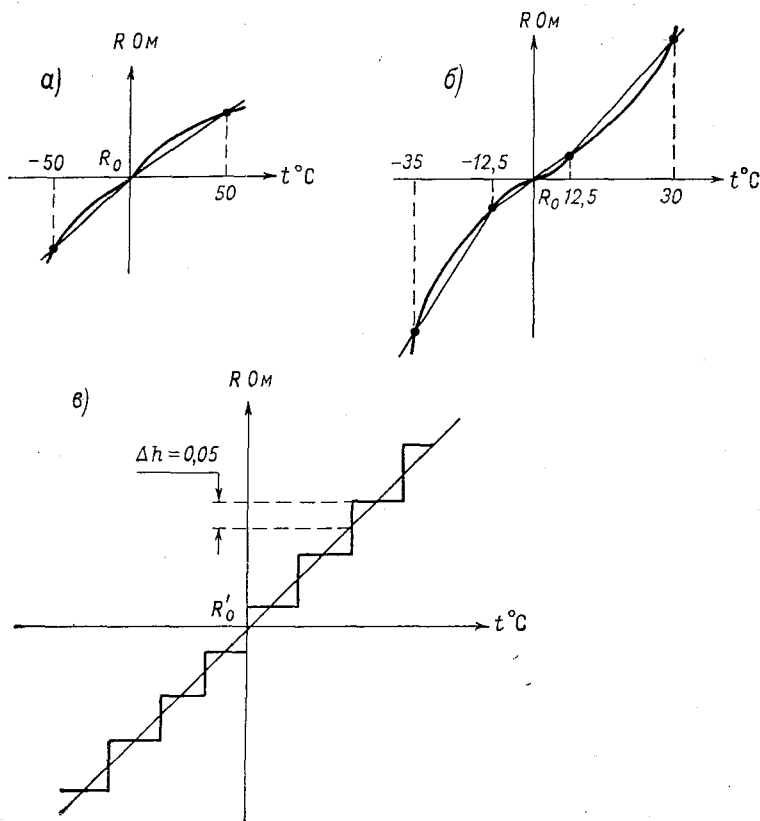


Рис. 1. Виды аппроксимации преобразуемой входной функции в УАР.

При ступенчатой аппроксимации максимальная погрешность  $\Delta_{с.а}$  определяется наибольшим значением первой производной на наиболее крутом участке изменения аппроксимируемой функции. Для оценки погрешности  $\Delta_{с.а}$  в произвольной точке интервала аппроксимации обычно используют формулу Лагранжа [4] и тогда

$$\Delta_{с.а} = \left| \frac{dR(t)}{dt} \right|_{\text{макс}} \Delta t. \quad (14)$$

Исключая каналы АД и СВ, где выходные функциональные зависимости ПИП линейны во всем диапазоне измерения метеозлемента, для остальных аналоговых каналов в УАР осуществляется ап-

Таблица 1  
Значения коэффициента  $K$  для различных диапазонов температуры

| Канал преобразования<br>в УАР | Диапазон измерения |     | $K$ Ом/°C |
|-------------------------------|--------------------|-----|-----------|
|                               | от                 | до  |           |
| Температура воздуха           | 0                  | +50 | 1,99      |
|                               | -50                | 0   | 2,02      |
| Влажность воздуха . .         | +12                | +35 | 2,85      |
|                               | -12                | +12 | 3,01      |
|                               | -12                | +12 | 2,64      |

проксимация: для канала ТВ двумя прямолинейными отрезками (рис. 1 а), для канала ВВ тремя прямолинейными отрезками (рис. 1 б) с различным значением коэффициента крутизны  $K$  в различных областях диапазона температур (табл. 1). Для канала АД коэффициент  $K=2,0$  Ом/мбар во всем диапазоне измерения давления.

3. Источником погрешности  $\delta_0$  является неточность подгонки точки перегиба аппроксимируемой функции  $R_t=f(t)$  в области, где  $t=0^\circ\text{C}$  (в мостовой схеме УИАП), т. е. неточность подстройки канала под  $R_0$  для конкретного ПИП. Источником погрешности  $\delta_0$  является и заложенная в схеме УИАП величина младшего разряда реохорда уравнивания. Подстройка канала производится с помощью специальных подстроечных резисторов. Таким образом, на величине  $\delta_0$  сказывается нестабильность во времени характеристик подстроечных резисторов, их технологические отклонения, а также дискретность преобразования УИАП.

Материалы исследования, приведенные в [1], показали, что значения  $\delta_0$  составляют  $0,02-0,03^\circ\text{C}$  на каждые  $10^\circ\text{C}$  изменения температуры окружающей среды  $t_v$ . При нормальных температурных условиях ( $t_v=+20^\circ\text{C}$ )  $\delta_0$  равно  $-0,6 \cdot 10^{-2}^\circ\text{C}$ . Максимального значения  $\delta_0$  достигает на границах диапазона измерения при значитель-

ных колебаниях  $t_b$ , где она в среднем изменяется от  $-4,0 \cdot 10^{-2}$  до  $+6,5 \cdot 10^{-2}^\circ\text{C}$  (при колебаниях  $t_b$  от  $+5$  до  $+40^\circ\text{C}$ ).

Погрешность, обусловленная дискретностью преобразования УИАП, при подстройке нуля моста равно  $0,2 \text{ Ом}$  (или  $0,1^\circ\text{C}$ ). В УИАП погрешность дискретности уменьшена до  $0,1 \text{ Ом}$  (или  $0,05^\circ\text{C}$ ) за счет смещения статической характеристики измерителя (см. формулу (4)) в положительной и отрицательной областях на  $0,1 \text{ Ом}$ , т. е. на половину шага квантования  $\Delta h$  (рис. 1 в).

4. Погрешность  $\delta_{н. х}$ , обусловленная изменением наклона статической характеристики преобразователя УИАП, корректируется с помощью добавочных шунтов реохорда, представляющих собой набор резисторов, изменяющих эквивалентное сопротивление общего шунта реохорда. Для различных аналоговых ПИП наблюдается разброс по наклону характеристик. Наклон характеристики в схеме моста определяется отношением  $R_{100}/R_0$ ; значение его приводится в паспорте на конкретный ПИП. При нормальных температурных условиях значение  $\delta_{н. х}$  мало. Проявляется оно только при повышенных значениях  $t_b$  и только на границах измеряемого УАР диапазона температур. В этом случае  $\delta_{н. х} = 0,02^\circ\text{C}$ . При нормальных условиях погрешность  $\delta_{н. х} \approx 0,001^\circ\text{C}$  и ею можно пренебречь.

Законы распределения составляющих  $\delta_0$  и  $\delta_{н. х}$  при  $t_b = +20^\circ\text{C}$  близки к нормальному.

Измерение импульсных выходных сигналов с ПИП осуществляется в УАР с помощью простых электронных счетчиков, которые суммируют поступающие с выхода ПИП скорости ветра, последовательности импульсов. Так как с ПИП поступают импульсы с большой частотой, то перед счетчиками устанавливается масштабный делитель, коэффициент деления которого определяется формулой

$$m = \frac{\bar{v}_{\max} T}{C} k, \quad (15)$$

где  $\bar{v}_{\max}$  — максимальное значение средней скорости за 10-минутный интервал осреднения в м/с,  $T$  — время измерения в секундах,  $C$  — емкость счетчика,  $k$  — коэффициент винта ПИП (определяется по паспортным данным на ПИП ветра и для ПИП типа М-63М составляет 0,9).

Аналогично преобразуются в УАР значения максимальной и текущей скоростей ветра. Дискретность преобразователя параметров ветра  $\Delta h = 0,5 \text{ м/с}$ . При нормальном функционировании элементов схемы погрешность измерения скорости ветра определяется в основном погрешностью дискретности  $\Delta h$ . Закон распределения в этом случае будет равномерным с плотностью распределения  $\Delta_{\Delta h}$  описываемой уравнением (7).

Для численной оценки погрешности  $\Delta_{д. УАР}$  и нормирования ее по диапазонам измерения рассмотрим результаты экспериментальных исследований УАР.

В качестве имитирующих устройств, реализующих на своем выходе функциональные зависимости ПИП (1), использовались соот-

ветственно магазины сопротивлений типа МСР-60М и имитатор параметров ветра [14]. Применение магазинов сопротивлений высокого класса точности (кл. 0,02) позволило свести к минимуму погрешность имитации и соответственно погрешность поверки аналоговых параметров. Ранее проведенные исследования с УАР станции М-106 [15] подтвердили удобство работы с магазинами сопротивлений и обеспечили возможность детального изучения метрологических характеристик УАР в любой точке измеряемого им диапазона с надлежащей точностью. Подробный анализ погрешности имитирующих устройств приведены в [16].

Таблица 2

Значения метрологических параметров на выходе УАР  
по каналу измерения ТВ (1972—1974 гг.)

| Исследуемые точки диапазона ТВ, °С | Метрологический параметр |             |            | Исследуемые точки диапазона ТВ, °С | Метрологический параметр |             |            |
|------------------------------------|--------------------------|-------------|------------|------------------------------------|--------------------------|-------------|------------|
|                                    | $\Delta_c$               | $S(\Delta)$ | $\Delta_d$ |                                    | $\Delta_c$               | $S(\Delta)$ | $\Delta_d$ |
| 1972 г.                            |                          |             |            | 1974 г.                            |                          |             |            |
| —60                                | 0,0                      | 0,0         | 0,0        | —60                                | +0,1                     | 0,0         | +0,1       |
| —40                                | —0,1                     | 0,0         | —0,1       | —50                                | 0,0                      | 0,0         | 0,0        |
| —20                                | 0,0                      | 0,0         | 0,0        | —40                                | +0,1                     | 0,0         | +0,1       |
| 0                                  | +0,1                     | 0,0         | +0,1       | —30                                | +0,3                     | 0,0         | +0,3       |
| +25                                | 0,0                      | 0,0         | 0,0        | —20                                | —0,1                     | 0,0         | —0,1       |
| +50                                | —0,2                     | 0,0         | —0,2       | —10                                | 0,0                      | 0,0         | 0,0        |
| 1973 г.                            |                          |             |            | —0                                 | 0,0                      | 0,0         | 0,0        |
| —60                                | 0,0                      | 0,0         | 0,0        | +10                                | +0,1                     | 0,0         | +0,1       |
| —40                                | +0,1                     | 0,0         | +0,1       | +20                                | —0,1                     | 0,0         | —0,1       |
| —20                                | 0,0                      | 0,0         | 0,0        | +30                                | 0,0                      | 0,0         | 0,0        |
| 0                                  | —0,1                     | 0,0         | —0,1       | +40                                | +0,1                     | 0,0         | +0,1       |
| +25                                | 0,0                      | 0,0         | 0,0        | +50                                | —0,1                     | 0,0         | —0,1       |
| +50                                | —0,2                     | 0,04        | 0,26       | +60                                | —0,1                     | 0,0         | —0,1       |

Объем статистического материала по исследованию аналоговых каналов составил 7560 измерений. Исследования проводились на базе АМС М-106М, разработанной и изготовленной в ЦКБ ГМП, и М-106; изготовленной на РОЗ ГМП. Исследования УАР проводились в течение 1972—1974 гг.

С помощью имитирующих устройств, подключаемых к входу УАР, осуществлялась имитация аналоговых выходных параметров ПИП в нескольких точках диапазона измерения. На каждой из точек диапазона проводилась серия из 30 измерений. Имитируемый сигнал не менялся во времени, т. е. обеспечивался статический режим поверки. Для статистической выборки из 30 отсчетов для каж-

дой исследуемой точки диапазона определялись  $\Delta_{c_i}$ ,  $S(\Delta)_i$  и  $\Delta_{d_i}$ . Значение  $\Delta_{d_i}$  рассчитывалось по формуле

$$\Delta_{d_i} = |\bar{\Delta}_{c_i}| + 2S(\Delta)_i, \quad (16)$$

а значения  $\Delta_{c_i}$  и  $S(\Delta)_i$  вычислялись по общепринятой методике, изложенной в [17]. Результаты расчетов представлены в табл. 2—4.

Анализ статистического материала показал, что в подавляющем большинстве случаев погрешность измерения аналоговых параметров на выходе УАР в любой точке диапазона представляет систе-

Таблица 3

Значения метрологических параметров на выходе УАР по каналу измерения АД (1972—1974 гг.)

| Метрологический параметр | Исследуемые точки диапазона, мбар |      |      |       |       |       |
|--------------------------|-----------------------------------|------|------|-------|-------|-------|
|                          | 940                               | 965  | 990  | 1000  | 1015  | 1010  |
| 1972 г.                  |                                   |      |      |       |       |       |
| $\bar{\Delta}_c$         | 0,0                               | 0,0  | 0,0  | -0,1  | -0,2  | -0,1  |
| $S(\Delta)$              | 0,0                               | 0,0  | 0,0  | 0,09  | 0,0   | 0,0   |
| $\Delta_d$               | 0,0                               | 0,0  | 0,0  | 0,28  | -0,2  | -0,1  |
| 1973 г.                  |                                   |      |      |       |       |       |
| $\bar{\Delta}_c$         | 0,0                               | 0,0  | 0,0  | -0,10 | -0,15 | -0,12 |
| $S(\Delta)$              | 0,0                               | 0,0  | 0,0  | 0,09  | 0,05  | 0,04  |
| $\Delta_d$               | 0,0                               | 0,0  | 0,0  | 0,28  | 0,26  | 0,20  |
| 1974 г.                  |                                   |      |      |       |       |       |
| $\bar{\Delta}_c$         | +0,1                              | -0,2 | -0,2 | 0,0   | +0,1  | 0,0   |
| $S(\Delta)$              | 0,0                               | 0,0  | 0,0  | 0,0   | 0,0   | 0,0   |
| $\Delta_d$               | +0,1                              | -0,2 | -0,2 | 0,0   | +0,1  | 0,0   |

матическую составляющую. В различных исследуемых точках диапазона значение  $\bar{\Delta}_{c_i}$  и знак не изменялись в пределах самой серии от отсчета к отсчету. Изменение в значении  $\bar{\Delta}_{c_i}$  наблюдается только при переходе от одной серии к другой. Соответственно этому дисперсия в серии  $S(\Delta)_i = 0$ . В среднем значение  $\bar{\Delta}_{c_i}$  по всей совокупности измерений УАР по каналу ТВ составило  $|\bar{\Delta}_c| = 0,15^\circ\text{C}$ , по каналу АД  $|\bar{\Delta}_c| = 0,2$  мбар, по каналу ВВ  $|\bar{\Delta}_c| = 0,2^\circ\text{C}$ . Постоянство  $\bar{\Delta}_{c_i}$  внутри каждой из серий обусловлено физической сущностью аналого-дискретного преобразователя УИАП. В те моменты времени, когда измеряемая в УАР функция (1) принимает значение, соответствующее

половине шага квантования  $\Delta h/2$  (см. рис. 1 в), функция изменяется скачком на величину, равную  $\Delta h$  и соответствующую единице младшего разряда измерительного моста УИАП ( $0,05^\circ\text{C}$ ). В остальные моменты времени значения функции (1) постоянные и распределение погрешности внутри интервала, ограниченного ( $-\Delta h/2$  и  $+\Delta h/2$ ), подчинены равномерному закону распределения. Это рассуждение справедливо для любой исследуемой точки диапазона измерения, а также подтверждается экспериментальными результатами исследования погрешности УАР внутри диапазонов измерения ТВ, ВВ и АД.

Таблица 4

Значения метрологических параметров на выходе УАР  
по каналу измерения ВВ (1973 и 1974 гг.)

| Исследуемые точки диапазона ВВ, $^\circ\text{C}$ | Метрологический параметр |                   |            | Исследуемые точки диапазона ВВ, $^\circ\text{C}$ | Метрологический параметр |                   |            |
|--------------------------------------------------|--------------------------|-------------------|------------|--------------------------------------------------|--------------------------|-------------------|------------|
|                                                  | $\bar{\Delta}_c$         | $S(\bar{\Delta})$ | $\Delta_d$ |                                                  | $\bar{\Delta}_c$         | $S(\bar{\Delta})$ | $\Delta_d$ |
| 1973 г.                                          |                          |                   |            | 1974 г.                                          |                          |                   |            |
| -43                                              | -0,2                     | 0,0               | -0,2       | -30                                              | -0,2                     | 0,0               | -0,2       |
| -39                                              | -0,1                     | 0,0               | -0,1       | -25                                              | -0,1                     | 0,0               | -0,1       |
| -35                                              | -0,1                     | 0,0               | -0,1       | -20                                              | 0,0                      | 0,0               | 0,0        |
| -30                                              | -0,1                     | 0,0               | -0,1       | -15                                              | -0,1                     | 0,0               | -0,1       |
| -25                                              | +0,1                     | 0,0               | +0,1       | -12                                              | 0,0                      | 0,0               | 0,0        |
| -20                                              | -0,2                     | 0,0               | -0,2       | -10                                              | 0,0                      | 0,0               | 0,0        |
| -15                                              | -0,2                     | 0,0               | -0,2       | -3,4                                             | -0,1                     | 0,0               | -0,1       |
| -12                                              | -0,2                     | 0,0               | -0,2       | 0,0                                              | 0,0                      | 0,0               | 0,0        |
| -10                                              | 0,0                      | 0,0               | 0,0        | +4                                               | -0,1                     | 0,0               | -0,1       |
| -3,4                                             | -0,2                     | 0,0               | -0,2       | +7,7                                             | -0,07                    | 0,04              | 0,15       |
| 0,0                                              | -0,2                     | 0,0               | -0,2       | +11,3                                            | +0,06                    | 0,1               | 0,26       |
|                                                  |                          |                   |            | +14,9                                            | +0,1                     | 0,0               | +0,1       |
|                                                  |                          |                   |            | +18,5                                            | -0,2                     | 0,0               | -0,2       |
|                                                  |                          |                   |            | +22,0                                            | -0,3                     | 0,0               | -0,3       |
| 1974 г.                                          |                          |                   |            | +25,5                                            | -0,1                     | 0,0               | -0,1       |
| -43                                              | -0,2                     | 0,0               | -0,2       | +28,8                                            | -0,1                     | 0,0               | -0,1       |
| -39                                              | -0,2                     | 0,0               | -0,2       | +32,1                                            | -0,1                     | 0,0               | -0,1       |
| -35                                              | -0,2                     | 0,0               | -0,2       |                                                  |                          |                   |            |

Исследование погрешностей УАР при измерении скорости ветра ( $v_{\text{тек}}$ ,  $v_{\text{макс}}$ ,  $v_{\text{ср}}$ ) осуществлялось с помощью имитатора, позволяющего дискретно в нескольких точках диапазона имитировать значения скоростей. Методика работы с имитатором подробно изложена в [14]. Объем статистического материала представляет собой совокупность 450 измерений по трем указанным параметрам ветра. Результаты обработки статистического материала представлены в табл. 5. Из анализа данных следует, что для большинства точек диапазона наблюдается разброс относительно  $\bar{\Delta}_c$ , кроме точек диа-

пазона 13,1 и 17,4 м/с, где в серии знак и значение погрешности не изменялись от отсчета к отсчету на выходе УАР. В этих точках значение  $\Delta_{дi}$  определяется величиной  $\bar{\Delta}_{ci}$  а  $S(\bar{\Delta})_i=0$ . Следует отметить, что в технических условиях указана погрешность масштаба регистрации на выходе УАР (на РТА), равная 1 м/с. Исследования показали, что в действительности информация о параметрах ветра регистрируется до десятых долей в единицах скорости. Это обусловлено тем, что младший разряд суммирующего счетчика соответствует коду числа 1, т. е. 0,5 м/с.

Таблица 5

Значения метрологических параметров на выходе УАР  
по каналу измерения СВ.

| Исследуемые<br>точки диапазона<br>СВ, м/с | Метрологический параметр |                   |            |
|-------------------------------------------|--------------------------|-------------------|------------|
|                                           | $\bar{\Delta}_c$         | $S(\bar{\Delta})$ | $\Delta_d$ |
| Текущая скорость ветра                    |                          |                   |            |
| 2,4                                       | -0,06                    | 0,24              | 0,47       |
| 6,0                                       | -0,09                    | 0,03              | 0,04       |
| 13,1                                      | -0,1                     | 0,0               | -0,1       |
| Максимальная скорость ветра               |                          |                   |            |
| 6,1                                       | -0,08                    | 0,27              | 0,62       |
| 21,7                                      | +1,24                    | 0,61              | 2,46       |
| 46,8                                      | +0,87                    | 0,49              | 1,85       |
| Средняя скорость ветра                    |                          |                   |            |
| 4,2                                       | +0,26                    | 0,05              | 0,36       |
| 13,9                                      | +0,12                    | 0,04              | 0,21       |
| 17,4                                      | +0,1                     | 0,0               | +0,1       |
| 24,6                                      | +0,39                    | 0,05              | 0,44       |

Перейдем к рассмотрению вопроса о суммировании погрешностей, полученных в исследуемых точках диапазона, для обоснования числового критерия, характеризующего погрешность УАР по всему диапазону измерения аналоговых и импульсных параметров на его выходе.

В данном случае необходимо решить две задачи. Первая — это суммирование частных погрешностей в любой точке диапазона измерения, выраженных уравнением (3), и затем нахождение величины  $\Delta_{дi}$  (для  $i$ -той точки исследования диапазона). Вторая задача — это обоснованное суммирование  $\Delta_{дi}$  и нахождение результирующей погрешности  $\Delta_{д.УАР}$  для всего измеряемого диапазона в целом.

При суммировании составляющих в выражении (3) необходимо учитывать определенные требования, касающиеся учета корреляционных связей и законов распределения последних [11, 12]. Этих же

требований необходимо придерживаться при нахождении значения  $\Delta_{д. УАР}$  по отдельным значениям  $\Delta_{д_i}$ , полученным в исследуемых точках диапазона измерения УАР. Таким образом, необходимо принимать во внимание признак корреляционной связи составляющих с учетом закона распределения каждой из них (как в каждой из исследуемых точек диапазона, так и при суммировании погрешностей по диапазону в целом). В подавляющем большинстве случаев предполагают, что все составляющие суммарной погрешности (как для  $\Delta_{д_i}$ , так и для  $\Delta_{д. УАР}$ ) распределены по нормальному закону, корреляция между ними близка или равна 1 и, следовательно, результирующая погрешность определяется геометрическим суммированием частных составляющих. Фактически законы распределения в конкретных исследуемых точках диапазона могут иметь самые различные композиции, что и подтверждается результатами экспериментальных исследований погрешностей УАР. Например, в случае измерения УАР аналоговых параметров приведенный выше анализ показал, что доминирующей погрешностью является погрешность дискретности и, в частности, составляющие  $\delta_n$  и  $\delta_v$ , а в целом погрешность измерения характеризуется систематической составляющей  $\Delta_{с_i}$ . По своему характеру погрешность квантования по параметру относится к аддитивной составляющей и определяется выбранным шагом квантования  $\Delta h$  (для измерительного моста реохорда УИАП — это единица младшего разряда). В диапазоне шага квантования погрешности разных значений равновероятны и подчинены равномерному закону распределения. В то же время составляющие  $\delta_0$  и  $\delta_{н.х}$  имеют преимущественно нормальное распределение. Таким образом, в любой из  $i$ -тых точек исследования диапазона измерения аналоговых параметров результирующая погрешность  $\Delta_{д_i}$  представляет собой сложную композицию законов распределения.

При измерении УАР импульсных параметров (скорость ветра) из всей совокупности частных составляющих ни одна из них не является доминирующей и, следовательно, результирующая погрешность в  $i$ -той точке диапазона в большинстве случаев распределена по нормальному закону. Реже встречаются случаи, когда распределение результирующей погрешности подчинено равномерному закону.

Действительно, как показали результаты исследований УАР, значения  $M(\Delta_{с_i})$  и  $S(\Delta)_{i\dot{}}$  в различных исследуемых точках диапазона различны, а следовательно, различны и значения  $\Delta_{д_i}$  в этих точках. Все это подтверждает различие условных плотностей распределения погрешностей и различие законов распределения.

Практически, при расчете величины  $\Delta_{д_i}$  учитывают как  $\Delta_{с_i}$ , так и  $S(\Delta)_{i\dot{}}$ . Задаваясь вероятностью  $P=0,95$  и полагая, что  $S(\Delta)_{i\dot{}}$  и  $\Delta_{с_i}$ , распределены по нормальному закону, значение  $\Delta_{д_i}$  рассчитывают по формуле (16).

Правомерность применения этой формулы можно доказать, ис-

ходя из анализа законов распределения частных составляющих  $\delta_v$ ,  $\delta_n$ ,  $\delta_0$  и  $\delta_{н.х}$  в выражении (3). Как показано в [11], композиция двух равномерных распределений погрешностей ( $\delta_v$  и  $\delta_n$ ) в сумме представляет собой распределение Симпсона, а композиция двух нормальных распределений в сумме представляет собой нормальное распределение. Таким образом, результирующий закон — это композиция из нормального распределения и распределения Симпсона. Закон равномерной плотности распределения является неустойчивым, и при количестве частных составляющих погрешностей  $n > 2$  он приближается к нормальному распределению. В данном случае суммированию подлежат нормальное распределение и равномерное. Композиция такого распределения дает закон, отличный от нормального, но в принципе он может быть аппроксимирован нормальным распределением при условии симметрии законов распределения частных погрешностей. Тогда принимая во внимание, что частные составляющие в исследуемой точке ( $\delta_0$ ,  $\delta_{н.х}$ ,  $\delta_v$ ,  $\delta_n$ ) являются случайными и корреляция между ними близка к единице, суммарное значение  $S(\Delta)_i$  подсчитаем по формуле

$$\sum S(\Delta)_i = \sqrt{\delta_v^2 + \delta_n^2 + \delta_0^2 + \delta_{н.х}^2}. \quad (17)$$

Подставив в (17) численные значения составляющих, получим, что  $\sum S(\Delta)_i = 0,06^\circ\text{C}$ . Значение  $\Delta_{\Delta_i}$  рассчитаем, учитывая закон распределения нормальным и задаваясь  $p = 0,95$ . Коэффициент  $r$ , учитывающий вид закона распределения, в этом случае равен 2,04, тогда

$$\Delta_{\Delta_i} = r \sum S(\Delta)_i = 2,04 \cdot 0,06 = 0,12^\circ\text{C}. \quad (18)$$

Для определения  $\Delta_{\Delta.УАР}$  будем рассматривать  $\Delta_{\Delta_i}$  как частные погрешности по диапазону измерения УАР. Прежде определим суммарный закон распределения погрешностей на выходе УАР по результатам исследования погрешностей в точках диапазона.

Для аналоговых каналов вид закона может быть установлен и проверен на основании экспериментально полученных статистических данных, достаточных для построения такого закона. Сложность построения результирующего закона распределения по диапазону заключается в том, что совокупность измерений на выходе УАР получена путем объединения групп измерений в различных точках диапазона. Для объединения групп измерений в один статистический ряд необходимо проверить допустимость различий  $\Delta_{ci}$  между отдельными группами, а также их равнорассеянность. В этом случае можно воспользоваться методом Фишера [17]. Расчет по этому методу показал, что отношение межгрупповой дисперсии к среднему значению внутри групповых оценок дисперсий находится в допустимых пределах при  $P = 0,95$ . Это позволило объединить группы измерений в точках диапазона в единую совокупность, а затем построить гистограммы распределения погрешностей на выходе УАР.

На рис. 2 а, б, в представлены гистограммы распределения по-

грешностей на выходе УАР для аналоговых параметров. Аналогичное рассуждение взято за основу и при построении гистограмм по каналам измерения скорости ветра, которые представлены на рис. 2 г, д, е.

Как видно из численных результатов эксперимента, распределение погрешностей на выходе УАР подчинено равномерному закону для аналоговых параметров. Численное значение  $\Delta_{\Delta_i}$  в исследуемых точках диапазона определяется величиной систематической составляющей  $\bar{\Delta}_{c_i}$ . Принимая, что в диапазоне измерения значения  $\bar{\Delta}_{c_i}$  распределены случайным образом и между ними нет статистической связи, численную величину  $S(\Delta)_{\text{УАР}}$  рассчитаем по формуле

$$S(\Delta)_{\text{УАР}} = \sqrt{\left(\frac{\bar{\Delta}_{c_1}}{r}\right)^2 + \left(\frac{\bar{\Delta}_{c_2}}{r}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\bar{\Delta}_{c_i}}{r}\right)^2}, \quad (19)$$

где  $r$  — коэффициент, характеризующий вид закона распределения погрешности.

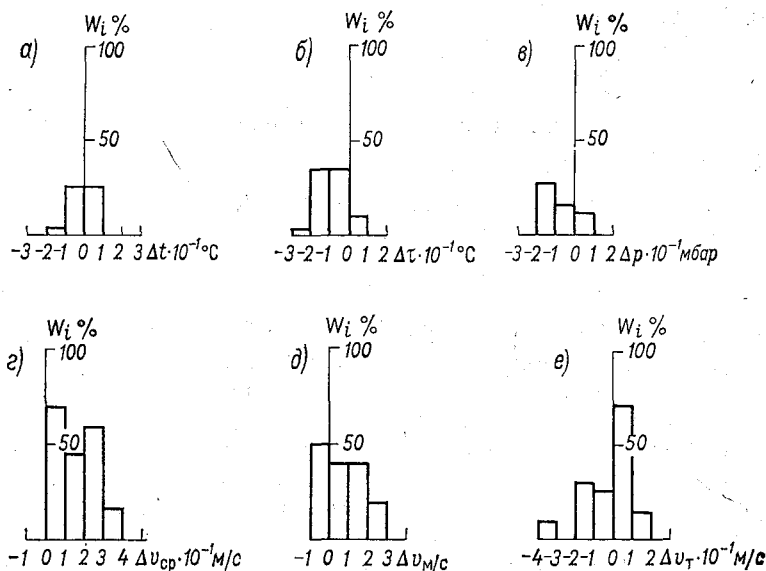


Рис. 2. Гистограммы распределения погрешностей на выходе УАР по каналам измерения температуры воздуха (а), влажности воздуха (б), атмосферного давления (в), средней скорости ветра (г), максимальной скорости (д), текущей скорости (е).

Принимая  $P=0,95$  и  $r=1,7$  и произведя расчет по формуле (19), получим  $S(\Delta)_{\text{УАР ТВ}} = 0,3^\circ\text{C}$ ,  $S(\Delta)_{\text{УАР АД}} = 0,4$  мбар и  $S(\Delta)_{\text{УАР ВВ}} = 0,4^\circ\text{C}$ . Соответственно расчет  $S(\Delta)_{\text{УАР}}$  для импульсных каналов показал, что для  $S(\Delta)_{\text{УАР } v_{\text{тек}}} = 0,2$  м/с,  $S(\Delta)_{\text{УАР } v_{\text{макс}}} = 0,5$  м/с и  $S(\Delta)_{\text{УАР } v_{\text{ср}}} = 0,1$  м/с.

В общем виде с учетом законов распределения в каждой точке диапазона измерения УАР величину усредненного систематического ожидания погрешности по диапазону в целом можно представить выражением

$$M(\Delta_{УАР}) = \int_D M(\Delta_{ci}) \omega(\Delta_{ci}) d\Delta. \quad (20)$$

Аналогично

$$S(\dot{\Delta})_{УАР} = \int_D [S(\dot{\Delta})_i]^2 \omega[S(\dot{\Delta})_i] dS(\dot{\Delta}). \quad (21)$$

Окончательно выражение для  $\Delta_{д. УАР}$  по диапазону измерения с учетом  $M[\Delta_c]_{УАР}$  и  $S(\dot{\Delta})_{УАР}$ , а также с учетом законов распределения последних на выходе УАР запишется в виде

$$\Delta_{д. УАР} = \frac{1}{D} \int_D [M(\Delta_c)_{УАР} + S(\dot{\Delta})_{УАР}] \omega(\Delta_{д. УАР}) d(\Delta). \quad (22)$$

Численные результаты расчета по формулам (20), (21) и (22) сведены в табл. 6 и 7.

В заключение следует отметить, что в любом случае регистрация значений аналоговых параметров на выходе УАР (на РТА) осуществ-

Таблица 6

Значения метрологических параметров на выходе УАР  
по экспериментальным данным для каналов ТВ, ВВ, АД  
(аналоговые параметры)

| Метрологический параметр                           | Аналоговые параметры |        |          |
|----------------------------------------------------|----------------------|--------|----------|
|                                                    | ТВ, °С               | ВВ, °С | АД, мбар |
| $\overline{S(\dot{\Delta})}_{УАР}$                 | 0,020                | 0,020  | 0,040    |
| $r \cdot \overline{S(\dot{\Delta})}_{УАР} (r=1,7)$ | 0,034                | 0,034  | 0,068    |
| $\Delta_{д, УАР} (p=0,95)$                         | 0,120                | 0,120  | 0,230    |

Таблица 7

Значения метрологических параметров на выходе УАР  
по экспериментальным данным для каналов У  
(импульсные параметры)

| Метрологический параметр                            | Импульсные параметры |                |              |
|-----------------------------------------------------|----------------------|----------------|--------------|
|                                                     | $v_{тек}$ м/с        | $v_{макс}$ м/с | $v_{ср}$ м/с |
| $\overline{S(\dot{\Delta})}_{УАР}$                  | 0,080                | 0,162          | 0,014        |
| $\overline{M[\Delta_c]_{УАР}}$                      | 0,080                | 0,620          | 0,217        |
| $r \cdot \overline{S(\dot{\Delta})}_{УАР} (r=2,04)$ | 0,163                | 0,330          | 0,028        |
| $\Delta_{д, УАР} (p=0,95)$                          | 0,026                | 0,410          | 0,012        |

ствляется с дискретностью  $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ , т. е. только в момент перехода статической характеристики через середину шага квантования ( $0,05^{\circ}\text{C}$ ) на РТА зафиксируется физическое значение метеоэлемента, округленное до  $0,1^{\circ}\text{C}$ . Поэтому целесообразней нормировать значение  $\Delta_{\text{д. УАР}}$  до десятых долей градуса. Аналогичное положение отмечается и для импульсных каналов.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Экспериментальные исследования выходных характеристик УАР по аналоговым параметрам показали, что значение  $\Delta_{\text{д. УАР}}$  можно нормировать: для  $\Delta_{\text{д. УАР}}(\text{ТВ}) = 0,12^{\circ}\text{C}$ ,  $\Delta_{\text{д. УАР}}(\text{АД}) = 0,25$  мбар и  $\Delta_{\text{д. УАР}}(\text{ВВ}) = 0,12^{\circ}\text{C}$  при  $P = 0,95$  и коэффициенте, характеризующем закон распределения  $r = 1,7$ .

2. Экспериментальные исследования выходных характеристик УАР по импульсным параметрам показали, что величину  $\Delta_{\text{д. УАР}}$  можно нормировать: для  $\Delta_{\text{д. УАР}} v_{\text{тек}} = 0,02$  м/с,  $\Delta_{\text{д. УАР}} v_{\text{ср}} = 0,01$  м/с и  $\Delta_{\text{д. УАР}} v_{\text{макс}} = 0,4$  м/с при  $P = 0,95$  и  $r = 2,04$ .

3. Распределение погрешностей по точкам внутри диапазона измерения аналоговых параметров (погрешность в точке) подчинено равномерному закону, а результирующий закон распределения на выходе УАР можно аппроксимировать нормальным распределением.

4. Распределение погрешностей по точкам внутри диапазона измерения импульсных параметров (погрешность в точке) подчинено нормальному закону, а результирующий закон распределения на выходе УАР также аппроксимируется нормальным распределением.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузьминых И. П., Богачев А. Д. Автоматическая гидрометеорологическая станция УАТГМС-4.— «Тр. Всесоюзной конференции молодых ученых Гидрометеорологической Службы СССР. Л., Гидрометеониздат, 1972, с. 78—89.
2. Рошин А. Г. Принципы построения ряда унифицированных автоматических метеорологических станций и основные требования к базовой модели УАТГМС-4М.— В кн.: Разработка и эксплуатация автоматических метеорологических станций. Л., Гидрометеониздат, 1974, с. 38—60.
3. Норкин С. Б., Берри Р. Я. и др. Элементы вычислительной математики. М., «Высшая школа», 1963. 210 с.
4. Демидович Б. П., Марон И. А. Основы вычислительной математики. М., Физматгиз, 1963. 660 с.
5. Хлистунов В. Н. О погрешности аппроксимации дискретных методов измерения.— «Приборостроение», 1960, № 5, с. 3—5.
6. Измерительные преобразователи постоянного тока. Под ред. Л. А. Синицкого, Киев, 1965. 380 с.
7. Островский Л. А. Основы общей теории электроизмерительных устройств. Л., «Энергия», 1971. 540 с.
8. Орнатский П. П. Автоматические измерения и приборы. Киев, Изд. «Высшая школа», 1973. 550 с.
9. Малов В. С., Купершmidt Я. А. Телеизмерение. М., «Энергия», 1975. 350 с.
10. Кузьмичев Г. М., Шляндин В. М. Цифровые автокомпенсаторы прямого уравнивания. М., «Энергия», 1968. 98 с.
11. Новицкий П. В. Основы информационной теории измерительных устройств. М., «Энергия», 1968. 350 с.
12. Завадовский В. М. К вопросу об анализе погрешностей измерения телеметрической системы.— «Тр. НИИ ГМП», 1966, вып. 16, с. 98—106.

13. Купершмидт Я. А. К определению критериев помехоустойчивости и точности телеизмерения. — «Автоматика и телемеханика», 1964, т. XXV, № 8, с. 1198—1202.
14. Рогалев Ю. В., Сущинский Б. Л., Кузьминых И. П. К методике поверки каналов параметров ветра станции М-106 с применением имитирующих устройств. — «Тр. ГГО», 1974, вып. 340, с. 118—129.
15. Рогалев Ю. В. Некоторые результаты поверки аналоговых каналов станции М-106. — «Тр. ГГО», 1974, вып. 340, с. 130—137.
16. Рогалев Ю. В., Фатеев Н. П. Анализ погрешностей имитирующих устройств. — См. наст. сборник.
17. Кудряшова Ж. Ф., Рабинович С. Г., Резник К. А. Рекомендация по методам обработки результатов наблюдений при прямых измерениях. — «Тр. метрологических институтов СССР», 1972, вып. 134(194). 117 с.
18. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений. ГОСТ 8009-72. М., Изд-во стандартов, 1972. 16 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

|                                                                                                                                                                                              |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Н. П. Фатеев, Б. Л. Сущинский, В. А. Кузьмин, Д. Я. Блантер. Образцовые средства измерения скорости воздушного потока, их исследование и аттестация                                          | 3   |
| В. А. Клевандова, Г. А. Никольский, Ю. А. Складов. Современное состояние Международной пиргелиометрической шкалы. Международные сравнения пиргелиометров в 1975 г.                           | 16  |
| Н. П. Фатеев, Г. И. Полухин, А. В. Цвелик. Исследование и аттестация образцовых грузопоршневых манометров абсолютного давления                                                               | 23  |
| Н. П. Фатеев, Л. И. Леонова, М. А. Андреев. Метрологические исследования образцовых ртутных манометров и барометров                                                                          | 29  |
| Г. П. Резников, Н. Д. Колышев, Л. Д. Качкачидзе, Б. В. Куров. Методика и результаты метрологических сравнений гигрометра точки росы и генератора паровоздушных смесей                        | 36  |
| Л. И. Леонова, Т. П. Доманькова. Метрологические исследования жидкостных метеорологических термометров                                                                                       | 47  |
| Б. В. Куров. Полуавтоматический жидкостный термокриостат для поверки и градуировки метеорологических термометров сопротивления                                                               | 54  |
| Б. Л. Сущинский, Н. П. Фатеев. Исследования по обоснованию методики контроля градуировочных характеристик измерительных преобразователей параметров ветра типа М-63М в условиях эксплуатации | 58  |
| Г. П. Резников, Ю. В. Роголев. Исследования по обоснованию возможности поверки АМС в естественных условиях методом непосредственного сличения (по каналам влажности и температуры)           | 72  |
| Л. И. Леонова, Ю. В. Роголев, Н. П. Фатеев. Методика контроля сохранности градуировочных характеристик измерительных преобразователей температуры автоматической метеостанции                | 83  |
| Ю. В. Роголев, М. А. Андреев. Анализ результатов поверки преобразователя атмосферного давления АМС в естественных условиях                                                                   | 90  |
| Ю. В. Роголев, Л. И. Леонова. Анализ погрешностей поверки и градуировки первичных измерительных преобразователей температуры АМС                                                             | 94  |
| Ю. В. Роголев, Н. П. Фатеев. Анализ погрешностей имитирующих устройств, применяемых при поверке АМС                                                                                          | 103 |
| Ю. В. Роголев. Исследование погрешностей центрального устройства метеостанции КРАМС                                                                                                          | 117 |
| Ю. В. Роголев. Исследование погрешностей устройства автоматики и регистрации станции М-106М                                                                                                  | 127 |

ТРУДЫ ГГО, вып. 392

Метрологические исследования  
и вопросы поверки  
метеорологических приборов

Редактор *Л. И. Штанникова*  
Технический редактор *М. И. Брайнина*  
Корректор *Т. Н. Черненко*

ИБ № 655

Сдано в набор 13/IV 1977 г. Подписано к печати 4/VIII 1977 г.  
М-13239. Формат 60×90<sup>1/16</sup>. Бумага тип. № 1. Печ. л. 9.5.  
Уч.-изд. л. 9,48. Тираж 530 экз. Индекс МЛ-223. Заказ 360.  
Цена 71 коп.

Гидрометеиздат. 199053. Ленинград, 2-я линия, д. 23.

Сортавальская книжная типография Управления по делам  
издательств, полиграфии и книжной торговли Совета Мини-  
стров Карельской АССР. Сортавала, Карельская, 42.

**Образцовые средства измерения скорости воздушного потока, их исследование и аттестация.** Фатеев Н. П., Сущинский Б. Л., Кузьмин В. А., Блантер Д. Я. Труды ГГО, 1977, вып. 392, с. 3—15.

Описана усовершенствованная поверочная схема для средств измерения скорости воздушного потока в Гидрометслужбе СССР, охватывающая практически все выпускаемые промышленностью приборы. Рассмотрены исходные образцовые средства измерения, а также средства измерения I, II и III разрядов. Приводятся результаты их метрологических исследований и методики аттестации.

Табл. 3. Илл. 2. Библ. 12.

**Современное состояние Международной пиргелиометрической шкалы. Международные сравнения пиргелиометров в 1975 г.** Клеванцова В. А., Никольский Г. А., Скляров Ю. А. Труды ГГО, 1977, вып. 392, с. 16—22.

Рассматривается вопрос о современном состоянии Международной пиргелиометрической шкалы по итогам проведения Международных пиргелиометрических сравнений. Обсуждается вопрос о переходе к новой пиргелиометрической шкале.

Табл. 3. Илл. 1. Библ. 16.

**Исследование и аттестация образцовых грузопоршневых манометров абсолютного давления.** Фатеев Н. П., Полухин Г. И., Цвелик А. В. Труды ГГО, 1977, вып. 392, с. 23—28.

Приведены результаты исследования и методика аттестации грузопоршневых манометров абсолютного давления стационарного и инспекторского типа, рекомендуемых в качестве образцовых средств измерения при поверке метеорологических барометров и манометров.

Илл. 2. Библ. 2.