

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР
ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ И КОНТРОЛЮ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

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

Выпуск

432

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ
И ВОПРОСЫ ПОВЕРКИ
МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ

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



ЛЕНИНГРАД ГИДРОМЕТЕОИЗДАТ 1981

06
Т78

Сборник посвящен метрологическим исследованиям и вопросам аттестации образцовой и эталонной аппаратуры.

В статьях сборника содержатся материалы анализа погрешностей и оценки точности измерений, описания методик измерений и обоснования межповерочных интервалов. Приводятся результаты метрологической аттестации поверочного оборудования, рассматриваются методы поверки приборов.

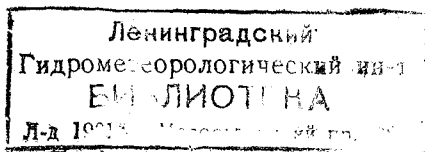
Сборник предназначен для специалистов-метрологов, работающих в области метеорологических измерений. Он может быть полезен для преподавателей и студентов вузов, а также преподавателей и учащихся гидрометеорологических техникумов.

The publication deals with metrological studies and problems of certification of model and standard instruments.

The articles of this publication contain the results of analyzing errors and estimating measurement accuracy, descriptions of measurement techniques and basing the intervals between calibrations.

The results of metrological certification of calibration equipment are given, methods for calibrating instruments are considered.

The publication is intended for specialists in metrology engaged in meteorological measurements. It could also be useful for workers of institutes and hydrometeorological schools interested in the problems of metrological provision.



*Н. П. Фатеев, В. А. Кузьмин,
Д. Я. Блантер, А. Я. Ривлин*

ИЗМЕРЕНИЕ МАЛЫХ СКОРОСТЕЙ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА ПРИ ПОВЕРКЕ АНЕМОМЕТРОВ

Градуировка и поверка анемометров производится в образцовых аэродинамических трубах в соответствии с поверочной схемой, описанной в работе [4].

В качестве образцового средства измерения скорости воздушного потока высшей точности используется напорная трубка с дифференциальным микроманометром класса 0,02, обеспечивающая измерения в диапазоне 5—60 м/с с погрешностью не более 2 %. При малых скоростях потока (0,5—5 м/с) измеряемые микроманометром скоростные напоры невелики и относительная погрешность измерения скорости резко возрастает. При скорости потока 4—6 м/с напор составляет всего 24,5 Па (2,5 мм вод. ст.), а для надежного измерения скорости необходимо производить отсчет с точностью меньше 0,24 Па (0,025 мм вод. ст.) что требует применения очень точных и чувствительных манометров. Такие манометры сложны в эксплуатации и для практического применения в поверке непригодны. Поэтому в качестве образцового средства измерения малых скоростей потока был предложен термоанемометр, который градуируется по образцовой напорной трубке в двухсопловой аэродинамической трубе [4].

Измерение скорости потока в аэродинамической трубе при поверке приборов в указанном диапазоне может осуществляться также с помощью специального фотоэлектрического счетчика числа оборотов вентилятора, проградуированного по термоанемометру [2], или другого какого-либо измерительного устройства.

В настоящей статье описывается модернизированный образцовый термоанемометр и рассматривается методика его аттестации.

Термоанемометр предназначен для измерения средней скорости и интенсивности пульсаций скорости потока воздуха в диапазоне 0,6—60 м/с.

Предельная погрешность измерения термоанемометрами средней скорости V_c при температуре потока $(20 \pm 0,5)^\circ\text{C}$ не превы-

шает $(0,02+0,03 V_c)$ м/с, среднее квадратическое отклонение результата измерения интенсивности пульсаций скорости потока воздуха ϵ (в процентах интенсивности) — $(0,2-0,8) \epsilon$.

Принцип действия термоанемометра основан на использовании зависимости сопротивления нагретого проволочного чувствительного элемента (ЧЭ) от скорости набегающего потока. ЧЭ представляет собой тонкую вольфрамовую нить, наваренную на стальные держатели.

При изменении скорости потока за счет действия электрической обратной связи ток нагрева ЧЭ автоматически изменяется таким образом, что его электрическое сопротивление, а значит, и температура остаются постоянными. Благодаря тонкой проволоке и применению петли обратной связи инерционность прибора резко снижается и оказывается возможным измерять высокочастотные пульсации скорости. Кроме того, при постоянной температуре ЧЭ обеспечивается существенное снижение погрешности измерения, так как теплообмен между ЧЭ и средой происходит при неизменных условиях и не зависит от измеряемой величины. Измерение скорости потока термоанемометром сводится к измерению компенсирующего тока нагрева ЧЭ.

Зависимость между током ЧЭ и скоростью потока выражается градуировочной кривой термоанемометра и может быть описана нелинейным уравнением

$$I = k_1 + k_2 \sqrt{V},$$

где I — ток, нагревающий ЧЭ первичного измерительного преобразователя; V — скорость потока; k_1, k_2 — постоянные, характеризующие физические свойства ЧЭ.

Функциональная схема термоанемометра представлена на рис. 1. Первичный измерительный преобразователь (ПИП), включающий в себя ЧЭ, дополнительный резистор и магазин M образуют измерительный мост. Питание и управление моста осуществляется блоком УМ. Мост с помощью блока M настроен до измерений таким образом, что состояние баланса осуществляется при определенном нагреве сопротивления ЧЭ относительно температуры среды. Петля обратной связи, поддерживающая мост в состоянии баланса, замыкается через предварительный усилитель, на который подается сигнал с измерительной диагонали моста. В блоке ПУ сигнал усиливается, демодулируется и подается на усилитель мощности УМ.

К блоку УМ подключен блок управления БУ, обеспечивающий плавность ввода обратной связи и исключаящий перегрузку ЧЭ в момент включения. Демодуляция напряжения в блоке ПУ и преобразование напряжения в блоке УМ осуществляются с помощью напряжения несущей частоты 30 кГц, вырабатываемого звуковым генератором ГЗ.

Входной блок УМ подается на мост, который поддерживает в состоянии равновесия при перегреве чувствительного эле-

мента на 38—60 % по отношению к температуре окружающей среды.

Постоянная составляющая выходного напряжения *УИ*, пропорциональная средней скорости потока, поступает на стрелочный индикатор *ИП* или на гнезда подключения цифрового вольтметра типа В7-16, или на гнезда квадратичного вольтметра типа ВЗ-40. Питание всего прибора осуществляется от сети переменного тока через встроенный стабилизированный выпрямитель и не зависит от колебаний напряжения в сети.

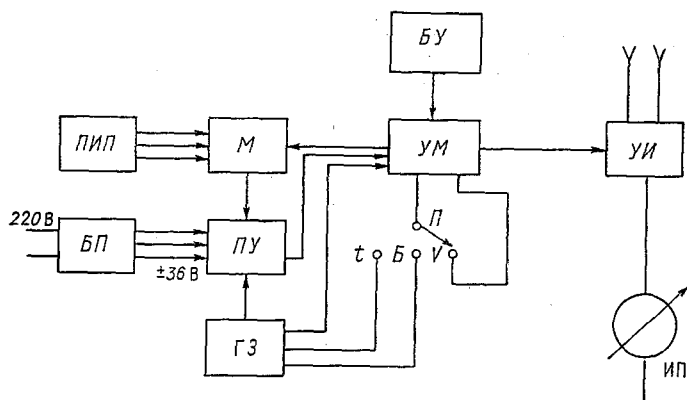


Рис. 1. Функциональная схема термоанемометра.

Перед началом измерений термоанемометр включается на вспомогательный режим работы, в котором происходит балансировка и настройка моста. Для этого переключатель *И* устанавливается в положение *Б*. Петля обратной связи разрывается и сигнал разбаланса моста подается от блока *ПУ* через блок *УИ* на стрелочный индикатор. Питание осуществляется через блок *УМ*. На блок *УМ* напряжение несущей частоты подается через переключатель *П* непосредственно от блока *ГЗ*. Его величина выбрана настолько малой, что в этом режиме *ЧЭ* не нагревается и имеет температуру окружающей среды. Мост балансируется изменением сопротивления одного из плеч моста с помощью курбелей в блоке *М*.

При измерениях в режиме *В* мост будет поддерживаться в состоянии баланса с заранее установленным перегревом чувствительного элемента *ЧЭ*. Заданной величине перегрева соответствует определенная чувствительность *ЧЭ* к изменениям скорости потока воздуха. Величина перегрева и начальное выходное напряжение прибора являются его индивидуальной характеристикой и их можно изменить только при переградуировке ПИП.

При необходимости термоанемометр позволяет осуществить контроль и измерение температуры исследуемого потока. Пере-

ключатель Π устанавливается при этом в положение t . Напряжение от блока ГЗ усиливается в блоке УМ и подается на мост через токо-стабилизирующий резистор. Благодаря этому ток питания ЧЭ при изменении температуры практически не меняется. Если мост сбалансирован при самой низкой температуре, то по мере повышения температуры в процессе измерения он разбалансируется. Напряжение разбаланса в диагонали моста усиливается в блоке УИ и поступает на стрелочный индикатор ИП. До измерения температуры ПИП следует отградуировать на соответствующей установке.

Для уменьшения габаритов и массы прибора в схеме термоанемометра применены современные кремниевые транзисторы и интегральные схемы.

В эксплуатации прибор прост. После балансировки моста, задания величины перегрева и установки режима V процесс измерения скорости потока и интенсивности пульсаций сводится к измерению постоянного и переменного выходных напряжений на выходе прибора. По градуировочной таблице определяется средняя скорость, а по приведенной формуле вычисляется интенсивность пульсаций скорости.

Для настройки, градуировки и аттестации термоанемометра необходимы следующие приборы и оборудование:

- двухступенчатая аэродинамическая труба;
- напорная трубка 1-го разряда с микроманометром класса 0,02;
- цифровой вольтметр типа В7-16 с погрешностью не хуже $\pm 0,1\%$;
- милливольтметр типа В3-40 с погрешностью не хуже $\pm 1,5\%$;
- генераторы сигналов типа ГЗ-104 и ГЗ-41.

Аттестация термоанемометра проводится по установленной методике с целью определения его метрологических характеристик и утверждения в качестве образцового средства измерения.

Основными характеристиками, которые определяются в процессе аттестации, являются диапазон и предельная погрешность измерения средней скорости и интенсивности турбулентных пульсаций.

Определение диапазона и погрешности измерения средней скорости потока производится с помощью образцовой двухступенчатой аэродинамической трубы и напорной трубки 1-го разряда. Чувствительный элемент термоанемометра устанавливается в широком конфузоре трубы, напорная трубка — в малом конфузоре. На выходе термоанемометра подключается цифровой вольтметр. Напорная трубка соединяется с микроманометром. После приведения аппаратуры в действие производятся отсчеты по цифровому вольтметру и микроманометру на скоростях потока 0,6, 0,8, 1,0, 1,2, 1,5, 1,8, 2,0, 2,5, 3,0, ..., 7,0 м/с. На каждой точке измерения повторяются 40 раз. При отсутствии грубых погрешностей количество отсчетов можно снизить до 20.

Результаты измерений обрабатываются с помощью ЭВМ: вычисляются и выводятся на печать таблицы значений градуировочной характеристики термоанемометра $V=f(U)$ (V — скорость потока, U — напряжение на выходе термоанемометра) и таблица значений среднего квадратического отклонения результата измерения средней скорости потока S_d .

Результаты измерений и вычислений записываются для различных $V_{ист}$ ($V_{ист}=0,5, 0,6, \dots, 7,0$ м/с) по следующей форме:

n	$V_{ист}$			
	U_i	U_{cp}	V_i	$S_{d=}$
1				
2				
...				
40				

Примечание. Здесь U_i — выходное напряжение при отдельном измерении, U_{cp} — среднее арифметическое значение выходного напряжения, $S_{d=}$ — среднее квадратическое отклонение средней скорости потока.

Среднее квадратическое отклонение средней скорости вычисляется по формуле

$$S_{d=} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V_i - V_{cp})^2}{n(n-1)}}. \quad (1)$$

Для каждой скорости определяется полная предельная погрешность результата измерений по формуле

$$\delta_n = \sqrt{(2S_{d=})^2 + \delta_{ат}^2}, \quad (2)$$

где $\delta_{ат}$ — предельная погрешность установки заданного значения скорости в аэродинамической трубе (определяется при аттестации).

Во время проведения измерений температура воздушного потока должна поддерживаться постоянной с точностью $\pm 0,5$ К. Проверка нормальности распределения полученных результатов наблюдений и правильности принятой обработки выполняется по методике, изложенной в [3].

Для определения диапазона и погрешности измерения интенсивности пульсаций скорости задается различная частота f перемещения ПИП термоанемометра от 2 до 20 Гц и на каждой частоте производятся по 10 раз измерения напряжения U_i на выходе термоанемометра милливольтметром при скоростях потока 0,5 и 7,0 м/с. Вычисляются значения интенсивности пульсаций ско-

рости потока, задаваемые в трубе ($\varepsilon_{\text{ист}}$) и измеренные по термоанемометру (ε_i), выраженные в процентах, и среднее квадратическое отклонение результата измерения интенсивности пульсаций скорости потока ($S_{d\sim}$) по формулам:

$$\varepsilon_{\text{ист}} = 0,222 \frac{fL}{V_{\text{ист}}}, \quad (1)$$

$$\varepsilon_i = \frac{4U_{\sim} \cdot U_{=}}{U_{=}^2 - U_0^2} \cdot 100, \quad (2)$$

$$S_{d\sim} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\varepsilon_i - \varepsilon_{\text{ист}}}{\varepsilon_{\text{ист}}} \right)^2}{n(n-1)}}, \quad (3)$$

где L — амплитуда перемещения ПИП; $U_{\sim} U_{=}$ — переменное и постоянное напряжения на выходе термоанемометра при заданной средней скорости; U_0 — постоянное выходное напряжение при $U=0$.

Для каждой заданной величины интенсивности определяется полная предельная погрешность измерения по формуле

$$\delta_{\text{п}\sim} = \sqrt{(2S_{d\sim})^2 + \delta_{\text{АТ}\sim}^2}, \quad (6)$$

где $\delta_{\text{АТ}\sim}$ — предельная погрешность интенсивности пульсации скорости потока в аэродинамической трубе.

Результаты измерений и вычислений записываются в таблицу определенной формы для различных $V_{\text{ист}}$ ($V_{\text{ист}}=0,5, 0,6, \dots, 7,0$ м/с) и объединяются в одну сводную таблицу каждого значения f ($f=2, 4, \dots, 20$ Гц). Форма записи следующая:

n	$V_{\text{ист}}$				
	U_i	ε_i	$\varepsilon_{\text{ист}}$	$S_{d\sim}$	$\delta_{\text{п}\sim}$
1					
2					
...					
10					

Кроме рассмотренных основных характеристик, при аттестации определяются стабильность показаний термоанемометра, порог чувствительности и амплитудно-частотная характеристика. До начала аттестации проверяется наличие необходимой технической документации и соответствие прибора чертежам. Результат аттестации оформляется протоколами, на основании которых составляется свидетельство о метрологической аттестации термоанемометра.

В период эксплуатации термоанемометр подлежит проверке в установленные сроки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блантер Д. Я., Кузьмин В. А., Попов А. И. Труба для градуировки измерителей малых скоростей воздушного потока. — Труды метрологических институтов СССР, 1976, вып. 194(254).
2. Блантер Д. Я., Рогалев Ю. В. Результаты метрологической аттестации образцовых аэродинамических труб. См. наст. сборник.
3. Бурдун Г. Д., Марков Б. Н. Основы метрологии. — М.: Изд-во стандартов, 1975.
4. Образцовые средства измерения скорости воздушного потока, их исследование и аттестация/Н. П. Фатеев, Б. Л. Сущинский, В. А. Кузьмин, Д. Я. Блантер. — Труды ГГО, 1977, вып. 392.

Б. Я. Толстобров, Н. П. Фатеев

ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА АБСОЛЮТНЫМИ МЕТОДАМИ

В практике измерений скорости воздушного потока наибольшее распространение получили методы измерения, в которых в качестве первичного измерительного преобразователя применяются различного рода механические ветроприемники, находящиеся в соприкосновении с движущейся средой (винтовые и чашечные анемометры, пневмометрические напорные трубки, термоанемометры). Такие приемники вносят нежелательные искажения в исследуемый поток, а результат измерения в значительной степени зависит от свойств чувствительного элемента. Поэтому для особо точных измерений, при воспроизведении шкалы и передаче размера единицы скорости потока воздуха необходимы абсолютные методы и преобразователи неконтактного типа, обладающие стабильностью своих характеристик.

Современные требования, предъявляемые к эталонным измерителям скорости воздушного потока, могут быть достаточно полно удовлетворены с помощью бесконтактных методов, среди которых следует выделить лучевые (лазерные и акустические), а также анемометры с тлеющим разрядом (искровые).

В последние годы успешно развивается лазерная анемометрия, представляющая собой совокупность методов решения обратной задачи взаимодействия лазерного излучения с исследуемой средой. При взаимодействии лазерного излучения со средой может изменяться любой из параметров электромагнитной волны лазерного пучка: амплитуда, фаза, частота, состояние поляризации и направление распространения. Если исследуемый поток содержит оптические неоднородности, движущиеся вместе с потоком, то, определяя тот или иной параметр зондирующего пучка, можно определить их скорость, а следовательно, и скорость воздушного потока. Таким образом, нужная нам информация о потоке заложена в параметрах электромагнитной волны рассеянного света.

В лазерной анемометрии значение скорости ветра в текущий момент времени определяется, как правило, по доплеровскому

двигу частоты света, рассеянного на движущихся оптических неоднородностях, который является линейной функцией скорости потока. В качестве таких неоднородностей могут выступать флуктуации показателя преломления исследуемого потока, естественная запыленность, либо искусственно введенные инородные частицы, показатель преломления которых отличается от показателя преломления зондируемой среды. Поскольку в последнем случае интенсивность рассеянного света значительно больше, то в лазерных измерителях скорости потока именно этот тип рассеяния и нашел наибольшее распространение. Поэтому одним из важных практических вопросов лазерной анемометрии является определение оптимальных размеров, формы и концентрации, а также оптических свойств (фазовых характеристик когерентного поляризованного света), примесей, используемых в качестве рассеивающих центров. В общем случае размер частиц должен быть меньше длины волны излучения лазера.

В общем виде лазерный измеритель скорости потока включает себя источник когерентного светового излучения, оптическую систему, направляющую лазерный луч в исследуемую область движущихся неоднородностей, приемную оптику, выделяющую рассеянный неоднородностями свет, схему сравнения частот сигнального и опорного пучков и схему измерения доплеровской частоты.

В некоторых анемометрах обычно требуется небольшая мощность излучения и в основном используются разовые лазеры непрерывного действия, обладающие достаточно высокой временной и пространственной когерентностью излучения. Импульсные лазеры используются крайне редко из-за сложности обработки получаемой информации.

Идеи лазерной анемометрии были заимствованы из радиолокации, где эффект Доплера широко используется. Для определения скорости потока, помимо измерения частоты падающей на частицу волны, необходимо знать и геометрические особенности потока. Однако существенная разница в длинах волн оптического и радиодиапазонов позволила использовать в лазерной анемометрии схемы с двумя зондирующими волнами и исключить зависимость приемного устройства от направления приема. В этом случае доплеровский сдвиг частоты определяется только разностью частот падающих пучков и скалярным произведением вектора скорости и разностного вектора двух падающих пучков. Это по-

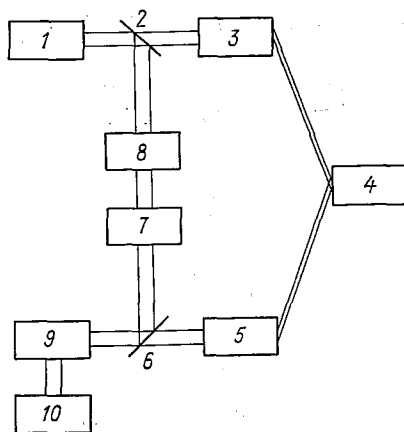


Рис. 1. Схема лазерного анемометра с одним зондирующим пучком.

зволило создать односторонние схемы и производить исследования потока на больших расстояниях от прибора. Разность двух падающих пучков не зависит от направления приема рассеянного света и однозначно связана со скоростью движения светорассеивающих центров.

Лазерный метод дает большие преимущества при измерении скорости турбулентного потока, в котором возникают несоответствия скорости частицы скорости исследуемого потока.

Ввиду малых мощностей рассеянного излучения (10^{-10} Вт и меньше) при частоте модуляции до сотен МГц в лазерных анемометрах в качестве приемников чаще используются фотоэлектронные умножители, которые обладают достаточной чувствительностью и быстродействием. При этом очень важно знать зависимость параметров фотоприемника от параметров падающего на него рассеянного излучения.

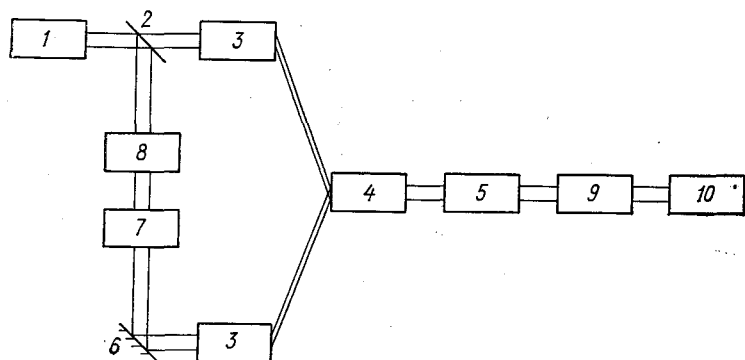


Рис. 2. Схема лазерного анемометра с двумя зондирующими пучками.

Информацию, заключенную в частоте электромагнитной волны, обычно выделяют методом детектирования, методом фотосмещения или оптическим спектральным методом.

Источником излучения в лазерном анемометре (рис. 1) является лазер 1. С помощью расщепителя 2 лазерный пучок делится на два пучка: сигнальный и опорный. Сигнальный пучок оптической системой 3 направляется на исследуемый объект 4, на котором происходит рассеяние света. Рассеянный свет собирается приемной оптикой 5 и через узел совмещения пучков 6 попадает в блок выделения доплеровского сдвига частот 9. Туда же попадает и опорный пучок, предварительно пройдя через систему выравнивания оптического пути, состоящую из линии задержки и однополосного модулятора 7, сдвигающего исходную частоту на величину, равную доплеровской частоте. В блоке 9 происходит сравнение частоты рассеянного излучения с частотой опорного пучка.

а лазера, а в блоке 10 — окончательная обработка выделенного сигнала.

Схема лазерного анемометра с двумя зондирующими пучками (рис. 2), отличается от рассмотренной выше схемы тем, что исследуемый поток зондируется двумя пучками когерентного света соответственно в блок 9 направляется рассеянный свет, в котором содержатся две волны.

Как видно из рассмотрения принципа действия лазерного анемометра, аналогом скорости потока является мгновенная частота доплеровского сигнала, снимаемого с выхода фотоприемника. Следовательно, в блоке 10 возможны два способа обработки сигнала. Первый из них связан с демодуляцией частоты и преобразованием доплеровского сигнала в аналог пульсаций локальной скорости, а второй — в непосредственном проведении корреляционного и спектрального анализа доплеровского сигнала.

На другом принципе работает лазерный фотонный корреляционный анемометр [2], который состоит из лазера, оптической системы, расщепителя луча, детектора фотонов и корреляционного процессора.

С помощью расщепителя лазерный луч расщепляется на два пучка, которые образуют интерференционное поле. Скорость потока определяется по времени прохождения инородными частицами между интерференционными максимумами этого поля, при пересечении которых возникают вспышки света, улавливаемые детектором фотонов. На выходе детектора фотонов получаются электрические импульсы, которые при помощи процессора подвергаются корреляционному анализу. Анемометр обладает широким диапазоном измерения скоростей, от нескольких сантиметров в минуту до 500 м/с, с погрешностью порядка 1 %.

Использование оптических методов измерения параметров потока с помощью лазеров позволяет иметь анемометры, обладающие широким диапазоном измерения скоростей 10^{-6} — 10^{-4} м/с, хорошим пространственным разрешением (число независимых измерений в единице объема 10^3 мм $^{-3}$, хотя принципиально можно достичь разрешения до 10^9 мм $^{-3}$) и имеющие большую чувствительность (минимально обнаруживаемую концентрацию в потоке частиц с заданными оптическими свойствами), малую погрешность измерений (не превышающую $\pm 1,5$ % в диапазоне скоростей, встречающихся в естественных условиях).

Выше уже говорилось, что лазерный анемометр измеряет скорость частиц, служащих светорассеивающими центрами. При измерении скорости потока очень важно, чтобы эти частицы точно следовали за потоком. Поэтому лазерные методы накладывают определенные требования на параметры частиц, которые в основном сводятся к тому, чтобы их размер был как можно меньше, плотность была близка к плотности среды. Нижний предел, определяемый наличием броуновского движения, составляет приблизительно 0,1 мкм. Кроме того, поведение частиц в турбулентном потоке также зависит от частоты турбулентных пульса-

ний. Естественно, что чем выше частота, тем больше будет не соответствие скорости частицы скорости исследуемого потока. Проблема отставания частиц становится тем острее, чем сильнее отличаются плотности частиц и среды и чем выше частота исследуемых пульсаций.

В так называемых кинематических методах измерений скорости потока искомая величина определяется по времени прохождения меченой частицей известного пути между двумя точками. Известны методы, в которых используются твердые частицы [1], нагретый воздух [3], плазма [5] и другие неоднородности. Время перемещения их между двумя реперными точками регистрируется с помощью оптических, радиотехнических и других способов.

Суть измерения скорости при помощи оптического кинематического метода заключается в том, что в исследуемый поток направляются два лазерных пучка, отстоящих друг от друга на определенном расстоянии. Пересекая эти пучки, оптическая неоднородность вызывает рассеяние света, который улавливается фотоприемником. Измеряя временной сдвиг между двумя вспышками, определяют скорость ветра.

В анемометрах с импульсным нагревом нити [1] определение скорости производится по температурным неоднородностям потока, которые формируются и обнаруживаются с помощью тонких металлических нитей, находящихся на небольшом расстоянии друг от друга и расположенных перпендикулярно потоку.

Достоинством этих методов является то, что скорость измеряется непосредственно, т. е. они абсолютны. К сожалению, выходной сигнал таких анемометров является нелинейной функцией скорости.

Плазменные анемометры относятся к числу приборов, в которых сочетаются положительные свойства рассмотренных выше приборов. На использовании анемометрических свойств плазмы основаны анемометры с тлеющим и коронным разрядами, а также искровые анемометры.

В анемометрах с тлеющим разрядом используется зависимость напряжения пробоя воздушного промежутка между двумя электродами от длины этого промежутка, который определяется величиной скорости потока. Режим работы такого анемометра определяется величиной подаваемого на электроды напряжения. При напряжении в несколько сотен вольт между электродами, расположенными на расстоянии примерно 100 мкм, образуется тлеющий разряд (голубое свечение у катода). При токе порядка 10 мА в данном анемометре наблюдается обгорание электродов, которые к тому же весьма чувствительны к загрязнению воздуха. В связи с этим происходит дрейф градуировочных зависимостей. Уменьшение дрейфа можно достичь за счет увеличения напряжения.

При подаче напряжения в несколько киловольт между электродами, разнесенными на несколько миллиметров, возникает коронный разряд при меньшей величине тока. Недостатком анемо

метров этого типа являются нелинейная зависимость выходного сигнала от скорости потока и непостоянство градуировки во времени, что затрудняет их использование в качестве образцовых.

Более перспективными для этих целей являются высокочастотные искровые анемометры [5]. Искровые анемометры могут работать в двух режимах: в режиме прогиба и в режиме срыва искры. В режиме срыва искры они обеспечивают измерение скорости потока в диапазоне от 3—5 м/с до 1—1,5 м/с. Этот режим работы аналогичен режиму работы анемометров с тлеющим разрядом. При скоростях, больших 1—1,5 м/с, они работают в режиме срыва искры.

Идея искрового метода состоит в том, что под действием достаточно большого электрического напряжения воздух, находящийся в межэлектродном промежутке, в результате ударной и фотонной ионизации становится электропроводным и между электродами (при достаточной мощности источника питания) возни-

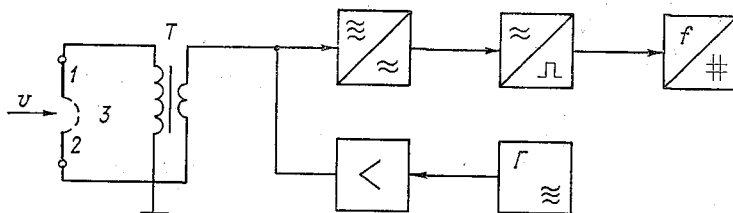


Рис. 3. Схема искрового анемометра с разрядником.

кает четко очерченный искровой канал, способный деформироваться (прогибаться) под воздействием динамического давления набегающего воздушного потока. Когда прогиб искрового капала достигает определенного значения, происходит его срыв. Моменту срыва предшествует возникновение новой искры. При этом частота срывов искрового канала в довольно широком диапазоне скоростей оказывается линейной функцией скорости потока (экспериментальная проверка производилась до 40 м/с).

Первичный измерительный преобразователь представляет собой устройство, содержащее игольчатый разрядник 1—2, включенный в цепь вторичной обмотки высокочастотного трансформатора (рис. 3). Electroды разрядника выполнены из платиновой проволоки диаметром 0,4 мм.

Электрическая схема анемометра состоит из двух самостоятельных блоков. Первый блок предназначен для питания разрядника и включает в себя задающий генератор Г и усилитель мощности. Генератор настраивается на частоту 90—100 кГц. Мощность, отбираемая датчиком, составляет 10—15 Вт. Второй блок является измерительным и предназначен для выдачи на регистрирующее устройство напряжения, пропорционального измеряемой

«скорости ветра. Электрическая схема этого блока образует тракт, состоящий из высокочастотного генератора, усилителя-ограничителя, преобразователей низкочастотных колебаний (срывов искры) в аналоговую или цифровую форму и регистрирующее устройство.

Чувствительность анемометра равна примерно $330 \text{ Гц} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}$. Ввиду малых диаметров искрового канала пространственная разрешающая способность сравнима с пространственной разрешающей способностью термоанемометров с нагретой нитью или лазерного анемометра. Поскольку величина пробивного напряжения между электродами зависит от плотности воздуха, то ее значительные изменения должны быть учтены.

Искровой анемометр может быть построен и на использовании кинематического метода измерения скорости воздушного потока. В этом случае разрядные электроды расположены параллельно друг другу и установлены вдоль потока, а токосъемный электрод находится между разрядными электродами и установлен перпендикулярно потоку.

В целях уменьшения расстояния между концами разрядных электродов последние заострены и слегка подогнуты в направлении к друг другу. Это необходимо для того, чтобы в момент подачи напряжения на разрядные электроды пробой воздушного промежутка происходил в зазоре между концами электродов. Сформированная на концах электродов искра под действием динамического напора смещается вместе с потоком до пересечения ее с токосъемным электродом. При этом в системе питания электродов вырабатывается импульс гашения, который блокирует цепь питания разрядника. В этот момент производится искусственно срыв искры, после чего процесс повторяется. Новая искра вновь возникает на концах электродов и через время обратно пропорциональное скорости потока снова достигает токосъемного электрода. Измеряя частоту следования импульсов, находим значения скорости потока, которые связаны между собой линейно.

Описанный метод лишен перечисленных выше недостатков, свойственных плазменным анемометрам, работающим в режиме прогиба и срыва искры.

Рассмотренные методы измерений находят все большее применение в метеорологических исследованиях. Обладая рядом отмеченных преимуществ, они дают возможность осуществить абсолютные измерения и могут быть рекомендованы для использования при создании образцовых и эталонных приборов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брэдшоу П. Введение в турбулентность и ее измерение: Пер. с англ.— М.: Мир, 1974. — 278 с.
2. Застрогин Ю. Ф., Белевитнев В. Р. Лазерные измерительные приборы на выставке «Метрология-77». — Приборы и системы управления, 1978, № 1.

60 c.

И. П. Фатеев.—Труды ГГО, 1977, вып. 392.

1976, вып. 7, с. 126—130.

ып. 361.

44215

Ю. В. Рогалев, Н. П. Фатеев

МЕТОДЫ ПОВЕРКИ АВТОМАТИЧЕСКИХ МЕТЕОСТАНЦИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПОДВИЖНЫХ ПОВЕРОЧНЫХ ЛАБОРАТОРИЙ

Опыт работы с автоматическими метеорологическими станциями (АМС) на сети станций Госкомгидромета показал острую необходимость в создании подвижных средств поверки, с помощью которых можно было бы выполнять поверочные работы с АМС непосредственно на месте эксплуатации.

Вопросы создания передвижных поверочных лабораторий (ППЛ) рассматривались и ранее [4, 6], но это были лаборатории для поверки средств измерения (СИ) общего назначения или определенного типа СИ, что несколько упрощало задачу их комплектации образцовыми СИ. Для целей поверки АМС на месте эксплуатации требуется комплектная ППЛ, снабженная малогабаритным поверочным оборудованием и образцовыми СИ необходимой точности. При использовании такой ППЛ отпадает необходимость в демонтировании и транспортировке измерительных преобразователей (ИП) или центрального устройства (ЦУ) АМС в поверочные органы для периодической поверки в стационарных условиях, и тем самым достигается большой экономический эффект.

Вместе с тем требования к метрологической надежности АМС достаточно велики и могут быть обеспечены лишь при высоком качестве поверки [5, 15].

Основные направления в создании ППЛ были предложены в работах [17, 18, 19], где изложены методические основы поверки АМС, и рекомендуется разработанная для этих целей аппаратура. В настоящей статье рассматриваются некоторые методы поверки АМС на месте эксплуатации по отдельным каналам измерения с конкретной их реализацией в условиях ППЛ.

Обеспечение единства и достоверности измерения какой-либо физической величины по каналам АМС достигается строгим соблюдением поверочных схем, которые устанавливают определенный порядок передачи размера единицы от образцовых СИ к ра-

бочим СИ [19]. При поверке в ППЛ должна осуществляться передача размера единицы от образцового СИ к поверяемому СИ. Обычно это связано с заданием величины и ее измерением образцовым прибором, поверенным по образцовому прибору более высокого разряда в нормальных условиях и поэтому требуется, чтобы образцовый прибор подвергался наименьшему числу влияющих факторов.

В принципе эта задача может быть решена благодаря существованию абсолютных методов измерений и конкретной приборной реализацией их в условиях ППЛ.

Для построения ППЛ предложено два варианта. Первый — это размещение в составе ППЛ контрольно-поверочных установок, с помощью которых воспроизводится стационарная во времени физическая величина метеопараметра в любой точке диапазона. Второй — размещение в составе ППЛ портативного образцового контрольно-поверочного оборудования инспекторского типа, с помощью которого осуществляется определение сохранности градуировочных характеристик каналов измерения АМС в ограниченном участке диапазона. В любом из вариантов построения ППЛ достигаются организационный и экономический эффекты поверки АМС на месте эксплуатации, причем с точностью, значительно превосходящей существующую.

В первом варианте ППЛ включает в себя комплект поверочного оборудования для создания стабильного во времени значения метеопараметра, в который входят: грузопоршневой манометр абсолютного давления (МАД в комплекте с барокамерой или бароколономкой), термогигростат (ТГС) с косвенным заданием относительной влажности воздуха по методу «двух температур», обеспечивающий возможность поверки каналов измерения температуры и влажности воздуха АМС в области положительной и отрицательной температуры, малогабаритная аэродинамическая труба (АТ) и имитатор выходных сигналов (ИП), позволяющий осуществлять на месте эксплуатации настройку, регулировку и поверку ЦУ АМС [13].

Дополнительно в состав ППЛ вводятся необходимые стандартные контрольно-измерительные приборы и вспомогательное оборудование (осциллограф, генераторы импульсов, частотомер, тестер и т. п.), а также походное оборудование и инструмент для профилактического ремонта. Технические характеристики основного поверочного оборудования представлены в табл. 1. Весь комплект поверочного оборудования размещается в кузове автомашины и позволяет оперативно обслужить определенную сеть АМС [17].

Рассмотрим методы поверки АМС с применением этого комплекта поверочного оборудования. В качестве ИП атмосферного давления в АМС используются различные по конструкции, габаритам и принципу действия устройства. Так, в АМС типа М-106М применен ртутный барометр с фотоследящей системой за уровнем ртути в трубке, в АМС типа М-107 применен блок anerоидных

**Перечень основного поверочного оборудования
и его метрологические характеристики для ППЛ**

(I вариант)

Поверочное оборудование	Диапазон измерения (имитации)	Предел допускаемой погрешности
Манометр МАД в комплекте с баро-установкой	$2,7 \cdot 10^3 \dots 1100$ гПа	± 10 Па
Термогигростат		
влажность воздуха	30...100 %	± 2 %
температура воздуха	$-60 \dots +50$ °C	$\pm 0,1$ °C
Малогабаритная аэродинамическая труба		
предельная погрешность измерения скорости потока	0,5...20 м/с	10...2 %
неравномерность поля скоростей	0,5...20 м/с	3...4 %
нестабильность потока	—	Не более 3 %
нестабильность в рабочей зоне поля турбулентных пульсаций	—	Не более 2...3 %
угол скоса потока	—	Не более 2
предельная погрешность определения коэффициента сопла	—	Не более 1,4 %
Имитатор выходных сигналов ИП		
по температуре воздуха	$-60 \dots +50$ °C	$\pm 0,2$ °C
по влажности воздуха	20...100 %	± 2 %
по скорости ветра	0...60 м/с	± 2 %
по направлению ветра	0...360°	± 3 %
по атмосферному давлению	570...1090 гПа	± 10 Па
по высоте нижней границы облаков	50...2000 м	± 2 %
по метеорологической дальности видимости	50...6000 м	± 2 %
по количеству жидких осадков	0,5...50 мм	± 1 %
по солнечному сиянию	Наличие — отсутствие	—

барокоробок со счетным механизмом, в АМС типа КРАМС-М применяется вакуумированный сильфон, в котором под воздействием атмосферного давления развивается усилие, преобразуемое автоматическим силокомпенсационным устройством и счетным механизмом в значение атмосферного давления. Предел допускаемой погрешности измерения давления Δ_d этими ИП от $\pm 0,15$ до $\pm 0,2$ гПа (у ИП станции М-107 значение $\Delta_d = \pm 1,0$ гПа).

Для обеспечения надлежащей точности поверки ИП такого класса и в соответствии с требованиями поверочной схемы [19] необ-

одимо образцовое СИ с величиной погрешности не хуже $\pm (0,05 \dots 0,1 \text{ гПа})$. Такое СИ должно обеспечивать поверку ИП в широком диапазоне давлений, быть переносным и удобным эксплуатации. Для решения этой задачи был разработан инспекторский манометр абсолютного давления, который применяется в комплекте с барокамерой. Эта установка позволяет также проверять контрольные и инспекторские ртутные барометры, барографы-анероиды, радиозонды. Поверка может быть осуществлена двумя способами: 1) поверка производится при текущем атмосферном давлении (контрольные и инспекторские ртутные барометры) или в широком диапазоне давлений, создаваемых в барокамере (барометры-анероиды, барографы, ИП АМС); 2) поверка производится при различных, наперед заданных значениях грузов, накладываемых на приемную тарелку поршня МАД и уравновешивающих давление, действующее на поршень. Соответствующее давление в барокамере (или в бароколонке) достигается системой «откачивание — нагнетание» в момент равновесия поршня. Момент равновесия фиксируется нуль-индикатором. Второй способ более удобен и обладает повышенной точностью.

Применяемые в АМС ИП влажности воздуха должны обеспечивать измерение и регистрацию влажности воздуха как в области положительных, так и в области отрицательных температур. В то же время существующая методика поверки этих ИП основана на использовании гигростатов с заданием влажности при комнатной температуре и не выявляет погрешности их при отрицательной температуре среды, в которой они эксплуатируются. В ГГО была разработана конструкция термогигростата, принцип действия которого основан на методе двух температур [11], а в работе [8] детально дан анализ погрешностей такого гигрометрического комплекса. Для передачи единицы влажности в этом комплексе используется жесткая термодинамическая зависимость между температурой и упругостью насыщения водяных паров, выражаемая соотношением

$$E = E_0 \exp \frac{L}{k} \frac{T - T_0}{T \cdot T_0}, \quad (1)$$

где k — постоянная Больцмана, L — теплота фазового перехода воды, T — температура в кельвинах, T_0 — тройная точка воды, E_0 — соответствующая этой температуре упругость насыщения.

Принцип получения влажности в ТГС состоит в насыщении замкнутого воздушного объема водяным паром при определенном значении температуры T_1 с последующим повышением температуры этого объема до необходимого значения T_2 при $p = \text{const}$. Относительная влажность ϕ (в процентах) вычисляется по двум измеренным значениям температуры и соответствующим им значениям упругости насыщения водяных паров

$$\phi = \frac{e_{T_1}}{e_{T_2}} \cdot 100. \quad (2)$$

Значения e_{T_1} и e_{T_2} находят из психрометрических таблиц.

Передачу единицы влажности можно осуществить в термогигростате с применением гигрометра точки росы (ГТР) [22], т. е. в ППЛ должен быть размещен комплекс ТГС—ГТР. Измерение и регулирование температуры в камерах ТГС осуществляется с помощью двух контрольных платиновых термометров сопротивления или термисторов. Поддержание температуры в обеих камерах осуществляется автоматически с погрешностью, не превышающей $\pm 0,1^\circ\text{C}$. В ТГС возможна поверка лишь чувствительных элементов влажности и температуры воздуха АМС, т. е. требуется разборка ИП.

Передача единицы скорости воздушного потока осуществляется с помощью образцовой аэродинамической трубы, аттестованной до скорости потока 5 м/с по образцовому термоанемометру и от 5 м/с до верхнего предела измерений по образцовой напорной трубке 1-го разряда в комплекте с микроанометром МКВ-250. Используемые в АМС в качестве ИП скорости воздушного потока анеморумбометры требуют индивидуальной градуировки вследствие неидентичности аэродинамических характеристик ветроприемников, которые к тому же могут меняться в процессе эксплуатации. Существующая методика поверки и градуировки ветроизмерительных приборов по диапазону измерения с применением больших АТ здесь неприемлема и используется при первичной поверке (после выпуска из производства или после капитального ремонта) в стационарных условиях. Для поверки ИП скорости ветра АМС на месте эксплуатации требуется малогабаритная труба, которая позволила бы осуществить поверку ИП по ограниченному числу точек диапазона измерения ввиду линейной зависимости $N_{\text{вых}} = f(V_{\text{АТ}})$ и которая могла бы быть введена в состав ППЛ.

Для этой цели в ГГО была разработана и аттестована малогабаритная АТ [20], которая позволяет задавать значения скорости воздушного потока в диапазоне 0,5—20 м/с. Для повышения эксплуатационной надежности, прочности и уменьшения общей массы ее разборные секции и лопасти выполнены из стеклопластика. Плавное регулирование скорости потока в трубе обеспечивается вариатором на теристорах. В качестве образцового СИ потока в рабочей части трубы используется микроанометр, подключаемый к коллекторным отверстиям в срезе сопла. В работе [3] предложен метод градуировки в такой трубе с использованием уравнения, связывающего скорость потока V со скоростью вращения ветроприемника N

$$V = \sqrt{AN^2 + B}. \quad (3)$$

Здесь коэффициенты A и B , зависящие от параметров ветроприемника, могут быть определены по 3—4 сравнительным отсчетам скорости вращения ветроприемника и скорости потока в трубе. Применение этого метода позволяет избежать необходимости градуировки во всем рабочем диапазоне измерения скорости и применять при этом малогабаритные АТ. Для получения в рабочей

асти трубы достаточно равномерного воздушного потока, обеспечивающего необходимую точность поверки ИП, применены выравнивающие устройства. Специальный обтекатель, хонейкомб, спрямляющая решетка, установленные в форкамере, а также сопло поджатием потока устраняют закрутку потока, уменьшают его турбулентность и скос, тем самым увеличивая равномерность потока по сечению в рабочей части АТ.

Центральное устройство АМС представляет собой сложный комплекс для получения, обработки и выдачи метеоинформации, который требует в процессе эксплуатации периодической проверки охранности своих характеристик. Комплексная поверка ЦУ обычно осуществлялась при подключенных к нему ИП на стационарном поверочном оборудовании. Однако такая методика поверки является очень трудоемкой и не всегда эффективной. Поэтому целесообразно применять раздельную поверку ИП и ЦУ АМС. В этом случае, для поверки ЦУ можно использовать комплект стандартных приборов, вводимых в состав ППЛ, которые позволяют задавать на вход ЦУ электрические величины, соответствующие выходным параметрам ИП при наперед заданных или точно рассчитанных значениях метеорологических элементов. Поверка ЦУ в этом случае заключается в сравнении полученных на его выходе метеопараметров с величинами, задаваемыми на входе ЦУ с помощью комплекта стандартных приборов.

С целью упрощения этой методики и повышения оперативности и точности поверки было разработано и исследовано специальное устройство — имитатор для поверки ЦУ [12, 13, 14]. Конструктивно имитатор выполнен в виде настольного прибора, на лицевой панели которого расположены органы управления и переключатели имитируемых сигналов. С помощью имитатора возможна поверка ЦУ по всем каналам измерения и в любой точке диапазона с наименьшей погрешностью имитации. Имитатор позволяет также осуществить поверку ИП скорости ветра АМС автономно без ЦУ на месте эксплуатации.

Анализируя первый вариант структурного построения ППЛ с перечисленным выше набором контрольно-поверочной аппаратуры, можно сказать, что с его помощью возможна поэлементная поверка каналов измерения АМС на месте эксплуатации, т. е. поверка отдельно ИП и ЦУ.

Проанализируем далее методы поверки с применением контрольно-поверочного оборудования инспекторского типа (2-й вариант построения ППЛ). Во втором варианте ППЛ может быть укомплектована контрольно-поверочным оборудованием и образцовыми СИ, технические характеристики которых представлены в табл. 2. В этот комплект входят: имитатор для поверки метеорологических характеристик ЦУ АМС; инспекторский манометр абсолютного давления ИМАД-4М для поверки канала измерения атмосферного давления в целом; комплект контрольных и поверочных приспособлений, предназначенный для контроля сохранности геометрических размеров ветроприемника [16]; устройство

**Перечень основного поверочного оборудования
и его метрологические характеристики для ППЛ
(II вариант)**

Поверочное оборудование	Диапазон измерения (задания)	Предел допускаемой погрешности
Инспекторский манометр абсолютного давления (ИМАД-4М)	670...1100 гПа	$\pm 0,15 \cdot 10^{-2}$ Па
Имитатор выходных сигналов ИП	См. табл. 1	—
Жидкостная термованна в комплекте с потенциометром Р-307	+18... +25 °C	—
Устройство для поверки средств измерения температуры (УПСИТ)	80...600 с (при -50...+50 °C)	—
Термометр ртутный лабораторный (ТЛ-4)	-30...+20 °C	$\pm 0,1$ °C
Устройство для поверки средств измерения влажности (УПСИВ)	20...900 с (при 30...98...100 %)	—
Гигрометр точки росы (ГТР М116М)	-40...+40 °C	$\pm 0,4$ °C по температуре точки росы
Комплект поверочных приспособлений для поверки ИП скорости ветра		
приводной механизм	5,5 м/с	$\pm 0,3$ м/с
контршаблон	—	$\pm 51' 10' \pm 6'$
лимб	0...360°	Цена деления 1°
стрелка	—	—
грузики	6,3 г 16 г	$\pm 0,1$ г $\pm 0,2$ г
индикатор часового типа ИЧ-10	—	Цена деления 0,01 мм

для проверки сохранности метрологических характеристик канала измерения влажности воздуха (УПСИВ); устройство для проверки сохранности метрологических характеристик канала измерения температуры воздуха (УПСИТ); малогабаритная жидкостная термованна в комплекте с образцовым термометром; раскручивающее устройство для проверки канала измерения скорости ветра при двух (или более) фиксированных скоростях; стандартные контрольно-измерительные приборы (потенциометр, образцовые катушки, нормальный элемент и т. п.). Во втором варианте структурного построения ППЛ входящее в ее состав контрольно-поверочное оборудование значительно меньше по массе и габаритам и позволяет осуществлять проверку сохранности метрологических характеристик по каналу измерения метеопараметра в целом, т. е.

исключается поэлементная поверка канала и не нарушается конструкция ИП АМС (не извлекаются чувствительные элементы из ИП кроме ИП скорости ветра, где приходится снимать винт). Однако следует отметить, что при этом варианте ППЛ определение сохранности градуировочных характеристик каналов измерения АМС осуществляется в узком участке рабочего диапазона (при текущих значениях измеряемого метеопараметра). Процесс поверки в этом случае может быть построен следующим образом. Определяют сохранность градуировочной характеристики канала измерения в целом путем сличения с образцовым СИ. В случае выхода предела допускаемой погрешности за нормированный допуск производят отключение ИП АМС от ЦУ и с помощью имитатора осуществляют поверку ЦУ. Если погрешность измерения ЦУ находится в пределах нормированного допуска, выявляют причины неправильной работы ИП и при необходимости прибор отправляют в ремонт с последующей полной поверкой его.

Рассмотрим физические принципы поверки АМС на месте эксплуатации при 2-м варианте построения ППЛ. В естественных условиях воздействующий на вход канала измерения (на ИП) метеопараметр не является стационарным, а имеет некоторые флуктуации во времени, т. е. представляет собой случайный процесс. Следовательно, выходной сигнал с ИП и соответственно измеренное его значение на выходе канала измерения (на выходе ЦУ) является как функцией времени, так и функцией динамических характеристик непосредственно самого ИП.

При определении сохранности градуировочной характеристики в условиях эксплуатации АМС, когда воздействие измеряемого метеопараметра на вход ИП и на образцовое СИ одинаково, но функции динамического преобразования образцового СИ и поверяемого канала различны, в результатах сличения появится динамическая составляющая погрешности $\Delta_{\text{дин}}$. Предел допускаемой погрешности измерения по каналу включает как статическую $\Delta_{\text{ст}}$, так и динамическую $\Delta_{\text{дин}}$ составляющие погрешности, т. е. при динамическом режиме поверки каналов АМС погрешность любого единичного отсчета может быть представлена выражением

$$\Delta_i = \Delta_{\text{ст}_{i(k)}} + (\Delta_{\text{дин. об}} - \Delta_{\text{дин. к}}), \quad (4)$$

где $\Delta_{\text{ст}_{i(k)}}$ — погрешность единичного отсчета по любому из каналов измерения АМС в статическом режиме поверки, $\Delta_{\text{дин. об}}$ — динамическая составляющая погрешности образцового СИ, $\Delta_{\text{дин. к}}$ — динамическая составляющая погрешности поверяемого канала АМС.

Преобразуем выражение (4) к виду

$$\Delta_{\text{ст}_{i(k)}} = \Delta_i - (\Delta_{\text{дин. об}} - \Delta_{\text{дин. к}}). \quad (5)$$

Из (5) видно, что при сличениях в естественных условиях для исключения влияния на результат измерения составляющей $\Delta_{\text{дин}}$

необходимо, чтобы выполнялось условие, при котором $(\Delta_{\text{дин. об}} - \Delta_{\text{дин. к}}) = 0$. Это становится возможным при условии идентичности функций динамического преобразования поверяемого канала и применяемого образцового СИ.

Техническая реализация этого положения может быть осуществлена коррекцией искусственным путем постоянной времени образцового СИ ($\tau_{\text{об}}$) или постоянной времени поверяемого канала АМС ($\tau_{\text{к}}$), если они известны. Так как одним из требований поверки в естественных условиях является требование ненарушения конструкции ИП, то необходимо осуществлять коррекцию $\tau_{\text{об}}$ для образцового СИ. В работах [9, 10] приведены теоретические и экспериментальные исследования по обоснованию методов поверки в естественных условиях каналов измерения температуры и влажности АМС, при которых погрешность поверки может быть сведена к минимуму. В основу метода положен принцип корректирования функции динамического преобразования образцового СИ. Разработаны два устройства на этом принципе [1, 2], с помощью которых осуществляется поверка каналов измерения температуры и влажности воздуха АМС на месте эксплуатации. Эти устройства включены в состав ППЛ второго варианта и проходят опробование в БП УГМС БССР. В ППЛ второго варианта предусмотрена также и поэлементная поверка ИП температуры воздуха по одной точке диапазона измерения в жидкостном термостате путем сличения с образцовым термометром. Погрешность поверки ИП в этом случае будет определяться погрешностью выбранной схемы измерения (δ_1) (классом точности измерительного моста), погрешностью из-за нестability температуры в рабочем объеме термостата (δ_2) и погрешностью применяемого образцового СИ (δ_3). Исследования, приведенные в работе [7], показали, что суммарная погрешность поверки в жидкостном термостате с применением потенциометра Р-348 $\sum \delta_{\text{н}}$ составила $\pm 0,011^\circ\text{C}$, т. е. практически погрешность поверки не внесет существенных искажений в результаты сличений канала измерения температуры АМС на месте эксплуатации.

Проверка сохранности градуировочной характеристики канала измерения скорости ветра состоит в определении геометрических и механических параметров ветроприемника АМС.

Выходным параметром ИП скорости ветра является число оборотов в единицу времени, преобразуемое в последовательность электрических импульсов. Число импульсов n в единицу времени на выходе ИП пропорционально измеряемой скорости воздушного потока V , т. е.

$$n = f(V). \quad (6)$$

При установившемся движении для скорости вращения винта с учетом сил трения и индуктивного сопротивления выражение (6) можно представить в виде

$$U = V \operatorname{tg}(\alpha - \gamma), \quad (7)$$

де U — линейная скорость вращения винта; α — угол атаки лопастей винта; γ — угол, зависящий от сил трения и индуктивного сопротивления.

В свою очередь зависимость U от n определяется уравнением

$$U = \frac{\pi r}{30} n, \quad (8)$$

де r — радиус винта. С учетом (8) выражение (7) примет вид

$$n = \frac{r}{\pi r} \frac{30}{\pi r} \operatorname{tg}(\alpha - \gamma) V. \quad (9)$$

Из выражения (9) видно, что зависимость $n=f(V)$ будет определяться геометрическими и механическими параметрами винта.

Для этой цели в состав ППЛ введен переносной стенд, содержащий контршаблон (для проверки угла установки лопастей), набор контрольных разновесов (для определения момента трения на оси винта при снятом ветроприемнике), а также индикатор числа оборотов (для проверки электрических цепей), который позволяет в условиях ППЛ определять правильность установки лопастей ИП, моменты трения на оси винта и флюгарки с целью определения начальной чувствительности, а также исправность электромеханических узлов ИП. Исследования, приведенные в работе [16], показали, что такая методика проверки канала измерения параметров ветра АМС на месте эксплуатации вполне приемлема и обеспечивает необходимую точность проверки.

Определение сохранности метрологических характеристик по каналу измерения атмосферного давления АМС осуществляется с помощью инспекторского варианта грузопоршневого манометра ИМАД-4М. Исследования, приведенные в работе [21], показали, что средняя квадратическая погрешность измерения при сравнении с эталоном не превышает 4 Па, что обеспечивает необходимую точность проверки ИП давления АМС. При проверке ИМАД-4М выносятся из ППЛ и устанавливаются рядом с ИП атмосферного давления АМС в помещении.

В случае когда необходимо осуществить проверку ИП давления по диапазону измерения (в 3—5 точках шкалы), в комплект ИМАД-4М вводится барокамера с системой откачивания — нагнетание воздуха.

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1. Анализ перечисленных выше вариантов построения ППЛ показал, что состав и функции последней могут меняться в зависимости от конкретных задач. Второй вариант построения ППЛ более предпочтительный, так как позволяет осуществить проверку сохранности метрологических характеристик каналов измерения АМС без демонтажа и разборки ИП.

2. Применение ППЛ является наиболее эффективным способом обеспечения единства и правильности измерений, регулярного

метрологического надзора за работающими АМС. Для сложных измерительных гидрометеорологических систем, которые экономически невыгодно демонтировать и подвергать транспортировке в поверочный орган, применение ППЛ может оказаться единственным приемлемым вариантом.

3. Применение на сети станций Госкомгидромета ППЛ даст ощутимый экономический эффект при определении сохранности градуировочных характеристик каналов измерения АМС после ремонта и регулировки, а также в процессе эксплуатации АМС, когда требуется быстро устранить неисправность, выполнить мелкий ремонт и провести контрольную поверку каналов АМС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. с. № 530300 (СССР). Гигрометр точки росы для проверки средств измерения влажности воздуха/Резников Г. П., Рогалев Ю. В. — Заявл. 08.04.75, (21) 2125 304/25; опубл. 30.09.76. — Бюл. открытий, изобретений, промышленных образцов и товарных знаков, 1976, вып. 36, с. 112.
2. А. с. № 596839 (СССР). Устройство для проверки средств измерения температуры воздуха/Резников Г. П., Рогалев Ю. В. — Заявл. 28.06.76, (21) 2376946/18—10; опубл. 05.03.78. — Бюл. открытий, изобретений, промышленных образцов и товарных знаков, вып. 9, 1978, с. 168.
3. Алтай Н. П. К теории анеометрической вертушки. — Труды ГГО, 1966, вып. 199, с. 203—205.
4. Бережной С. И. О подвижных поверочных лабораториях. — Измерительная техника, 1960, № 4.
5. Беспалов Д. П., Русин Н. П. Оптимальные требования к точности и объему метеорологической информации для автоматических станций. — В кн.: Разработка и эксплуатация автоматических метеорологических станций. Л., 1974, с. 17—25.
6. Будзис В. А. Об оборудовании передвижных поверочных лабораторий. — Измерительная техника, 1960, № 4.
7. Леонова Л. И., Рогалев Ю. В., Фатеев Н. П. Методика контроля сохранности градуировочных характеристик измерительных преобразователей температуры автоматических метеостанций. — Труды ГГО, 1977, вып. 392, с. 83—89.
8. Резников Г. П. Анализ физических процессов и погрешностей гигрометрического комплекса, основанного на термодинамическом принципе. — Труды ГГО, 1973, вып. 300, с. 15—39.
9. Резников Г. П., Рогалев Ю. В. Исследования по обоснованию возможности поверки автоматических метеостанций в естественных условиях методом непосредственного сличения (по каналам влажности и температуры). — Труды ГГО, 1977, вып. 392, с. 72—82.
10. Резников Г. П., Рогалев Ю. В. Адаптивная система проверки средств измерения метеозлементов. — Труды ГГО, 1978, вып. 414, с. 95—105.
11. Резников Г. П., Фатеев Н. П. Термогигростаты для системы обеспечения единства измерений влажности воздуха и температуры. — Труды ГГО, 1975, вып. 345, с. 67—76.
12. Рогалев Ю. В. Некоторые результаты проверки аналоговых каналов станции М-106М. — Труды ГГО, 1974, вып. 340, с. 130—137.
13. Рогалев Ю. В., Сущинский Б. Л., Кузьминых И. П. К методике проверки каналов параметров ветра станции М-106М с применением имитирующих устройств. — Труды ГГО, 1974, вып. 340, с. 118—129.

14. Рогалев Ю. В., Фатеев Н. П. Анализ погрешностей имитирующих устройств, применяемых при поверке автоматических метеостанций. — Труды ГГО, 1977, вып. 392, с. 103—116.

15. Рождественский Б. Г., Мануйлов К. Н. Некоторые вопросы развития методов метеорологических наблюдений. — В кн.: Информационные материалы по гидрометеорологическим приборам и методам наблюдений. М., 1972, № 49, с. 3—12.

16. Сущинский Б. Л., Фатеев Н. П. Исследования по обоснованию методики контроля градуировочных характеристик измерительных преобразователей параметров ветра типа М-63М-1 в условиях эксплуатации. — Труды ГГО, 1977, вып. 392, с. 58—71.

17. Фатеев Н. П. Проект подвижной контрольно-поверочной метеорологической лаборатории для обслуживания автоматизированной сети станций. — Труды ГГО, 1970, вып. 260, с. 163—167.

18. Фатеев Н. П. Методические основы поверки метеорологической аппаратуры. — В кн.: Методические основы автоматизированной системы метеорологических наблюдений. Л., 1971, с. 45—68.

19. Фатеев Н. П. Поверочные схемы для метеорологических измерений. — Труды ГГО, 1973, вып. 313, с. 145—155.

20. Фатеев Н. П., Панкратович Л. Л., Огородникова Ц. Ш. Исследование малогабаритной аэродинамической трубы для поверки анемометров. — Труды ГГО, 1970, вып. 260, с. 152—162.

21. Фатеев Н. П., Полухин Г. И., Цвелик А. В. Исследование и аттестация образцовых грузопоршневых манометров абсолютного давления. — Труды ГГО, 1977, вып. 392, с. 23—28.

22. Фатеев Н. П., Резников Г. П., Рогалев Ю. В. Контрольный гигрометр для поверки влагомеров в широком диапазоне температуры и влажности. — Труды ГГО, 1971, вып. 260, с. 146—151.

В. В. Лячев, Н. П. Фатеев

О ФОРМАХ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Метеорологические измерения отличаются большим разнообразием и специфичностью. Получаемая с их помощью информация используется в важнейших отраслях народного хозяйства и научных исследованиях.

Качество этой информации в значительной степени определяется формой выражения и точностью результатов измерений.

Формы представления результата измерения выбираются в соответствии с целью и задачами измерений, а также согласно ГОСТу [3]. Однако конкретизация форм во многих случаях оказывается весьма сложной и даже проблематичной. На сегодняшний день нередко правильность выражения результата определяется исключительно метрологической компетентностью экспериментатора. Руководящие методические материалы по этому вопросу в области метеорологических измерений отсутствуют.

Сложившееся положение обусловлено целым рядом причин. Отметим главные из них:

1. Недостаточная разработанность общей теории измерений в частности, отсутствие единой классификации измерений, охватывающей все их многообразие с учетом назначения, условий выполнения, последующей обработки данных наблюдений и т. д. Существующая ныне классификация, отраженная в публикациях [1, 2, 5—7, 9—11, 13, 15], не обладает требуемой полнотой и не позволяет четко указать форму представления результата измерения каждой выделенной разновидности.

2. Несовершенство применяемых форм выражения результата измерения, в том числе и регламентированных нормативно-техническими документами [3, 4], и неноменклатурных, но реализуемых на практике [1, 5, 6, 9, 11, 16]. Неопределенность границ многих из установленных форм, их иерархическая несогласованность и неадекватность содержания одноименных элементов у некоторых из них.

3. Отсутствие методических указаний, рекомендаций и других подобных материалов, поясняющих правила применения форм

выражения результата измерения. В настоящее время нет также отраслевой и нормативно-технической документации, раскрывающей специфику оформления результатов метеорологических измерений в такой степени, чтобы она соответствовала требованиям ГСИ [3, 4] и могла служить практическим руководством при решении вышеупомянутой задачи.

4. Слабое освещение в трудах по метрологии вопросов обработки и представления результатов измерений и почти полное отсутствие специальных работ, посвященных этим вопросам [14]. Даже в учебниках и учебных пособиях по метрологии не содержится ни сравнительного анализа, ни просто обзора способов выражения результата измерения. Следует добавить, что в них часто не приводится и аргументация выбора той формы представления результата, которая избирается автором в определенной ситуации и предлагается читателю как рекомендуемая.

Все отмеченные обстоятельства свидетельствуют о назревшей необходимости создания отраслевого нормативного документа или руководства по оформлению результатов метеорологических измерений. Не ставя целью рассмотрение подобной задачи в рамках настоящей статьи, ограничимся здесь изложением основных рекомендаций по применению форм представления результатов, установленных стандартами ГСИ. Таких форм шесть (четыре введены ГОСТ 8.011—72 и две — ГОСТ 8.207—76).

Как известно, совокупность элементов любой полной формы представления результата измерения включает значение величины, найденное путем ее измерения, и количественные показатели точности измерения. Существующее многообразие форм представления результата определяется прежде всего обилием способов выражения точности, шесть из которых приведены в упомянутых ГОСТах. Однако и результат измерения, будучи эмпирической оценкой познаваемой величины, реализуется в разных вариантах, что также увеличивает многообразие названных форм.

Приводим общий перечень элементов, используемых в регламентированных формах представления результата, с сохранением принятых в ГОСТах обозначений и наименований параметров [2, 10]:

A — результат измерения;

$\bar{A}$ — результат измерения (среднее арифметическое исправленных результатов наблюдений);

n — число результатов наблюдений;

Δ , $\Delta_{\text{в}}$, $\Delta_{\text{н}}$ — суммарная погрешность измерения, ее верхний и нижний пределы;

$\pm\Delta$ — симметричная доверительная погрешность (доверительные границы погрешности) результата измерения;

P — установленная (доверительная) вероятность, с которой погрешность измерения находится в указанных границах;

$\Delta_{\text{с}}$, $\Delta_{\text{с.н}}$, $\Delta_{\text{с.в}}$ — систематическая составляющая погрешности измерения, ее нижний и верхний пределы;

Θ — доверительные границы неисключенной систематической погрешности (неисключенных остатков систематической погрешности) результата измерения;

P_c — заданная (доверительная) вероятность, с которой систематическая составляющая погрешности измерения находится в указанных границах;

$\tilde{\sigma}(\Delta_c)$ — оценка среднего квадратического отклонения систематической составляющей погрешности измерения;

$f_{\Delta_c}^{\text{ст}}(\xi)$ — стандартная аппроксимация функции распределения систематической составляющей погрешности измерения;

$f_{\Delta_c}(\xi)$ — функция распределения (плотность вероятности) систематической составляющей погрешности измерения;

$S(A)$ — оценка среднего квадратического отклонения результата измерения;

$\tilde{\sigma}(\tilde{\Delta})$ — оценка среднего квадратического отклонения случайной составляющей погрешности измерения;

$f_{\tilde{\Delta}}^{\text{ст}}(\xi)$ — стандартная аппроксимация функции распределения случайной составляющей погрешности измерения;

$f_{\tilde{\Delta}}(\xi)$ — функция распределения (плотность вероятности) случайной составляющей погрешности измерения.

Не все приведенные в перечне элементы имеют достаточную смысловую обособленность, оправдывающую их применение. Например, результат измерения $\tilde{A}$ является лишь одним из вариантов результата A , по существу не нуждающемся в выделении. Параметры $\pm\Delta$ и Θ также представляются частными по отношению к параметрам Δ и Δ_c , а числовые характеристики $S(A)$ и $\tilde{\sigma}(\tilde{\Delta})$ вообще идентичны по содержанию, и их параллельное использование объясняется только терминологической несогласованностью нормативно-технических документов, т. е. без ущерба для практических целей число элементов форм выражения результата измерения могло бы быть уменьшено до 12.

Обратимся, наконец, к самим формам, которые для удобства проведения их сравнительного анализа укажем в следующем порядке:

Форма I:

$$A, f_{\Delta_c}(\xi); f_{\tilde{\Delta}}(\xi).$$

Форма II:

$$A, \tilde{\sigma}(\Delta_c); f_{\Delta_c}^{\text{ст}}(\xi); \tilde{\sigma}(\tilde{\Delta}); f_{\tilde{\Delta}}^{\text{ст}}(\xi).$$

Форма III:

$$A, \Delta_c \text{ от } \Delta_{c.н} \text{ до } \Delta_{c.в}; P_c; \tilde{\sigma}(\tilde{\Delta}); f_{\tilde{\Delta}}^{\text{ст}}(\xi).$$

Форма IVa (первый вариант формы IV):

$$\tilde{A}; S(\tilde{A}); n; \Theta.$$

Форма IVб (второй вариант формы IV):

$$\bar{A}, S(\bar{A}); n; \Theta; P_c.$$

Форма V:

$$A; \Delta \text{ от } \Delta_n \text{ до } \Delta_v; P.$$

Форма VI:

$$\bar{A} = \Delta; P.$$

Неоспоримым преимуществом перед другими формами обладает форма I, содержащая наиболее полную и верную характеристику погрешности измерения. Функции распределения $f_{\Delta_c}(\xi)$ и $f_{\Delta}(\xi)$ являются самыми информативно-емкими показателями точности измерения, конкретно представляющими законы распределения систематической и случайной составляющих погрешности. Это позволяет точно определять и интервал, в котором с установленной вероятностью находится истинное значение величины, и вероятность пребывания этого значения в заданном интервале.

Однако получение совершенных оценок точности и достоверности измерений оправдано лишь в ограниченном числе случаев, так как реализация формы I требует предварительного проведения сложных экспериментов с последующей трудоемкой обработкой их результатов. Практически обращение к форме I целесообразно только при метрологических измерениях, например в экспериментах с использованием рабочих эталонов или при исследованиях точностных характеристик образцовых метеорологических приборов высших разрядов.

Следует отметить, что специфика метеорологических измерений требует учета индивидуальных свойств средств измерений и подробных сведений о влияющих величинах. Без такой дополнительной исходной информации точно оценить погрешности невозможно. Эта информация существенно полезна при анализе воспроизводимости измерений, их стабильности и т. д., поэтому имеет смысл давать ее в виде приложения к форме I.

Завершая общее рассмотрение формы I, добавим, что существенным обстоятельством, затрудняющим употребление данной формы, оказывается сложность математического описания ее показателей точности. Функции $f_{\Delta_c}(\xi)$ и $f_{\Delta}(\xi)$ представляют собой обобщенные параметры, отражающие совместные проявления систематических и случайных погрешностей. При наличии в любой совокупности погрешностей свыше двух компонентов с разными законами распределения ее выражение формулой становится не только трудной, но и нередко практически не разрешимой задачей. Другие же способы выражения функций $f_{\Delta_c}(\xi)$ и $f_{\Delta}(\xi)$ (графики, таблицы) гораздо менее точны [12, 16] и имеют погрешности и недостатки субъективного характера. Конкретное выражение показателей точности формы I зависит в известной степени и от характера вводимых в результат A поправок [1].

В отличие от предыдущей форма II содержит лишь приближенную оценку погрешности измерения, которая может быть выражена набором из четырех элементов — показателей точности. Однако во многих случаях оценка погрешности, осуществляемая с помощью стандартных аппроксимаций функций распределения систематической и случайной составляющих погрешностей и средних квадратических отклонений, оказывается весьма совершенной. Это объясняется прежде всего определенной свободой которую обеспечивает ГОСТ 8.011—72 при выборе стандартных аппроксимаций функций $f_{\Delta_c}^{st}(\xi)$ и $f_{\Delta}^{st}(\xi)$. В его приложении помещена таблица семи стандартных аппроксимаций функций распределения, рекомендованных к использованию в формах представления результата измерения. Совокупность последних позволяет в достаточной мере удовлетворить потребности практики измерений.

Применение стандартных аппроксимаций функций упрощает выражение показателей точности измерения, что делает форму I более удобной в употреблении, чем форма I. Возможная сложность проверки гипотез о подчиненности систематических и случайных погрешностей измерения заданным стандартным законам распределения принимается во внимание сравнительно редко, так как в большинстве случаев (при реализации нормальной или равномерной функции распределения) она остается несущественной.

Отмеченные достоинства формы II — приемлемость оценки погрешности и относительная простота представления показателей точности — определяют широкий диапазон ее использования, охватывающий разные по назначению и классу измерения. В целом эти измерения можно характеризовать как измерения с приближенным оцениванием погрешности, при этом учитываются нормативные данные о свойствах средств измерений и дается общая оценка условий измерений.

Форма III отличается от формы II способом выражения оценки систематической составляющей погрешности измерения. В форме II, использующей для оценки погрешности параметры $\tilde{\sigma}(\Delta_c)$ и $\tilde{f}_{\Delta_c}^{st}(\xi)$, раскрыт закон распределения погрешности во всем диапазоне измерений, что позволяет приближенно определять вероятностную характеристику погрешности для любого установленного значения. Форма III в информативном отношении намного беднее, в ней выделен лишь интервал, в котором с заданной вероятностью P_c находится систематическая составляющая погрешности Δ_c , а в качестве числовых характеристик последней указаны ее границы $\Delta_{c.н}$ и $\Delta_{c.в}$. При этом обычно предполагается, что компоненты систематической составляющей Δ_c подчиняются равномерному закону распределения.

Отметим, что в общем случае $|\Delta_{c.н}| \neq |\Delta_{c.в}|$ и при таком условии сделанное предположение о равномерном распределении ставит под сомнение корректность оценки, выражаемой данным способом. Однако при наличии среди компонентов составляющей Δ_c

существенной систематической погрешности, изменяющейся по сложному закону, не выявленному при обработке результатов наблюдений, в большей степени оправданным оказывается применение упрощенного способа представления оценки.

Область реализации формы III, также как и формы II, распространяется на измерения с приближенным оцениванием погрешности, но со сдвигом в сторону оценок менее точных. Форму III целесообразно употребить, например, когда по условиям использования результатов метеорологических измерений можно улучшить их сходимость путем усреднения результатов измерений.

От ранее рассмотренных форм общего назначения отличается определенной спецификой форма IV (в обоих своих вариантах IVa и IVб) — форма локального использования. Выражая результат прямого измерения многократными наблюдениями при отсутствии данных о виде функций распределений составляющих его погрешности, эта форма обладает простотой представления показателей точности и вместе с тем достаточной информативностью, чтобы быть реализуемой при необходимости дальнейшей обработки результатов или анализа погрешностей.

Особенностью формы IV является наличие в наборе ее элементов параметра n , указывающего число результатов наблюдений, усреднение которых определило результат измерения. Названный параметр совместно с числовыми характеристиками $S(\bar{A})$ и n , Θ и P_c при равномерном законе распределения составляющих неисключенной систематической погрешности результата делает возможным применение формы IV при оценке результатов как неравноточных, так и косвенных измерений.

Форму IV можно использовать при разнообразных технических, а также контрольно-поверочных измерениях.

Уступая всем предыдущим формам представления результата в глубине раскрытия содержания погрешности измерения, формы V и VI обладают по сравнению с ними двумя бесспорными преимуществами. Одно из них состоит в том, что обе эти формы предполагают непосредственно обобщенным показателем точности измерения, другое — в простоте выражения такого показателя. Последний представляется в форме V как интервал, в котором суммарная погрешность измерения находится с заданной вероятностью, и в форме VI — как симметричная доверительная погрешность результата измерения.

Нетрудно заметить, что второй вариант представления является частным по отношению к первому. Аналогичное соотношение, как упоминалось ранее, имеет место и между элементами форм V и VI в целом, следовательно, между самими формами. Поэтому форма VI отдельно не рассматривается.

Названные достоинства форм V и VI обуславливают широкое их использование при измерениях с предварительным оцениванием погрешностей, когда регламентированы типы применяемых средств измерений и условия измерения, а погрешности оценены заранее. Подобная ситуация характерна для однократных техни-

ческих измерений. К формам V и VI прибегают, например, при оценке точности различных метеорологических приборов в данных условиях эксплуатации.

Однако к формам V и VI обращаются и при выражении результатов измерений с многократными наблюдениями. В таких случаях погрешность измерения (ее границы) находят путем построения композиции распределений случайных и систематических погрешностей. При этом конечная информация, отраженная в погрешности Δ , оказывается обедненной, а промежуточная, за редким исключением, утрачивается. Указанная практика получила, к сожалению, широкое распространение. Вместе с тем искусственное свертывание более сложных форм представления результата в формы V или VI не позволяет полноценно использовать результаты измерения в дальнейшем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бурдун Г. Д., Марков Б. Н. Основы метрологии. — М.: Изд-во стандартов, 1975.
2. ГОСТ 16263—70. Метрология. Термины и определения. — М.: Изд-во стандартов, 1972.
2. ГОСТ 8.011—72. Показатели точности измерений и формы представления результатов измерений. — М.: Изд-во стандартов, 1972.
4. ГОСТ 8.207—76. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Основные положения. — М.: Изд-во стандартов, 1976.
5. Долинский Е. Ф. Обработка результатов измерения. — М.: Изд-во стандартов, 1973.
6. Зайдель А. Н. Ошибки измерений физических величин. — Л.: Наука, 1974.
7. Маликов М. Ф. Основы метрологии. — М.: Коммерприбор, 1949.
8. Методы обработки результатов наблюдений при измерениях. — Труды метрологических институтов СССР, 1972, вып. 134 (194), с. 117.
9. Миф Н. П. Модели и оценка погрешности технических измерений. — М.: Изд-во стандартов, 1976.
10. Общие вопросы метрологии. — Труды метрологических институтов СССР, 1972, вып. 130(190).
11. Рабинович С. Г. Погрешности измерений. — Л.: Энергия, 1978.
12. Тиходеев П. М. Очерки об исходных измерениях. — М.; Л.: Машгиз, 1954.
13. Тюрин Н. И. Введение в метрологию. — М.: Изд-во стандартов, 1973.
14. Цейтлин В. Г. О рациональном выборе показателей точности. — Измерительная техника, 1973, № 4.
15. Широков К. П. Общие вопросы метрологии. — М.: Машиностроение, 1967.
16. Щиголов Б. М. Математическая обработка наблюдений. — М.: Наука, 1969.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ УЧЕТА ЗАКОНОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ

При оценке точности измерений часто необоснованно исходят из предположения, что погрешности измерения распределяются по нормальному закону и тем самым игнорируется основное положение информационной теории средств измерений (СИ) о том, что дезинформационное действие погрешности определяется не только ее мощностью (средним квадратическим значением), но и существенно зависит от вида закона распределения [3—8]. Пренебрежение влиянием вида закона распределения погрешности СИ является нарушением стандартов [1, 2] и часто ведет к значительным потерям измерительной информации, что снижает как качество научных исследований, так и эффективность сетевых измерений. Поэтому в каждом конкретном случае необходимо оценивать количество информации, теряемое от замены реальных законов распределения погрешностей СИ различного класса.

В соответствии с [5] количество информации q , получаемое в результате измерения, можно определить из выражения

$$q = H(X) - H(X/X_n), \quad (1)$$

где $H(X)$ — исходная энтропия, которая характеризует неопределенность измеряемой величины перед измерением, $H(X/X_n)$ — условная энтропия, характеризующая неопределенность, которая остается после получения показания X_n .

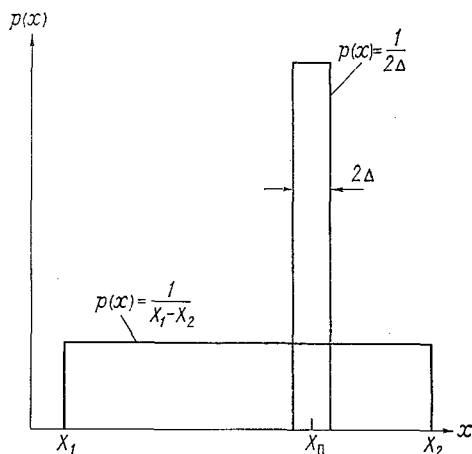


Рис. 1. Законы распределения плотности вероятности.

На рис. 1 показаны законы распределения плотности вероятности до и после проведения измерений.

Значения X_1 и X_2 — верхний и нижний пределы диапазона измерений. В связи с тем, что до измерений ничего неизвестного об интересующей нас величине, то появление любого ее значения в пределах X_1 и X_2 равновероятно, т. е. $p(x) = \frac{1}{x_2 - x_1}$

После выполнения измерений имеем показание X_{Π} с погрешностью, распределенной вблизи этого значения по некоему определенному закону $p(x)$, характерному для данного типа СИ.

По определению, принятому в теории информации,

$$H(X) = - \int_{-\infty}^{+\infty} p(x) \ln p(x) dx,$$

отсюда исходная энтропия в выражении (1) равна

$$H(X) = - \int_{X_1}^{X_2} \frac{1}{X_2 - X_1} \ln \frac{1}{X_2 - X_1} dx = \ln(X_2 - X_1).$$

Остаточная энтропия $H(X/X_{\Pi})$ зависит от вида закона распределения погрешностей. Так, если погрешности измерения СИ распределены по равномерному закону (см. рис. 1), энтропия равна

$$H_p(X/X_{\Pi}) = - \int_{X_{\Pi} - \Delta}^{X_{\Pi} + \Delta} \frac{1}{2\Delta} \ln \frac{1}{2\Delta} dx = \ln 2\Delta.$$

В этом случае количество полученной при измерении информации можно записать как

$$q = \ln(X_2 - X_1) - \ln 2\Delta = - \ln \frac{2\Delta}{X_2 - X_1}. \quad (2)$$

Если погрешность СИ распределена по нормальному закону, то

$$H_n(X/X_{\Pi}) = \ln(\sqrt{2\pi}e\sigma)$$

и соответственно

$$q = - \ln \frac{\sqrt{2\pi}e\sigma}{X_2 - X_1}.$$

Из информационной теории СИ известно, что при определенном среднем квадратическом значении (при определенной мощности) помехи наибольшим дезинформационным действием (наибольшей энтропией) обладает помеха с нормальным законом распределения. Это означает, что при прочих равных условиях СИ с нормальным распределением вероятностей погрешности дает меньше информации, чем СИ с любым другим видом распределения, т. е. $\Delta q = q - q_n > 0$.

Выражая это через энтропии формулы (1) при одинаковых исходных условиях, т. е. при $H(X) = H_n(X)$, имеем

$$\Delta q = H_n(X/X_n) - H(X/X_n). \quad (3)$$

Если обе условные энтропии выразить через так называемое энтропийное значение погрешности Δ'

$$H(X/X_n) = \ln 2 \Delta',$$

$$H_n(X/X_n) = \ln 2 \Delta'_n$$

и подставить в (3), то получим

$$\Delta q = \ln 2 \Delta'_n - \ln 2 \Delta' = \ln \frac{\Delta'_n}{\Delta'}. \quad (4)$$

Величины Δ' и Δ'_n связаны со средним квадратическим значением погрешности σ через энтропийный коэффициент K , зависящий от вида закона распределения вероятности погрешности ($\Delta' = K\sigma$, $\Delta'_n = K_n\sigma$). Подставляя эти выражения в (4), получим

$$\Delta q = \ln K_n/K. \quad (5)$$

Это выражение позволяет рассчитать количество теряемой информации при ошибочной подмене полученных реальных законов распределения погрешностей СИ нормальным распределением. Для нормального закона распределения погрешности значение K_n найдено в [3, 4] и составляет

$$K_n = \sqrt{\frac{\pi e}{2}} \approx 2,066.$$

Для равномерного закона распределения энтропийный коэффициент равен $K_p = \sqrt{3} \approx 1,73$. В случае треугольного закона распределения (распределение Симпсона) $K_s = 2,00$. Подставляя в формулу (5) приведенные значения, находим, что при подмене равномерного распределения нормальным потери информации Δq составляют примерно 0,177 бит, а при такой же подмене распределения Симпсона потери равны 0,003 бит. Значения K при различных видах законов распределения погрешности могут быть равны 0,5 и менее. Для детального исследования Δq при эволюциях законов распределения разумно использовать результаты, полученные П. В. Новицким [5]. Закон распределения плотности вероятности автор описал выражением

$$p(x) = Ae^{-|x|^a}.$$

При этом вид одномодального плавного симметричного закона распределения меняется от нормального до распределения с весьма большим значением положительного эксцесса при изменении величины $\sqrt{\sigma^4/\mu_4}$ от 0,577 до нуля (μ_4 — четвертый центральный момент распределения). Этот же прием применим и в исследо-

ваниях плавных симметричных уплощенных и двухмодальных законов распределения. Последовательно изменяя σ^4/μ_4 , П. В. Новицкий [5] получил ряд энтропийных коэффициентов K , соответствующих различным видам распределения. Используя эти K можно рассчитать по формуле (5) значения Δq . Потери информации при замене различных законов на нормальный приведены в табл. 1.

Таблица

Потери информации Δq при замене различных законов распределения на нормальный

$\sqrt{\frac{\sigma^4}{\mu_4}}$	K	$\Delta q/\text{бит}$	$\sqrt{\frac{\sigma^4}{\mu_4}}$	K	$\Delta q/\text{бит}$
Одномодальные			Двухмодальные и уплощенные		
0,010	0,157	2,58	0,58	2,066	0,00
0,100	0,870	0,86	0,60	2,063	0,01
0,200	1,355	0,42	0,70	1,943	0,06
0,300	1,677	0,21	0,80	1,572	0,27
0,400	1,907	0,08	0,90	1,016	0,71
0,500	2,032	0,02	0,97	0,520	1,38
0,575	2,066	0,00	0,99	0,294	1,94

Для сравнительной оценки результатов определим количество информации, получаемое при использовании СИ различного класса. Если в выражении (2) диапазон измерения принять $X_2 - X_1 = 100$, то можно рассчитать количество информации в зависимости от значений основной погрешности СИ Δ (табл. 2).

Таблица

Количество информации q , получаемое от СИ с различными основными погрешностями Δ

Δ СИ	0,01	0,02	0,05	0,1	0,2	0,5	1,0	2,0	5,0	10
q бит	8,52	7,82	6,91	6,2	5,5	4,6	3,9	3,2	2,3	1,6

Из сопоставления количества поступающей и теряемой информации (q и Δq) (см. табл. 1 и 2) следует, что потери информации от подмены реального закона распределения вероятностей погрешности СИ на нормальное распределение возрастают с увеличением класса СИ.

Если воспользоваться средним значением энтропийного коэффициента $K=1,74$ при $\sqrt{\sigma^4/\mu_4}=0,55$ и соответствующим ему $\Delta q=0,1717$, то количество информации, теряемое от замены, для СИ класса 0,01 составляет всего 2 %, а для СИ класса 10 оно достигает 10 %.

В особо неблагоприятных случаях, например при замене двухмодального закона $\sqrt{\sigma^4/\rho_4}=0,97$, для которого $K=0,52$, нормальным, потери достигают соответственно 18 и 86 %.

В заключение сделаем следующие выводы:

1. Замена реального закона распределения вероятностей погрешностей СИ на нормальный приводит к потере измерительной информации и иногда очень существенной.

2. Учет реальных законов распределения погрешностей СИ позволяет повысить их информационную отдачу, что особенно важно для измерений с использованием СИ относительно низкой точности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 8.011—72. Показатели точности измерений и формы представления результатов измерений. — М.: Изд-во стандартов, 1972.
2. ГОСТ 8.009—72, ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики. — М.: Изд-во стандартов, 1976.
3. Кавалеров Г. И., Мандельштам С. М. Введение в информационную теорию измерений. — М.: Энергия, 1974, с. 13—44.
4. Лившиц Н. А., Пугачев В. Н. Вероятностный анализ систем автоматического управления. — М.: Советское радио, 1963.
5. Новицкий П. В. Основы информационной теории измерительных устройств. — Л.: Энергия, 1968. — 164 с.
6. Новицкий П. В. Действительные и мнимые проблемы развития информационной теории средств измерений. — Измерительная техника, 1978, № 8, с. 37—40.
7. Орнатский П. П. Теоретические основы информационно-измерительной техники. — Киев: Высшая школа, 1976, с. 3—27.
8. Электрические измерения неэлектрических величин/Под ред. П. В. Новицкого. — Л.: Энергия, 1975, ч. I, с. 3—42.

В. А. Клеванцова, И. А. Покровская

К МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ АТТЕСТАЦИИ ЭТАЛОННОГО ПИРГЕЛИОМЕТРА ГОСКОМГИДРОМЕТА

В соответствии с Межведомственным единым планом метрологического обеспечения средств измерения гидрометеорологического назначения в отделе метрологии ГГО была проведена работа по подготовке к аттестации в качестве рабочего эталона компенсационного пиргелиометра № 212. Пиргелиометр № 212 является в системе Госкомгидромета верхним звеном локальной поверочной схемы передачи единицы измерения энергетической освещенности солнечной радиацией. Аттестацию проводит Всесоюзный научно-исследовательский институт оптико-физических измерений (ВНИИОФИ), являющийся хранителем государственного специального эталона энергетической освещенности (ГСЭ ЭО) [1].

Компенсационный пиргелиометр Ангстрема [2] № 212, хранящийся в ГГО, используется в качестве эталонного прибора с 1928 г. Схематический чертеж трубки пиргелиометра и основные геометрические параметры представлены на рис. 1.

Пиргелиометр № 212 применяется в комплекте с амперметром типа М1104, класса 0,2 и нулевым гальванометром типа М196/2. Питание пиргелиометра осуществляется от источника постоянного тока с напряжением 1,3 В. Для регулирования компенсационного тока служит панель с реостатами. Измерение тока может также производиться посредством потенциометра ПП-63 или вольтметра Щ1513 с образцовой катушкой сопротивления. Погрешность изме-

Таблица

Метрологические характеристики пиргелиометра № 212

Рабочий диапазон измерения	40—1000 Вт/м ²
Диапазон, в котором показания линейны (с погрешностью, не превышающей 0,2 %)	40—1000 Вт/м ²
Спектральный диапазон измеряемого излучения	0,3—4,5 мкм
Постоянная времени	5 с
Температурный коэффициент переводного множителя	0,02 %

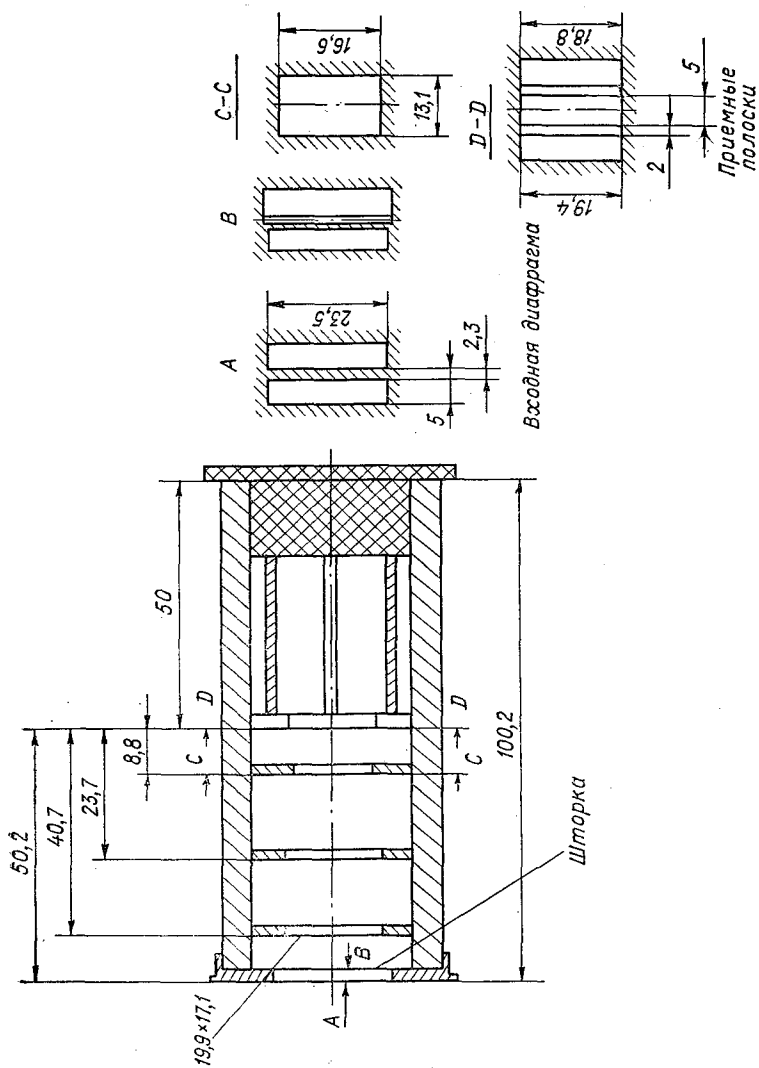


Рис. 1. Схема трубки пиргелиометра № 212.

рения энергетической освещенности определяется погрешностям обусловленными всем измерительным комплектом, а также условиями, при которых производится измерение. При сличении пиргелиометров измерения производятся сериями по десять синхронных отсчетов, поочередно при облучении каждой из двух приемных полосок.

Метрологические характеристики пиргелиометра № 212 приведены в табл. 1.

Пиргелиометр № 212 градуирован в единицах Международной пиргелиометрической шкалы 1956 г. (МПШ-56). Он представлялся на международные сравнения пиргелиометров (МСП) в 1964, 1970 и 1975 гг. и на региональные сравнения пиргелиометров (РСП) в 1964 и 1969 гг. Сведения о результатах международных и региональных сличений пиргелиометра № 212 приведены в табл. 2.

Показания пиргелиометра № 212 стабильны. Переводный множитель его $14,83 \text{ кал}/(\text{см}^2 \cdot \text{мин} \cdot \text{А}^2)$ ($10350 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{А}^2)$), полученный на международных сравнениях в 1964 г., применяется до настоящего времени.

По данным международных сравнений [3, 4] проводившихся в 1970 и 1975 гг. (см. табл. 2), на которых компенсационный ток всех пиргелиометров измерялся одним и тем же вольтметром, средние квадратические отклонения (СКО) ряда переводных множителей пиргелиометра № 212 составили 0,13 %. Средние значения переводного множителя определены при СКО, не превышающей 0,03 %.

Отсюда можно сделать вывод, что при измерениях энергетической освещенности радиацией Солнца пиргелиометром № 212 СКО воспроизведения шкалы МПШ-56 при одной серии измерений не превосходит 0,2 и предел допускаемой погрешности можно принять равным 0,6 %.

В 1970 г. на МСП-III пиргелиометр № 212, ввиду устойчивости его показаний, был включен в состав группового эталона, примененного при сличениях. Он утвержден также региональным эталоном в Региональной Ассоциации для Европы (РА-VI) и использовался в качестве эталона при сличении национальных эталонов гидрометеорологических и метеорологических служб социалистических стран в 1967, 1971 и 1977 гг.

С эталонным пиргелиометром № 212 ежегодно сличаются образцовые компенсационные пиргелиометры 1-го разряда № 196, 250 и 541, которые используются для передачи единицы энергетической освещенности образцовым приборам, применяемым на актинометрических станциях, а также при исследовании вновь разрабатываемых образцовых приборов.

Погрешность воспроизведения единицы измерения образцовыми пиргелиометрами 1-го разряда можно характеризовать также СКО, приведенным для пиргелиометра № 212, т. е. 0,2 %, так как приборы эти той же конструкции, что и эталон.

Сведения о международных и региональных слянциях пиргелиометра № 212

Гол	Слнчение	Место слнчения	№ эталона	Полученный переводный множнтель № 212	Изменение переводного множнтеля, %	Число серн слн- чения	СКО	
							отдельной серн, %	среднего, %
1964	МСП-II	Давос	A210	10350 Вт/(м ² ·А ²)	-0,8	30	0,29	0,05
1969	РСП-II (РА-VI)	Карпантра	A525	10341	-0,1	50	0,31	0,05
1970	МСП-III	Давос — Локарно	Групповой эталон A21, 140, 212, 525, 2273, 542, 576	10327	-0,22	27	0,13	0,025
1975	МСП-IV и РСП-III (РА-VI)	Давос	Групповой эталон МПШ ПАКРАД-3	10311 10538	-0,16 +2,2	42	0,13	0,02

Таблица

Погрешности передачи единицы измерения энергетической освещенности от пиргелиометра № 212 к образцовым пиргелиометрам 1-го разряда (по одной серии измерений)

Погрешность	Предел допускаемой погрешности, %
Измерения энергетической освещенности радиацией Солнца пиргелиометром № 212	0,6
Измерения энергетической освещенности образцовым пиргелиометром 1-го разряда	0,6
Измерения тока компенсации образцового пиргелиометра 1-го разряда	0,2
За счет влияния околосолнечной радиации при изменении мутности атмосферы, характеризуемой $3 \leq mT \leq 5$ (m — оптическая масса атмосферы, T — фактор мутности Линке)	0,2
За счет разности температур пиргелиометров	0,1

Суммирование погрешностей, приведенных в табл. 3, дает предел допускаемой погрешности при передаче единицы измерения от пиргелиометра № 212 образцовым пиргелиометрам 1-го разряда.

Суммируя перечисленные погрешности, получим

$$\sqrt{0,6^2 + 0,6^2 + 0,2^2 + 0,2^2 + 0,1^2} = 0,9.$$

Таким образом, при передаче единицы измерения от пиргелиометра № 212 к образцовым пиргелиометрам 1-го разряда преде-

Таблица

СКО (%) значений переводных множителей, полученных при сличении с эталоном № 212 образцовых пиргелиометров 1-го разряда

Год	№ пиргелиометра					
	196		250		541	
	СКО	Число серий	СКО	Число серий	СКО	Число серий
1970	0,33	17	0,28	10	0,40	7
1971	0,24	9	0,21	4	0,28	23
1972	0,11	6	0,47	6	—	—
1973	0,26	8	0,15	5	0,34	6
1974	0,36	5	0,19	5	0,19	7
1975	0,24	9	0,31	16	0,11	14
1976	0,24	14	0,18	10	0,13	9
1977	0,19	5	0,10	4	—	—
1978	0,25	18	0,21	14	0,24	11

опускаемой погрешности следует считать равным 0,9 %, а СКО значения, полученного по одной серии измерений, — 0,3 %. Приведенные в табл. 4 данные подтверждают, что, как правило, СКО не превышает 0,3 %.

В настоящее время нет конкретного абсолютного прибора, воспроизводящего МПШ-56 с надлежащей точностью. Кроме того, стоит вопрос об уточнении абсолютного уровня МПШ-56. В связи с этим на международных сравнениях пиргелиометров в 1970–1975 гг. были представлены также абсолютные приборы отличные по конструкции от пиргелиометра Ангстрема [3, 4]. Показания новых абсолютных приборов в среднем на 2,2 % выше показаний приборов, представлявших МПШ-56 на международных сравнениях в 1970 г.

Для увязки показаний пиргелиометра № 212 с показаниями государственного специального эталона для средств измерения энергетической освещенности проводится работа по сличению пиргелиометра № 212 с ГСЭ ЭО.

ГСЭ ЭО [1] представляет собой высокотемпературную модель абсолютно черного тела. Эталон воспроизводит энергетическую освещенность непрерывного оптического излучения сплошного спектра в диапазоне длин волн 0,2–4,5 мкм в диапазоне значений энергетической освещенности 10–100 Вт/м². ГСЭ ЭО обеспечивает воспроизведение единицы со СКО результата измерений, не превышающим 0,25 % при неисключенной систематической погрешности, не превышающей 0,4 %.

Передача размера единицы от ГСЭ ЭО рабочим эталонам осуществляется посредством компаратора — полостного термостолбика и светоизмерительных ламп типа СИС 107-1500.

При сличении пиргелиометра № 212 с ГСЭ ЭО имеется ряд трудностей методического характера, вызванных тем, что условия освещенности, создаваемые источником излучения в лаборатории, существенно отличаются от условий освещенности приемника пиргелиометра Солнцем. Наиболее существенными различиями, которые могут сказаться на результатах сличения, являются различия в энергетических уровнях освещенности, угловом распределении излучаемой энергии и апертурах сличаемых приборов.

Для обоснования возможности сличения пиргелиометра № 212 с ГСЭ ЭО при освещенности около 70 Вт/м² была исследована линейность показаний пиргелиометра в диапазоне от 40 до 400 Вт/м². Установлено, что в указанном диапазоне переводный множитель пиргелиометра, в пределах точности измерений не зависит от измеряемой освещенности.

Для обеспечения достаточной точности передачи единицы измерения энергетической освещенности от государственного эталона рабочему эталону № 212 необходимы многократные сличения приборов как в лаборатории, так и в естественных условиях при облучении Солнцем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 8.195—76. Государственный специальный эталон и общесоюзная поверочная схема для средств измерений энергетической освещенности непрерывного оптического излучения сплошного спектра в диапазоне длин волн 0,2—4,5 мкм. — М.: Изд-во стандартов, 1976.
2. Янишевский Ю. Д. Актинометрические приборы и методы наблюдений. — Л.: Гидрометеиздат, 1957.
3. Third International Pyrheliometer Comparisons. Davos and Locarno. September 1970. Final Report WMO, Geneva, 1973, 126 p.
4. Results Fourth International Pyrheliometer Comparisons. Working Report N 58. Swiss Meteorological Institute. Zurich, 1976.

В. А. Клеванцова, И. А. Покровская, Л. Е. Щебелина

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПОВЕРКИ ГАЛЬВАНОМЕТРОВ ГСА-1МА И ГСА-1МБ

Взамен гальванометра ГСА-1, применяющегося с актинометрическими приборами, Тбилисским опытным заводом гидрометприборов с 1975 г. выпускаются гальванометры ГСА-1МА и ГСА-1МБ. Эти приборы изготавливаются на базе микроамперметров М265М93 и М265М94, класса точности 0,5.

Завод «Гидрометприбор» дополняет микроамперметр сопротивлениями, шунтами, термометром, антирадиационным кожухом

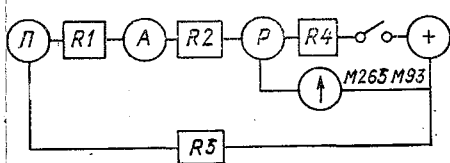


Рис. 1. Блок-схема гальванометра ГСА-1МА.

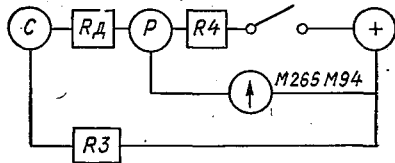


Рис. 2. Блок-схема гальванометра ГСА-1МБ.

и выпускает в виде гальванометров с относительной шкалой, имеющей 100 делений. Блок-схемы гальванометров представлены на рис. 1 и 2.

Гальванометр ГСА-1МА имеет одностороннюю шкалу, нулевое положение стрелки на 3-м делении шкалы и должен использоваться с актинометром на клеммах «+», «А» и с пиранометром на клеммах «+», «П» при выключенном шунте. Он может применяться также с балансомером через переключатель направления тока на клеммах «+», «Р» при включенном шунте.

У гальванометра ГСА-1МБ нуль на 50-м делении шкалы и предназначен этот прибор для использования с балансомером на клеммах «+», «Р» при включенном шунте.

В связи с применением новых приборов на сети актинометрических станций возникла необходимость проанализировать методику

их поверки, оценить погрешности, с которыми определяются параметры этих гальванометров, а также определить температурные коэффициенты сопротивления и цены деления по току при использовании гальванометров на разных клеммах.

Методы поверки и условия, при которых она производится выбираются так, чтобы систематические погрешности были малы тогда большинство погрешностей, с которыми определяются параметры приборов, могут быть отнесены к категории случайных.

К систематическим погрешностям поверки следует отнести погрешности, являющиеся следствием влияния температурных условий. В качестве характеристики случайной погрешности значений, получаемых при однократной поверке приборов, выбрано среднее квадратическое отклонение значений, полученных при многократной поверке. Для оценки погрешностей была произведена десятикратная поверка пяти гальванометров типа ГСА-1МА и четырех гальванометров типа ГСА-1МБ.

Таблица 1

Средние квадратические отклонения значений поправок шкалы ГСА-1МА (деления шкалы):

№ гальвано-метра	Отметка шкалы					Среднее
	20	70	90	95	100	
240	0,1	0,1	0,2	0,1	0,3	0,2
251	0,1	0,2	0,2	0,1	0,2	0,1
275	0,1	0,1	0,2	0,2	0,1	0,1
279	0,2	0,2	0,3	0,2	0,3	0,2
382	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2
Среднее	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	

Поверка производилась в соответствии с методикой, принятой техническими условиями на гальванометры (ТУ 25-04-1787-75). В качестве образцового прибора и источника тока при определении всех параметров применялся потенциометр ПП-63, класса точности 0,05.

При поверке определялись поправки шкалы гальванометра, внутреннее сопротивление и цена деления по току при включении прибора на разные клеммы. При каждой поверке сопротивление и цена деления по току определялись на отметках шкалы 100, 95, 90 и затем находилось среднее из трех значений. Определение поправок шкалы производилось для гальванометров ГСА-1МА на отметках шкалы 20, 70, 90, 95, 100, а для гальванометров ГСА-1МБ на отметках шкалы 0, 10, 30, 70, 90, 95, 100.

В табл. 1 и 2 приведены средние квадратические отклонения значений поправок, полученных на каждой из отметок шкалы

средние значения, полученные для данного гальванометра и для данной точки шкалы. Среднее квадратическое отклонение, вычисленное при осреднении по всем гальванометрам и всем поверенным отметкам шкалы составляет 0,2 деления шкалы для обоих типов гальванометров.

Из всей группы приборов выделяется гальванометр № 50142, для которого среднее квадратическое отклонение на точке 0 дости-

Таблица 2

Средние квадратические отклонения значений поправок шкалы ГСА-1МБ (деления шкалы)

№ гальвано-метра	Отметка шкалы							Среднее
	0	10	30	70	90	95	100	
47709	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
50142	0,5	0,4	0,3	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3
53531	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
54413	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2
Среднее	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	

гает 0,5 деления. У этого гальванометра подвижная система плохо уравновешена, но тем не менее забраковать такой прибор не представляется возможным, так как требования к уравновешенности подвижной системы гальванометра не предусмотрены техническими условиями и необходимо их уточнить.

Оценка погрешности, с которой при проверке определяются значения сопротивления гальванометра R и цены деления по току C_I , производилась для гальванометров ГСА-1МА на клеммах «+», «Р» без включения шунта, «+», «Р» с включенным шунтом и «+», «А» без шунта.

Таблица 3

Средние квадратические отклонения значений параметров ГСА-1МА (%)

№ гальвано-метра	Клеммы «+», «Р» б/ш		Клеммы «+», «Р» с/ш		Клеммы «+», «А» б/ш	
	R	C_I	R	C_I	R	C_I
240	0,3	0,4	0,5	0,5	0,6	0,5
251	0,4	0,4	0,5	0,3	0,3	0,4
275	0,4	0,2	1,1	0,5	0,4	0,5
279	0,6	0,7	0,8	0,8	0,2	0,7
382	0,4	0,5	0,6	0,8	0,2	0,4

Для гальванометров ГСА-1МБ оценка погрешности определения этих же параметров производилась на клеммах «+», «Р» без шунта, «+», «Р» с шунтом и «+», «С» без шунта.

Полученные средние квадратические отклонения σ значений параметров гальванометров (проценты) приведены в табл. 3 и 4.

В табл. 5 и 6 приведены средние значения R и C_I и средние квадратические отклонения значений параметров σ , средние по всем гальванометрам. Из таблиц видно, что значения σ малы и имеют одинаковый порядок для всех гальванометров.

Таблица 4

Средние квадратические отклонения значений параметров ГСА-1МБ (%)

№ гальванометра	Клеммы «+», «Р» б/ш		Клеммы «+», «Р» с/ш		Клеммы «+», «С» б/ш	
	R	C_I	R	C_I	R	C_I
47709	0,7	0,4	0,6	0,6	0,4	0,6
50142	0,5	0,6	0,5	0,9	0,6	0,5
53531	0,4	0,2	0,8	0,4	0,5	0,2
54413	1,2	0,6	1,0	1,0	0,6	0,6

Вычисленные по всем гальванометрам, средние квадратические отклонения величины сопротивления гальванометра и цены деления по току при измерениях на разных клеммах находятся в пределах 0,4—0,7 % для обоих типов гальванометров. Сопоставление полученных значений средних квадратических отклонений цены деления по току с значениями, полученными ранее при ис-

Таблица 5

Средние значения параметров ГСА-1МА и их средние квадратические отклонения

Клеммы	R Ом	σ %	C_I мкА	σ %
«+», «Р» б/ш	34	0,4	0,7	0,4
«+», «Р» с/ш	11	0,7	2,3	0,6
«+», «А» б/ш	38	0,4	1,9	0,5

следовании ГСА-1 [1], показывает, что погрешности поверки ГСА-1МА и ГСА-1МБ имеют тот же порядок.

Пользуясь величинами σ , можно обосновать точность, с которой следует давать в свидетельстве о поверке значения параметров гальванометров, а также оценить погрешность показаний актинометрических приборов в паре с гальванометром.

Следует отметить, что в технических условиях даны слишком большие допуски на значения параметров гальванометров. Вслед-

Таблица 6

Средние значения параметров ГСА-1МБ и их средние квадратические отклонения

Клеммы	R Ом	σ %	C_I мкА	σ %
"+" , "P" б/ш	30	0,7	0,8	0,4
"+" , "P" с/ш	8	0,7	3,0	0,7
"+" , "C" б/ш	13	0,5	5,8	0,5

ствие этого необходимо каждый раз подбирать индивидуально, по чувствительности, пару: актинометрический прибор — гальванометр.

Температурные коэффициенты сопротивления гальванометра и цены деления шкалы по току определялись для гальванометров ГСА-1МА. Для этого сопротивления гальванометра и цена деления шкалы определялись в термостате при температурах около -7 , $+6$ и $+20^\circ\text{C}$. Для двух гальванометров измерения проводились на клеммах «+», «P»; «+», «A», «+», «П» при выключенном шунте, а для одного только на клеммах «+», «A». По полученным данным вычислялись температурные коэффициенты R и C_I . Значения температурных коэффициентов приведены в табл. 7.

Таблица 7

Температурные коэффициенты сопротивления гальванометра и цены деления шкалы по току

№ гальванометра	Клеммы "+" , "P" б/ш		Клеммы "+" , "A" б/ш		Клеммы "+" , "П" б/ш	
	R	C_I	R	C_I	R	C_I
251	0,0025	0,00060	0,00055	0,00066	—	0,00086
275	0,0022	0,00048	—	0,00079	—	0,00055
50711	—	—	0,00048	0,00083	—	—

Выводы

1. Среднее квадратическое отклонение поправок шкалы гальванометра составляет 0,2 деления шкалы.

2. Средние квадратические отклонения значений сопротивления гальванометра и цены деления шкалы по току при измерениях на разных клеммах находятся в пределах 0,4—0,7 %.

3. Небольшие значения средних квадратических отклонений свидетельствуют о целесообразности применения принятого метода поверки и о надежности результатов поверки.

4. При использовании гальванометра на клеммах «+», «А» без шунта следует принимать температурный коэффициент сопротивления гальванометра равным 0,0005 и температурный коэффициент цены деления по току равным 0,0007.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Луговская М. А., Покровская И. А. Погрешности поверки термoeлектрических актинометров и пиранометров. — Труды ГГО, 1956, вып. 6, с. 120—133.

В. А. Клеванцова, И. А. Покровская, Л. Е. Щебелина

ОЦЕНКА СЛУЧАЙНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПЕРЕВОДНОГО МНОЖИТЕЛЯ И ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПИРАНОМЕТРОВ

Поверка пиранометров осуществляется сличением их с образцовыми приборами как в естественных условиях при облучении Солнцем, так и в лаборатории на специальной установке ПО-4, используя в качестве источника радиации лампу. При поверке определяют чувствительность пиранометра; в случае если пиранометр поступает в поверку с гальванометром, определяют также переводный множитель пиранометра в паре с гальванометром.

Погрешности поверки пиранометров исследовались ранее [1]. Изменения, которые имели место с тех пор заключаются в том, что вместо гальванометра ГСА с пиранометром применяется гальванометр ГСА-1МА, а с образцовыми приборами — потенциометр ПП-63 класса точности 0,05.

При поверке пиранометра образцовым прибором служит актинометр М-3, если сличение производится при облучении Солнцем. Если же поверка производится при облучении лампой, то в качестве образцового используется пиранометр однотипный с поверяемым. В качестве электроизмерительного прибора в обоих случаях применяется ПП-63.

Для оценки случайных погрешностей поверка пиранометров проводилась с десятикратной повторностью. Для поверки по лампе было взято 10 пиранометров, из них 6 приборов поверялись в естественных условиях.

Случайная погрешность поверки оценивалась по среднему квадратическому отклонению значений, получаемых по одной поверке, от среднего из результатов десяти поверок.

Для большей объективности каждое сличение проводилось с двумя образцовыми приборами. В естественных условиях оба образцовых прибора наблюдались одновременно. При поверке в лаборатории показания образцовых приборов отсчитывались последовательно один за другим.

Поверка пиранометров проводилась в соответствии с принятыми в настоящее время методическими указаниями. Сличение проводилось сериями, состоящими из десяти отсчетов в естественных условиях и трех отсчетов при поверке в лаборатории. Для каждого пиранометра вычислялась величина чувствительности или переводного множителя пиранометра в паре с гальванометром данной серии измерений. Затем вычислялось среднее по всем сериям и среднее квадратическое отклонение для данного пиранометра и для данной группы приборов.

Таблица

Результаты определения чувствительности K ($\text{мВ} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{мин/кал}$) пиранометров в лабораторных условиях

№ поверяемого пиранометра	№ образцового пиранометра			
	2104		794	
	K	$\sigma \%$	K	$\sigma \%$
8114	9,79	0,3	9,78	0,3
1793	9,94	0,4	9,94	0,3
794	7,03	0,4	—	—
5487	7,97	0,3	7,98	0,3
1896	8,08	0,3	8,07	0,3
7180	9,15	0,4	9,14	0,4
8136	10,04	0,4	10,04	0,4
803	7,40	0,3	7,40	0,3
6519	7,86	0,7	7,88	0,8
5177	8,29	0,3	8,28	0,4
2104	—	—	8,28	0,3

Поверка в естественных условиях проводилась в 1977 г. в Карадагской обсерватории при радиации $0,7—1,3 \text{ кал/}(\text{см}^2 \cdot \text{мин})$ и температуре $20—30^\circ\text{C}$. Произведение оптической массы атмосферы на фактор мутности Линке колебалось от 3 до 8. Ввиду больших колебаний температуры и малых температурных коэффициентов приборов, температурные поправки не вводились.

В табл. 1 приведены средние значения чувствительности пиранометров и средние квадратические отклонения, полученные при сличении с образцовыми пиранометрами № 2104 и № 794 в лабораторных условиях, на установке ПО-4. Образцовые и поверяемые пиранометры подключались к ПП-63. Среднее по всем пиранометрам значение $\sigma=0,4\%$.

В табл. 2 даны значения чувствительности пиранометров, полученные при сличении в естественных условиях с образцовыми актинометрами № 87 и 392. Образцовые актинометры и поверяе-

Таблица 2

Результаты определения чувствительности пиранометров K ($\text{мВ} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{мин}/\text{кал}$) в естественных условиях

№ поверяемого пиранометра	№ образцового актинометра			
	87		392	
	K	$\sigma \%$	K	$\sigma \%$
8114	9,94	0,5	9,94	0,5
1793	10,13	0,6	10,12	0,6
794	6,98	1,1	6,98	1,2
5487	7,97	0,6	7,97	0,4
1896	8,24	0,5	8,25	0,6
2104	8,01	0,5	8,03	0,7

ые пиранометры подключались к ПП-63. Среднее по всем пиранометрам значение $\sigma = 0,7 \%$.

В табл. 3 приведены переводные множители пиранометров с гальванометрами, полученные в результате сличения в естественных условиях с образцовыми актинометрами № 87 и 392, подключенными к ПП-63. Среднее по всем пиранометрам значение $\sigma = 0,9 \%$.

В табл. 4 приведены значения переводных множителей пиранометров с гальванометрами, полученные при сличении в естественных условиях с теми же образцовыми актинометрами, но подключенными к гальванометрам. Среднее по всем пиранометрам значение $\sigma = 0,8 \%$.

Из сопоставления данных, приведенных в табл. 1 и 2, видно, что случайные погрешности определения чувствительности меньше при проверке в лабораторных условиях. Однако из тех же таблиц следует, что если значения K , полученные по разным образцовым

Таблица 3

Результаты определения переводных множителей a ($\text{кал}/\text{см}^2 \cdot \text{мин}$) пиранометров с гальванометрами в естественных условиях (образцовые актинометры с ПП-63)

№ поверяемого пиранометра и гальванометра	№ образцового актинометра			
	87		392	
	a	$\sigma \%$	a	$\sigma \%$
8114/251	0,0170	0,7	0,0170	0,8
1793/251	0,0169	0,6	0,0169	0,5
794/240	0,0235	0,9	0,0235	1,1
5487/240	0,0207	0,5	0,0207	0,6
1896/279	0,0210	0,7	0,0210	0,9
2104/279	0,0217	1,3	0,0217	1,3

приборам, но по одному и тому же методу совпадают, то результаты, полученные разными методами, различаются на величины, которые не могут быть объяснены случайными погрешностями, так как они малы. Так, при поверке по лампе значение чувствительности пиранометра № 1793 оказалось на 1,9 % ниже, а № 210 на 3,4 % выше, чем при поверке в естественных условиях. Это разхождение систематическое и его следует отнести за счет разности спектральной чувствительности сравниваемых пиранометров. Так как проверять пиранометры всегда в естественных условиях практически невозможно, то это подтверждает необходимость применения стандартного покрытия приемников при изготовлении и ремонте пиранометров, а также использование в качестве образцового пиранометра прибора с тем же покрытием, что и у проверяемого.

Таблица

Результаты определения переводных множителей a (кал/(см²·мин) пиранометров с гальванометрами в естественных условиях (образцовые актинометры с гальванометрами

№ проверяемого пиранометра и гальвано- метра	№ образцового актинометра и гальванометра			
	87/240 и 87/279		394/240 и 392/251	
	a	σ %	a	σ %
8114/251	0,0170	0,6	0,0170	0,7
1793/251	0,0169	0,6	0,0168	0,7
794/240	0,0235	0,8	0,0234	1,0
5487/240	0,0208	1,0	0,0207	1,1
1896/279	0,0209	0,8	0,0211	0,8
2104/279	0,0219	0,4	0,0221	0,5

Если сравнить полученные величины погрешностей с величинами, приведенными в работе [1], то можно отметить, что замена гальванометра потенциометром при определении чувствительности пиранометра и применение потенциометра вместо гальванометра при образцовом актинометре дает некоторое уменьшение случайных погрешностей поверки. Так среднее квадратическое отклонение при определении чувствительности в лабораторных условиях уменьшилось от 0,6 до 0,4 %, а при определении переводных множителей в естественных условиях от 1,1 до 0,9 %. Среднее квадратическое отклонение при определении переводных множителей в естественных условиях при замене гальванометра ГСА на ГСА 1МА уменьшилось от 1,1 до 0,8 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Луговская М. А., Покровская И. А. Погрешности поверки термоэлектрических актинометров и пиранометров. — Труды ГГО, 1956, вып. 61, с. 120—134.

В. А. Клеванцова, И. А. Покровская

ПРОЕКТ ПОВЕРОЧНОЙ СХЕМЫ ДЛЯ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ОСВЕЩЕННОСТИ РАДИАЦИЕЙ СОЛНЦА

В соответствии с Межведомственным единым координационным планом метрологического обеспечения средств измерения гидрометеорологического назначения в отделе метрологии ГГО был подготовлен проект локальной поверочной схемы передачи единицы энергетической освещенности радиацией Солнца (рис. 1).

Приведенная поверочная схема распространяется на средства измерения (СИ) энергетической освещенности солнечной радиацией, применяемые в системе Госкомгидромета. Поверочная схема устанавливает порядок передачи размера единицы энергетической освещенности от рабочего эталона рабочим СИ посредством образцовых средств измерения (ОСИ) 1, 2 и 3-го разрядов с указанием погрешностей и основных методов поверки. Рабочий эталон единицы энергетической освещенности радиацией Солнца сравнивается с Государственным специальным эталоном единицы энергетической освещенности (ГСЭ ЭО) непрерывного оптического излучения сплошного спектра в диапазоне длин волн 0,2—4,5 мкм [1]. ГСЭ ЭО хранится во Всесоюзном научно-исследовательском институте оптико-физических измерений (ВНИИОФИ). Локальная поверочная схема соответствует общесоюзной поверочной схеме для СИ энергетической освещенности [1].

Поверка СИ производится в соответствии с методическими указаниями, разработанными для каждого типа приборов и утвержденными в установленном порядке.

Приведенные в поверочной схеме значения погрешностей, характеризующихся средним квадратическим отклонением ряда S_0 или пределом допускаемой погрешности Δ , получены на основании анализа результатов многолетних систематических поверок приборов или специально поставленных экспериментов.

В качестве верхнего звена локальной поверочной схемы в системе Госкомгидромета служит рабочий эталон — компенсационный пиргелиометр типа пиргелиометра Ангстрема (№ 212), кото-

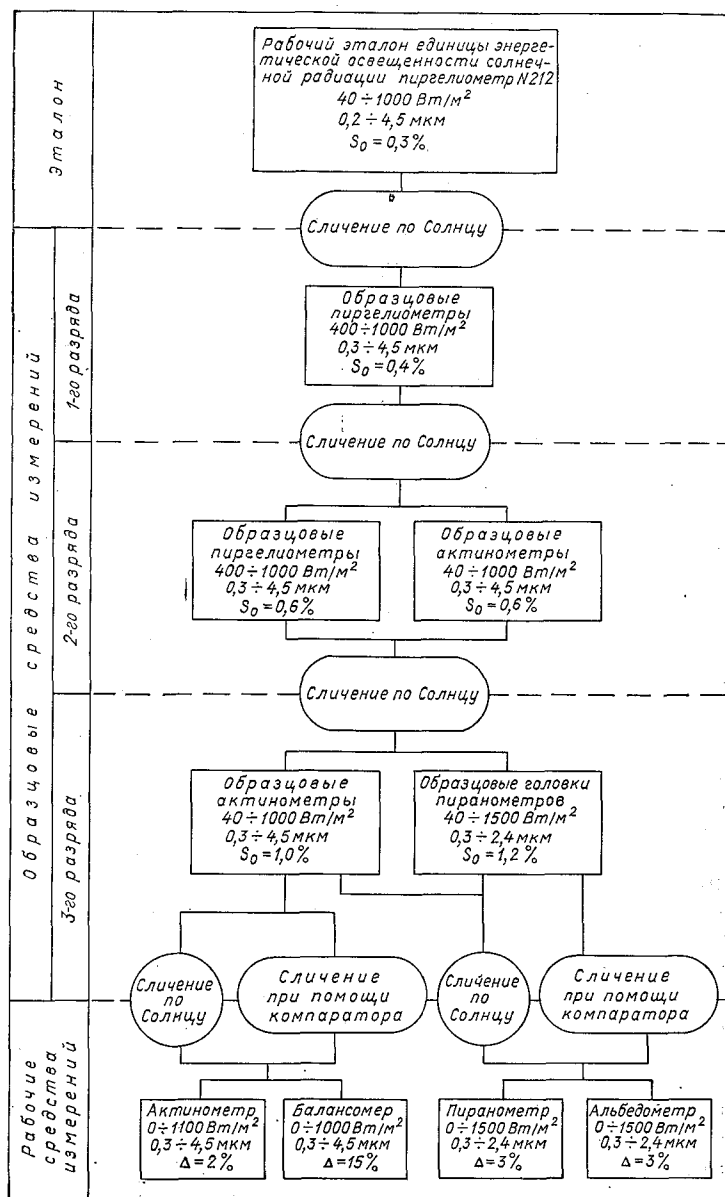


Рис. 1. Локальная поверочная схема для средств измерения энергетической освещенности радиацией Солнца.

ий хранится в отделе метрологии ГГО. Переводный множитель пиргелиометра № 212 при аттестации его определяется со случайной погрешностью 0,03 %. Случайная погрешность измерения рабочим эталоном, оцениваемая средним квадратическим отклонением (СКО) ряда измерений, составляет 0,3 % [2].

Передача единицы измерения энергетической освещенности от рабочего эталона образцовым средствам измерения (ОСИ) 1-го разряда, от ОСИ 1-го разряда к ОСИ 2-го разряда и от ОСИ 2-го разряда к 3-му осуществляется путем непосредственного их сличения при облучении Солнцем.

ОСИ 1-го разряда — пиргелиометры № 196, 250 и 541 также хранятся в ГГО. Они ежегодно сличаются с рабочим эталоном. СКО ряда измерений пиргелиометров 1-го разряда составляет 4 %.

К ОСИ 2-го разряда относятся пиргелиометры Ангстрема Янишевского (М-59), а также актинометры М-3, аттестованные как образцовые сличением с ОСИ 1-го разряда. Сличение ОСИ 2-го разряда с ОСИ 1-го разряда должно производиться не реже одного раза в три года. СКО ряда измерений ОСИ 2-го разряда составляет 0,6 % [2, 3].

ОСИ 2-го разряда хранятся в местных управлениях Госкомгидромета — в Бюро поверки или гидрометеорологических обсерваториях и используются для сличения с ними ОСИ 3-го разряда — образцовых актинометров и образцовых головок пиранометров, которые применяются для поверки рабочих актинометров пиранометров в Бюро поверки, а также используются при инспекции актинометрических станций.

Сличение ОСИ 3-го разряда с ОСИ 2-го разряда производится ежегодно. Случайная погрешность измерения (СКО) образцовыми актинометрами 3-го разряда составляет 1,0 %, а образцовыми головками пиранометров — 1,2 % [3, 4].

Рабочими СИ являются: актинометр М-3, универсальный пиранометр М-80М и альбедометр М-69, имеющие приемниками радиационной головки пиранометра М-115М и балансомер М-10М. Пределы допускаемых погрешностей этих приборов, указанные в схеме, соответствуют требованиям ТУ на эти приборы.

Поверка рабочих СИ по образцовым СИ 3-го разряда (или по ОСИ более высоких разрядов) производится либо непосредственным сличением при облучении Солнцем, либо при помощи компаратора (лампы).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 8.195-76. Государственный специальный эталон и общесоюзная поверочная схема для средств измерений энергетической освещенности непрерывного оптического излучения сплошного спектра в диапазоне длин волн 2—4,5 мкм. — М.: Изд-во стандартов.

2. Клеванцова В. А., Покровская И. А. К метрологической аттестации эталонного пиргелиометра Госкомгидромета. — См. наст. сборник.

3. Клеванцова В. А., Покровская И. А., Шебелина Л. Е. О случайных погрешностях поверки термоэлектрических актинометров.— Труды ГГО, 1978, вып. 414, с. 27—32.

4. Клеванцова В. А., Покровская И. А., Шебелина Л. Е. Оценка случайных погрешностей при определении переводного множителя и чувствительности пиранометров.— См. наст. сборник.

Д. Я. Блантер, Ю. В. Роголев

РЕЗУЛЬТАТЫ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ АТТЕСТАЦИИ ОБРАЗЦОВЫХ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ТРУБ

Статья посвящена анализу результатов аттестации аэродинамических труб (АТ), проведенной на Сафоновском заводе «Гидрометприбор» и в бюро поверки экспериментально-производственных мастерских ГГО (БП ЭПМ). Аттестация проводилась в соответствии с Межведомственным единым координационным планом метрологического обеспечения средств измерения гидрометеорологического назначения, выпускаемых предприятиями гидрометприборостроения (ГМП) и находящихся в обращении в системе Государственного комитета СССР по гидрометеорологии и контролю природной среды.

Аэродинамические трубы применяются для градуировки приборов измерения скорости ветра и являются образцовым средством 1-го разряда [2]. Аэродинамические трубы Сафоновского завода ГМП и БП ЭПМ представляют собой АТ замкнутого типа с одним обратным каналом и открытой рабочей частью. Форма сечения рабочей части — эллипс с размерами осей: горизонтальной — 400 мм, вертикальной — 600 мм. Длина рабочей части — 800 мм.

Исследования проводились согласно РТМ на аттестацию АТ, разработанную ВНИИМ и ГГО. Основные положения этой методики изложены в работе [1]. В качестве образцовых средств при аттестации использовалась образцовая напорная труба 1-го разряда в комплекте с микроанометром МКВ (в диапазоне скоростей 5—40 м/с) и образцовый электроанометр (в диапазоне 5—50 м/с).

Аттестация включала в себя определение следующих характеристик труб: неравномерности поля скоростей, поля турбулентных пульсаций, нестабильности скорости потока во времени, коэффициента сопла K_c , градуировки счетчика числа оборотов двигателя, основной погрешности измерения скорости в трубе.

Целью исследования поля скоростей является определение «зон равных скоростей» и неравномерности потока в этой зоне. Исследования проводились в диапазоне скоростей 10—40 м/с помощью образцовой напорной трубки, соединенной с микро-

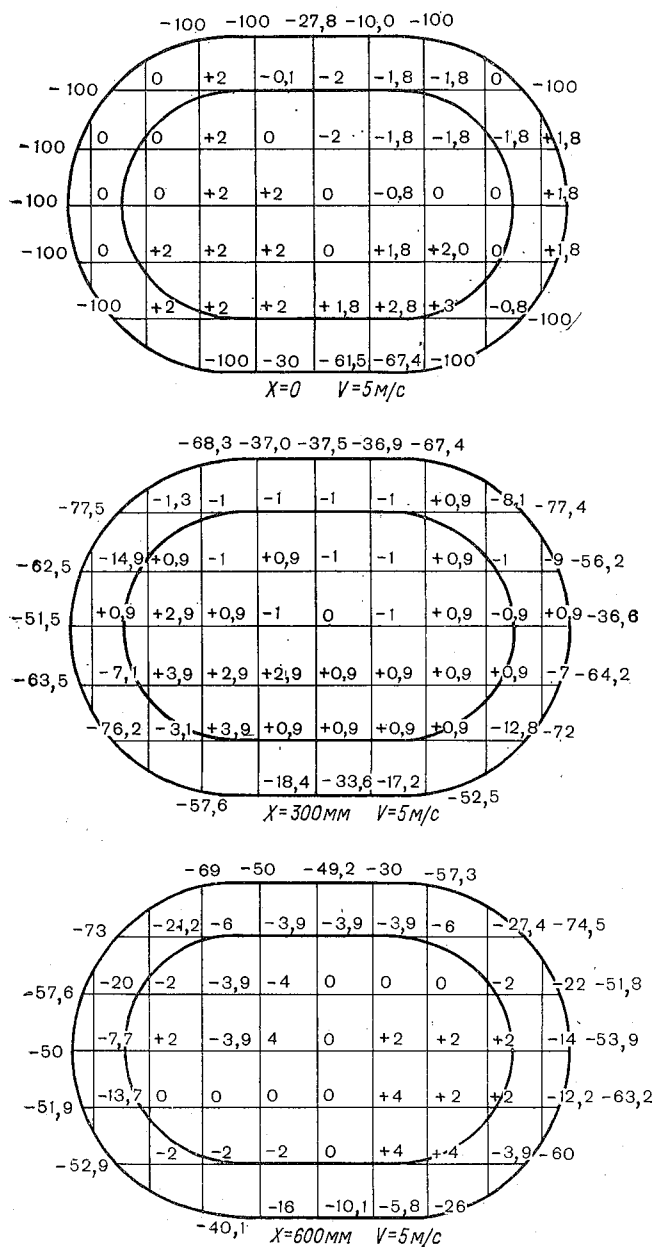


Рис. 1. Диаграммы поля скоростей в трех сечениях (для АТ БП ЭПМ).

анометром ММН-240, а на скорости 2 м/с — с помощью электро-
мометра (ЭА) с проволочным измерительным преобразовате-
лем. Преобразователь перемещался в плоскости, перпендикуляр-
ной оси АТ, и по длине рабочего участка. Измерения производи-
лись на срезе сопла и в сечениях 240 и 500 мм от среза сопла на
скоростях 2, 10, 20 и 40 м/с. С целью исключения погрешности от
нестабильности скорости в АТ, одновременно с измерением в i -й
точке сечения производилось измерение скорости по перепаду
давления в трубе (в диапазоне 10—40 м/с) и по счетчику числа

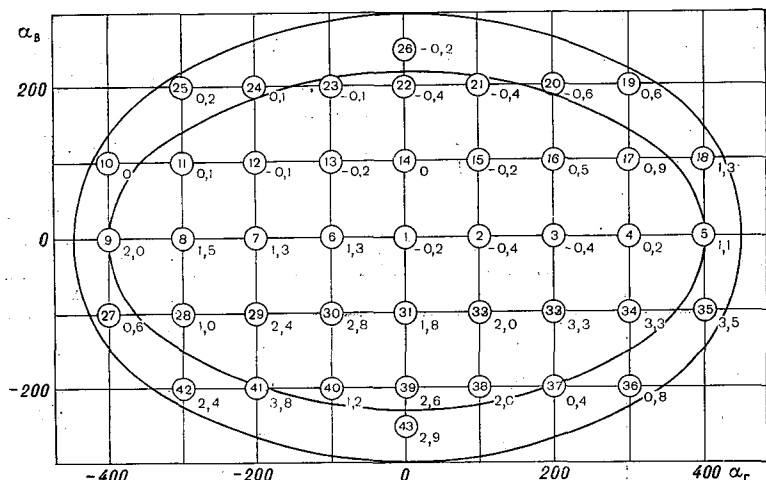


Рис. 2. Диаграмма поля скоростей в одном сечении (для АТ Сафо-
новского завода ГМП).

оборотов двигателя (на скорости 2 м/с). Скорость в исследуемых
точках сечений выражалась в долях скорости, измеренной по пе-
репаду давления в трубе (или по счетчику числа оборотов), как

$$V_i = \frac{V_{i\text{ср}}}{V_{0\text{ср}}}, \quad (1)$$

где $V_{i\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{n}$; $V_{0\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^n V_0}{n}$; V_i — скорость, измеренная в i -й
точке сечения; V_0 — скорость, измеренная по перепаду давления
или счетчику числа оборотов); n — число измерений в каждой
точке.

Результаты исследований представлялись в виде диаграмм за-
висимости $V_{i\text{отн}} = f(X, d_r, d_n)$. Примеры таких диаграмм приве-
дены на рис. 1 и 2. За границу «зоны равных скоростей» прини-
мались точки, скорость в которых отличается от скорости на оси
рубы не более чем на 4 %. Оценкой неоднородности поля в зоне

равных скоростей служит величина, представляющая собой отношение максимального значения скорости в сечении X_i к среднему в этом сечении скорости

$$\mu = \frac{V_{i\text{cp}}}{V_{\text{cp}X}},$$

где $V_{\text{cp}X} = \frac{\sum_{i=1}^m V_{i\text{cp}}}{m}$, m — число точек измерения в каждом сечении.

Была произведена оценка погрешности ряда измерений в точках $X=0$, $d_r=0$, $d_b=0$, результаты расчета приведены в табл. 1. Так как в эксперименте не оценивалось абсолютное значение скорости, а определялось ее относительное значение, то можно считать погрешностью проведенных исследований погрешность Δ , опре-

Таблица

БП ЭПМ		Сафоновский завод ГМП	
V м/с	Δ %	V м/с	Δ %
5	3,00	10	1,10
15	0,25	20	0,55
25	0,20	40	0,10
35	0,10	—	—

деленную из эксперимента. Анализ результатов измерений полных скоростей показал, что зона равных скоростей представляет собой эллипс с осями 450×800 мм, а неравномерность в зоне равных скоростей не превышает 4 %.

Определение поля интенсивности турбулентных пульсаций производилось с помощью ЭА с проволочным преобразователем. Измерения производились на срезе сопла и в сечении 240 и 500 мм на скоростях 2, 10, 40 м/с. Интенсивность пульсаций ε рассчитывалась в процентах по формуле

$$\varepsilon = \frac{4U \cdot U'}{U^2 - U_0^2} \cdot 100, \quad (3)$$

где U — показания ЭА при текущей скорости V ; U' — среднее квадратическое значение пульсаций напряжения на выходе ЭА (регистрируется с помощью квадратичного вольтметра, подключаемого в ЭА); U_0 — показания ЭА при $V=0$.

Анализ результатов измерений показал, что интенсивность турбулентных пульсаций в АТ БП ЭПМ не превосходит 2 %, интенсивность турбулентных пульсаций в АТ Сафоновского завода ГМП в сечениях $X=0$ и $X=240$ мм не превосходит также 2 %.

сечении $X=500$ мм не превосходит 3,2 %, а при скорости $V=40$ м/с достигает 4,7 %. Следует отметить, что в сечении $X=500$ мм, на скоростях потока выше 20 м/с, основной вклад уровень пульсаций вносят регулярные пульсации, вызванные виводом трубы.

Исследования неустойчивости скорости потока в АТ проводились с помощью ЭА (в диапазоне скоростей (0,5—5 м/с) и с помощью напорной трубки (от 5 м/с и выше). Преобразователь ЭА (или напорная трубка) устанавливался в центре рабочей части трубы. Отсчеты проводились в течение 30 мин с интервалом мин. Погрешность от неустойчивости определялась по формуле

$$\delta = 3 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \bar{V}^2}{n-1}}, \quad (4)$$

где $\bar{V} = (V_i - V_{cp}) / V_{cp}$, $V_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{n}$, n — число точек измерения

в промежуток времени $\tau=30$ мин. Результаты исследований представлены в табл. 2. Анализ экспериментальных данных показал, что неустойчивость скорости в аттестуемых трубах несколько превышает предельно допустимые значения. В целях уменьшения неустойчивости скорости потока в трубах представляется целесообразной замена существующего привода труб на более современный.

Определение коэффициента сопла K_c проводилось путем сливания результатов измерения скорости по перепаду давления на резе сопла АТ с результатами измерений напорной трубкой 1-го звяряда. Трубка устанавливалась на оси трубы на срезе сопла.

Таблица 2

Сафоновский завод ГМП		БП ЭПМ		РТМ
V м/с	δ %	V м/с	δ %	$\delta_{\text{нест}}$ %
0,5	11,0	—	—	—
—	—	1,0	5,4	9,4
2,0	6,0	2,0	3,0	6,2
4,5	2,6	4,5	2,1	3,2
—	—	5,0	1,8	2,3
10,0	2,4	—	—	1,5
—	—	15,0	1,2	1,2
20,0	1,7	—	—	1,1
—	—	25,0	0,9	1,0
30,0	0,4	—	—	0,9
—	—	35,0	0,5	0,9

Измерения производились на скоростях потока 10, 15, 20, и 45 м/с (для АТ Сафоновского завода ГМП) и на скоростях потока 5, 10, 15, 20, 25, 30 и 35 м/с (для АТ БП ЭПМ). Коэффициент сопла K_c рассчитывался по формуле

$$K_c = K_{тр} \sqrt{\frac{\Delta P_{тр}}{\Delta P_c}}, \quad (1)$$

где $K_{тр}$ — коэффициент образцовой трубки 1-го разряда; $\Delta P_{тр}$ — показания микроманометра, подключенного к образцовой трубе; ΔP_c — показания микроманометра, подключенного к сечениям входа и выхода сопла. В качестве K_c принималось среднее значение $\bar{K}_c$, полученное из экспериментов в диапазоне скоростей потока 5—45 м/с. Для АТ БП ЭПМ $K_c = 0,986$, для Сафоновского завода ГМП $K_c = 0,993$. Предельная погрешность результата δ_{K_c} (в процентах) определения K_c рассчитывалась по формуле

$$\delta_{K_c} = 3S(\hat{A})_{K_c} = 3 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n V_i^2}{n(n-1)}} \cdot 100, \quad (2)$$

где $V_i = \frac{K_{ci} - \bar{K}_c}{\bar{K}_c}$, K_{ci} — значения коэффициента для i -й скорости диапазона, $\bar{K}_c$ — среднее значение коэффициента, полученное из экспериментов в диапазоне 5—45 м/с, n — число измерений.

По результатам экспериментов получено значение предельной погрешности определения K_c , равное для АТ Сафоновского завода 0,15 %, для АТ БП ЭПМ — 0,52 %, что отражает высокую воспроизводимость результатов измерения коэффициента K_c . Следует отметить, однако, что класс точности приборов, примененных при этом, не позволяет считать указанное значение погрешности полной погрешностью определения K_c . Погрешность определения коэффициента с учетом погрешности измерительных приборов следует считать по формуле

$$\delta_{K_c} = \sqrt{\delta_{K_{тр}}^2 + \frac{1}{4} \delta_{МКВ}^2 + \frac{1}{4} \delta_{ММН}^2}, \quad (3)$$

где $\delta_{K_{тр}}$ — предельная погрешность определения коэффициента образцовой напорной трубки ($\delta_{K_{тр}} = 1,2$ %), $\delta_{МКВ}$ — предел допускаемой погрешности манометра МКВ, $\delta_{ММН}$ — предел допускаемой погрешности манометра ММН (при наличии индивидуальной градуировки считаем, что $\Delta_{ММН} = 0,5$ мм).

При использовании указанных средств измерений погрешность определения коэффициента K_c будет иметь значения, представленные в табл. 3.

Измерение скорости потока в диапазоне скоростей 0,5—4,5 м/с до оснащения АТ электроанемометрами осуществляется с помощью счетчика числа оборотов двигателя, разработанного ВНИИМ, упрощенная блок-схема которого представлена на рис. 3.

Градуировка счетчика числа оборотов представляет собой определение зависимости между числом оборотов двигателя и скоростью потока воздуха в АТ. Градуировка проводится методом сличения показаний счетчика (количество импульсов с его выхода) показаниями ЭА, измеряющего скорость потока воздуха в АТ. Выводочный преобразователь ЭА устанавливается на срезе сопла, в зоне равных скоростей, в зоне наименьшей неравномерности поля. Измерения производятся в диапазоне 0,5—4,5 м/с через каждые 0,5 м/с. В связи с тем, что зависимость между скоростью потока воздуха в АТ и числом оборотов двигателя зависит от загромождения

Таблица 3

м/с	10	15	20	25	45
с %	1,4	1,3	1,2	1,2	1,2

рабочего поля проверяемыми приборами, то градуировка проводилась для пустой АТ и при ее загрузке. На Сафоновском за-

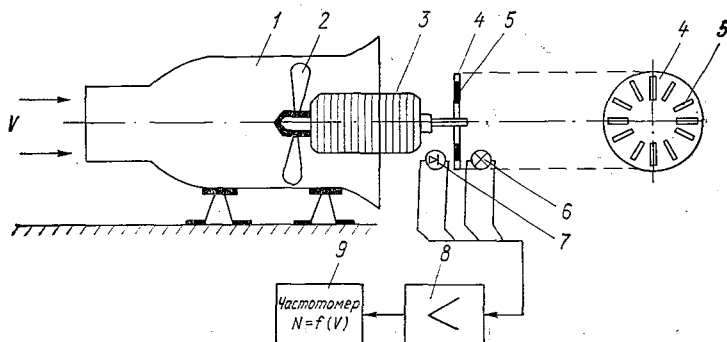


Рис. 3. Блок-схема устройства для измерения скорости потока по числу оборотов двигателя АТ.

1 — корпус АТ, 2 — винт, 8 — электродвигатель, 4 — кодовый диск, 5 — прорезь, 6 — источник света, 7 — фотодиод, 8 — усилитель, 9 — частотомер.

где ГМП осуществлялась градуировка счетчика для пустой АТ дальнейшей поочередной установкой в рабочем участке трубы приборов: М-63М, М-47, КИВ. Для АТ БП ЭПМ соответственно М-92, М-25, М-95, М-47, М-63М. Зависимость $\bar{N}_{сч} = f(V)$ представлена на рис. 4, где

$$\bar{N}_{сч} = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{N}_i}{n}, \quad \bar{V} = \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{n}; \quad (8)$$

здесь N_i — показания счетчика в i -м эксперименте, V_i — скорость АТ, измеренная ЭА, n — число измерений.

Анализ результатов градуировки показал, что зависимость $\bar{N}_{\text{сч}} = f(V)$ практически линейна в диапазоне скоростей 0,5—4,5 м/с. Градуировочные зависимости при загрузке поля трубы прибором М-95, М-92, М-47 и М-63М очень близки. Отличие градуировочной зависимости счетчика при загрузке поля прибором М-25 от семейства остальных градуировок объясняется спецификой его поверки

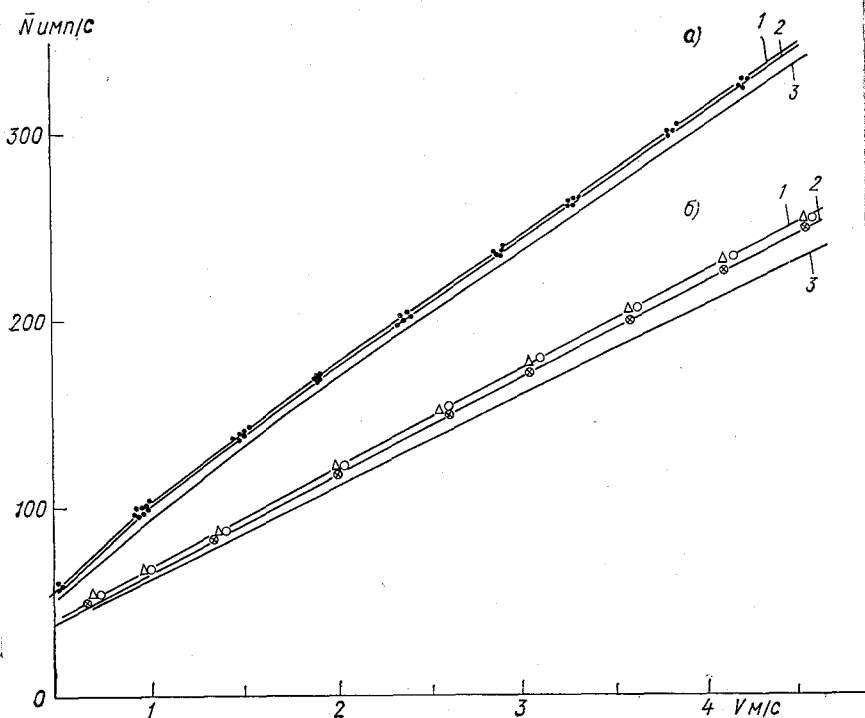


Рис. 4. Кривые зависимости $\bar{N}_{\text{сч}} = f(V)$ при градуировке счетчика числа оборотов АТ по электроанемометру.

а) Сафоновский завод ГМП: 1) М-63М, КИВ, 2) М-47, 3) не загружена;
б) БП ЭПМ ГГО: 1) М-92, М-25, 2) М-63, 3) не загружена.

в БП ЭПМ, т. е. при поверке обычно устанавливается одновременно два прибора М-25, симметрично разнесенных на штанге от оси трубы. Погрешность градуировки счетчика числа оборотов определялась на скоростях 0,5 (1 м/с для БП ЭПМ), 2,0 и 4,5 м/с и рассчитывалась по формуле

$$\delta_{\text{ср}} = 3\sigma = 3\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n V_i^2}{n-1}}, \quad (9)$$

где $V_i = (V_i - V_{\text{ср}})/V_{\text{ср}}$, n — число измерений на данной скорости

Погрешность измерения скорости в диапазоне 0,5—5 м/с определяется погрешностью градуировки счетчика числа оборотов, погрешностью частотомера и, в случае если нестабильность велика, погрешностью, вызываемой нестабильностью скорости потока в АТ, е.

$$\delta_V = \sqrt{\delta_{гр}^2 + \delta_{част}^2 + \delta_{нест.}^2} \quad (10)$$

Результаты расчета значений $\delta_{ср}$ по формуле (9) и δ_V по формуле (10) представлены в табл. 4. Численные значения $\delta_{нест}$ брались из табл. 2.

Таблица 4

ИБП ЭПМ			Сафоновский завод ГМП		
V м/с	$\delta_{ср}$ %	δ_V	V м/с	$\delta_{ср}$ %	δ_V
1,0	9,0	13,0	0,5	9,0	14,0
2,0	4,2	7,5	2,0	4,5	7,5
4,5	3,0	4,4	4,5	3,7	4,5

В диапазоне скоростей 5—45 м/с скорость потока в АТ рассчитывается по формуле

$$V_{АТ} = K_c \sqrt{\frac{2 \Delta P_c}{\rho}}, \quad (11)$$

где ΔP_c — перепад давления в сечениях входа и выхода сопла, измеряемый микроманометром; K_c — коэффициент сопла АТ, ρ — плотность воздуха.

Таблица 5

V м/с	5	10	15	20	25	30	35	40
$\delta_{\Delta P}$	5,00	1,30	0,70	0,40	0,25	0,38	0,30	0,25

Погрешность измерения скорости определяется погрешностью определения коэффициента K_c и погрешностью применяемого микроманометра, измеряющего перепад давления в АТ, т. е.

$$\delta_V = \sqrt{\delta_{K_c}^2 + \frac{1}{4} \delta_{\Delta P}^2} \quad (12)$$

Микроманометр ММН-240, прошедший индивидуальную градуировку, имеет погрешность $\delta_{\Delta P}$, при измерении скорости воздушного потока в диапазоне 5—40 м/с, представленную в табл. 5. Предельная погрешность определения коэффициента сопла K_c для обоих труб равна 1,4 %. Подставив в формулу (12) численные значения, получим для исследуемого диапазона скоростей, значения δ_V . Так как нестабильность скорости в АТ превышает $1/3$ основной погрешности измерения скорости, то погреш-

ность от нестабильности следует учитывать при оценке погрешности измерения скорости, т. е. выражение (12) перепишется в виде

$$\delta_V = \sqrt{\delta_{K_c}^2 + \frac{1}{4} \delta_{\Delta P}^2 + \delta_{\text{нест.}}^2} \quad (1)$$

Результаты расчета погрешности измерения скорости потока в АТ δ_V по формуле (12) и с учетом нестабильности по формуле (13) в диапазоне скоростей 5—40 м/с приведены в табл. 6.

Таблица

V	БП ЭПМ		Сафоновский завод ГМП	
	$\delta_V \%$	$\delta'_V \%$	$\delta_V \%$	$\delta'_V \%$
5	2,6	4,3	2,4	4,0
10	1,4	—	1,5	2,8
15	1,6	1,9	1,4	—
20	1,5	—	1,4	2,2
25	1,4	1,8	1,4	—
30	1,5	—	1,4	—
35	1,4	1,5	1,4	—
40	1,4	—	1,4	1,4

Примечание. Здесь δ'_V вычислены с учетом нестабильности скорости потока в АТ.

Результаты аттестации АТ на Сафоновском заводе ГМП и в БП ЭПМ показали, что полученные при этом значения параметров труб в основном соответствуют требованиям РТМ и позволяют осуществлять поверку и градуировку в них средств измерений скорости ветра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Образцовые средства измерения скорости воздушного потока, их исследование и аттестация/Н. П. Фатеев, Б. Л. Сушинский, В. А. Кузьмин, Д. Я. Блантер. — Труды ГГО, 1977, вып. 392, с. 3—15.
2. Фатеев Н. П. Поверочные схемы для метеорологических измерений. — Труды ГГО, 1973, вып. 313, с. 145—155.

Г. П. Резников, И. А. Соков

МЕТРОЛОГИЧЕСКАЯ АТТЕСТАЦИЯ ТЕРМОГИГРОСТАТА «БРИЗ»

Метрологическое обеспечение измерений влажности приземного слоя воздуха является уже в течение нескольких лет предметом научно-исследовательской и методической работы, проводимой ГГО. Состояние этого вопроса было таково, что потребовалось систематическое изучение его, включая обоснование выбора измеряемой величины [1], физико-метрологический анализ принципа воспроизведения размера единицы выбранной величины [2, 7, 8], экспериментальные исследования аппаратуры, реализующей этот принцип, [4, 5] и систему передачи воспроизводимого размера единицы рабочим средствам измерения влажности приземного слоя атмосферы, отображенную в виде проекта поверочной схемы [9]. Образцовые средства этой поверочной схемы разрабатываются и исследуются в ГГО. В соответствии с правилами внедрения поверочных схем образцовые средства измерения после их лабораторных метрологических исследований и межведомственных испытаний подвергаются государственным испытаниям [3] или метрологической аттестации [6]. Ввиду актуальности метрологического обеспечения в области измерения влажности приземного слоя воздуха эти работы были включены в единый координационный план Госстандарта, Минприбора и Госкомгидромета метрологического обеспечения средств измерения гидрометеорологического назначения. В процессе выполнения названного плана указанные метрологические мероприятия по отношению образцовых средств низшего разряда были выполнены к 1977 г.

Распоряжением Госстандарта Государственная комиссия из представителей Госстандарта, Минприбора и Госкомгидромета в апреле 1978 г. провела работы по метрологической аттестации термогигростата «Бриз», разработанного и изготовленного в результате выполнения НИР ГГО в 1974—1976 гг.

«Бриз» обеспечивает получение паровоздушной атмосферы в его рабочей камере с заданными значениями температуры и влажности и предназначен к применению в качестве образцового средства измерений влажности воздуха при исследовании.

градуировке и поверке различных измерителей влажности воздуха.

Как и все образцовые средства проекта поверочной схемы для средств измерения влажности приземного слоя воздуха, «Бриз» основан на принципе термодинамического равновесия конденсированной и неконденсированной фаз воды. Однако в отличие от термогигростата II разряда в этой поверочной схеме «Бриз» имеет принципиальные и конструктивные особенности [10], обеспечивающие расширение диапазона и достижение точности воспроизведения параметров влажного воздуха, приближающейся к теоретической [7], что и было доказано экспериментально [4]. В связи с этим «Бриз» и является той реализацией термогигростата, которая в совокупности с конденсационным гигрометром должна образовать комплекс [7, 9] для воспроизведения размера единиц влагосостояния воздуха, т. е. исходное образцовое средство измерения в поверочной схеме.

Действие термогигростата «Бриз»¹ основано на явлении насыщения водяным паром воздуха, циркулирующего над поверхностью воды или льда. Мерой влажности получающейся паровоздушной смеси служит точка росы, которая, как показано расчетным и экспериментальным путями, равна температуре в зоне термодинамического равновесия конденсированной и неконденсированной фаз воды (в зоне насыщения). Циркуляция воздуха, создаваемая турбинкой, происходит в замкнутой системе между устройством для насыщения его водяным паром (сатуратором) и рабочей камерой (гигрокамерой).

Если общее давление в гигрокамере равно общему давлению в зоне насыщения, то точка росы в гигрокамере равна точке росы в зоне насыщения, а следовательно, измеренной температуре этой зоны. (При существенном различии общих давлений парциальное давление в камере E_k в зависимости от парциального давления E_c в сатураторе

$$E_k = E_c \frac{p_k}{p_c},$$

где p_k и p_c — значения общего давления в гигрокамере и сатураторе соответственно.)

По измеренной температуре, обращаясь к таблицам давления насыщающего водяного пара, можно найти парциальное давление водяного пара паровоздушной смеси в гигрокамере. По известным зависимостям и найденному парциальному давлению можно найти значения других параметров влажности.

Для задания необходимого значения относительной влажности φ (в процентах) в гигрокамере при температуре t_k в сатураторе задается и поддерживается температура t_c , входящая в формулу

$$\varphi = \frac{E_c(t_c)}{E_k(t_k)} \cdot 100.$$

¹ Наименование «Бриз», данное термогигростату, обязано некоторому сходству процессов в нем с бризовой циркуляцией в атмосфере.

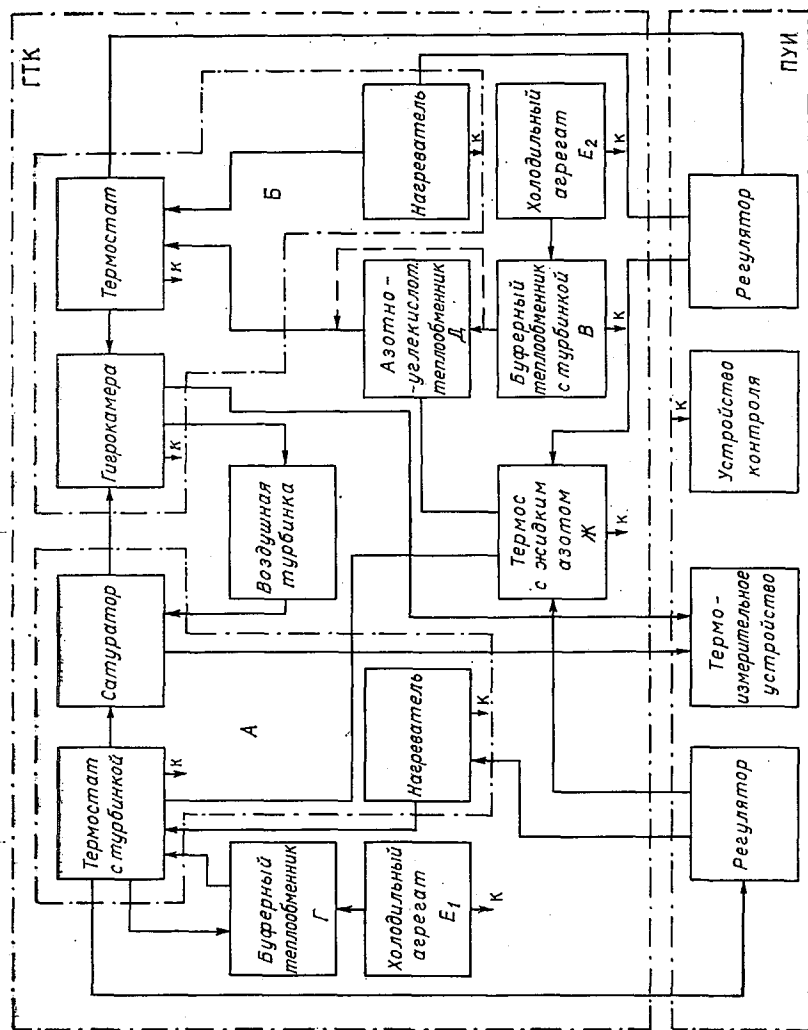


Рис. 1. Структурная схема термогенератора «Бриз».

Таким образом, воспроизведение относительной влажности осуществляется методом «двух температур».

Структурная схема термогигростата «Бриз» представлена на рис. 1.

В соответствии с принципом действия он содержит устройство для насыщения воздуха (сатуратор), гигрокамеру, воздушную турбинку, устройство термостатирования сатуратора и гигрокамеры, устройство для измерения температуры в гигрокамере и в сатураторе, устройства для контроля и управления. ТГС «Бриз» собран из отдельных модулей, предложенных при его разработке.

Сатуратор (рис. 2) помещен в жидкостный термостат с турбинкой, внутри этого термостата размещен электронагреватель. Все перечисленные элементы образуют модуль А. Аналогично, гигрокамера, помещенная в другой жидкостный термостат с электронагревателем, образует модуль Б.

Размещение сатуратора и гигрокамеры в жидкостных термостатах позволяет достичь необходимого в данном случае высокого качества термостатирования.

Получение и поддержание значений температуры сатуратора и гигрокамеры ниже комнатных производится с помощью охлаждающих устройств, образованных помимо термостата с турбинкой ос-

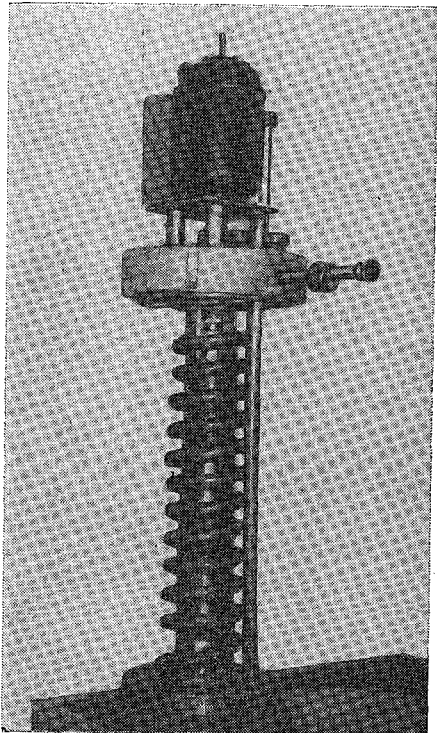


Рис. 2. Сатуратор термогигростата.

тальными модулями, указанными на рис. 1.

В ТГС «Бриз» предусмотрено охлаждение различными способами: с помощью холодильных агрегатов (до -5°C); твердой и жидкой углекислоты (до -30°C); жидкого азота (до -40°C). Система с универсальным охлаждением создает большую гибкость в обеспечении режимов работы, исключает перебои в работе из-за перерывов в снабжении хладагентами, а также придает автономность (благодаря применению холодильных агрегатов).

В термостате (сатураторе) с турбинкой имеется полость для помещения твердой углекислоты и испаритель в виде змеевика, в который подается жидкий азот из термоса (сосуда Дьюара)

с устройством управления подачи (модуль Ж). Охлаждение жидкости термостата сатуратора с помощью холодильного агрегата (модуль E_1) производится через буферный теплообменник (модуль Г), в котором находится испаритель холодильного агрегата. Циркуляция жидкости между буферным теплообменником и термостатом создается турбинкой.

Охлаждение жидкости термостата гигрокамеры производится в результате поступления охлажденной жидкости из азотно-углекислотного теплообменника (модуль Д) или буферного тепло-

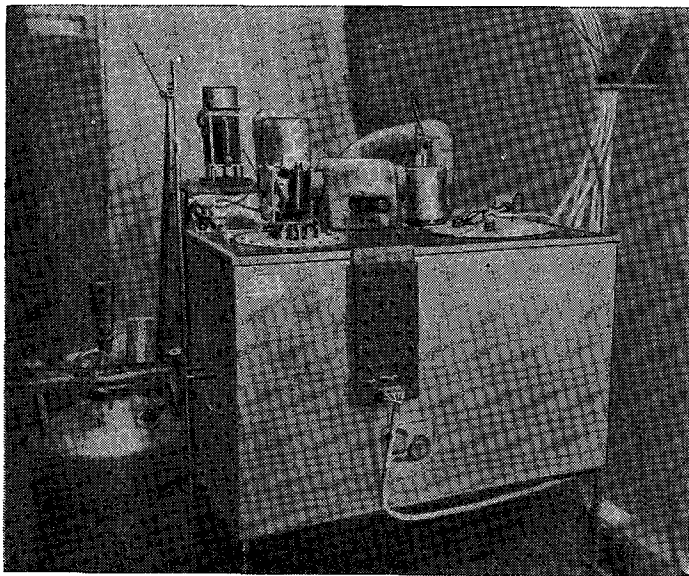


Рис. 3. Термогигрокамера (ТГК) термогигростата «Бриз».

обменника В с турбинкой, в котором находится испаритель холодильного агрегата (модуль E_2). Модуль В, Д и термостат блока В соединены последовательно и образуют замкнутую жидкостную систему циркуляции, создаваемую турбинкой модуля В. Источниками тепла в термостатах модулей А и В являются электрические нагреватели.

Описанная часть ТГС образует термогигрокамеру (ТГК) (рис. 3). Задание требуемой температуры, автоматическое поддержание ее на заданном уровне, а также управление подачей жидкого азота из термоса производится регуляторами. Дистанционный контроль за состоянием отдельных элементов ТГК, их режимов (наличие напряжения, исправность, соответствие заданным параметрам) осуществляется устройством контроля (связи на

схеме показаны стрелками «к»). Точное измерение температуры воздуха в гигрокамере и в зоне насыщения сатуратора осуществляется термоизмерительным устройством, состоящим из микро термисторов типа МТ-54М и мостовой схемы измерения сопротивления.

Перечисленные устройства образуют вторую часть ТГС — пульт управления и измерения (ПУИ), изображенную на фотографии (рис. 4).

На основании длительных лабораторных исследований были найдены численные значения метрологических и эксплуатационно

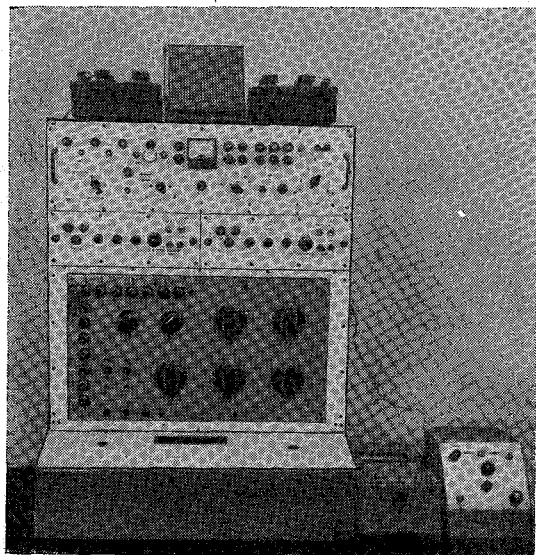


Рис. 4. Пульт управления и измерения (ПУИ) термогигростата «Бриз».

технических параметров ТГС «Бриз», которые внесены в документацию, предъявленную комиссии. Ниже указываются основные из них:

- диапазон задания и измерения точки росы паровоздушной смеси $-40 \dots +30^\circ\text{C}$;
- диапазон задания относительной влажности в гигрокамере 10—100 % при температуре в ней от -15 до $+30^\circ\text{C}$;
- предел допускаемой погрешности воспроизведения точки росы в гигрокамере составляет $0,15^\circ\text{C}$ при разности давления в сатураторе и гигрокамере не более 10^3 Па (100 мм вод. ст.).
- предел допускаемой погрешности измерения температуры в гигрокамере и в сатураторе $0,07^\circ\text{C}$ при амплитуде колебания

в них не более $0,1^{\circ}\text{C}$ и пределе допускаемой погрешности градуировки термисторов $0,04^{\circ}\text{C}$;

— предел допускаемой погрешности воспроизведения значений относительной влажности воздуха в гигрокамере составляет 2 % от воспроизводимого значения при неравномерности температурного поля в ней не более $0,15^{\circ}\text{C}$;

— время выхода на заданные значения температуры в гигрокамере и в сатураторе при охлаждении углекислотой и жидким азотом не превышает 3 ч, а при использовании холодильных агрегатов 4 ч;

— питание «Бриз» производится от сети переменного тока напряжением 220 В и частотой 50 Гц;

— мощность, потребляемая от сети переменного тока при работе с включенными холодильными агрегатами, 800 В·А;

— полезный объем гигрокамеры 10 л (габариты 355×290 мм);

— габаритные размеры ТГК — $1380 \times 1550 \times 1400$ мм; ПУИ — $850 \times 400 \times 650$ мм;

— масса: ТГК — не более 280 кг. ПУИ — не более 50 кг;

— время необходимое для получения и обработки информации о задаваемой влажности и температуре — не более 3 мин.

Проверка основных метрологических параметров термогигростата «Бриз» составила основу утвержденной программы метрологической аттестации. Методика испытаний базировалась на ранее выполненном анализе [7] и эксперименте [4, 5].

Несмотря на то что комиссией принимались во внимание результаты предшествующих метрологических исследований, был выполнен большой объем экспериментальных работ, предусмотренных программой аттестации: проводилась поэлементная оценка и прямое определение погрешности воспроизведения параметров влажности сравнением с образцовыми гигрометрами.

В качестве образцовых гигрометров использовались прошедшие метрологическую аттестацию Госстандарта конденсационный гигрометр (точки росы) ГГО М-116 [5] и пьезосорбционный цифровой гигрометр ВНИИМ «Кварц» [10].

Первичные измерительные преобразователи названных приборов размещались непосредственно в гигрокамере и через штепсельные разъемы в крышке камеры соединялись с измерительными пультами. Для определения неравномерности температурного поля в полезном объеме гигрокамеры устанавливались спаянная медь-константановой термопары, выводы от которой через сальник в крышке гигрокамеры соединялись с гальванометром.

Предварительно перед началом аттестации были выполнены измерения перепада давления между сатуратором и гигрокамерой, а также герметичность воздушной системы. В обоих случаях использовался водяной U-образный дифференциальный манометр.

При измерении перепада манометр соединялся одним концом с патрубком сатуратора, а другим — со штуцером в крышке гигрокамеры. При напряжении на двигателе воздушной турбинки 120 В (соответствующем скорости движения воздуха в змеевиках

сатуратора и гигрокамеры 5 м/с) производились отсчеты по микроманометру. Измеренный перепад составил 600 Па (6 мбар).

Оценка степени герметичности воздушной системы ТГС производилась по скорости уменьшения избыточного давления. В этом случае один конец дифференциального микроманометра соединялся по-прежнему со штуцером гигрокамеры, а второй — с атмосферой. Избыточное давление в воздушной системе термостата создавалось с помощью ручного насоса, подсоединяемого к специальному штуцеру с вентилем, установленному в крышке гигрокамеры. Избыточное давление в 10^3 Па (~ 100 мм вод. ст.) уменьшалось до нуля за 80 с, что не превышало допуска.

В связи с тем, что время выхода на заданный установившийся режим складывается из времени выхода на установившийся термический режим и времени установления гигростатического равновесия [3], последний параметр определялся в процессе выхода на установившийся режим перед началом метрологических сравнений. Для этого, начиная с момента установления заданной температуры в сатураторе и гигрокамере с интервалом 5 мин производились отсчеты по конденсационному гигрометру М-116 или пьезосорбционному «Кварц». Использование указанных приборов для этой цели оправдано с метрологической точки зрения, поскольку время установления их показаний в 10—15 раз меньше времени выхода ТГС на установившийся гигротермический режим. В результате экспериментально проверено, что время выхода на установившийся гигрометрический режим практически не зависит от задаваемой относительной влажности и не превышает 25 мин при положительных значениях температуры сатуратора и 40 мин при отрицательных.

С выходом ТГС на установившийся гигротермический режим производились через равные интервалы времени в течение часа одновременные измерения температуры в сатураторе и отсчеты по гигрометрам и измерение температуры в гигрокамере. Таким образом, при различных значениях температуры и относительной влажности в гигрокамере получались серии по 10 измерений в каждой. Получение каждой серии метрологических сравнений сопровождалось измерением с помощью термопар разности температур в точках гигрокамеры, где располагались термостаты термопары.

Результаты оценки точностных характеристик ТГС «Бриз» по исходным экспериментальным данным, содержащимся в протоколах аттестации, представлены в сводной табл. 1.

Приведенные в ней взаимозависимые точностные параметры результатов измерений и термостата «Бриз» получены следующим образом. Наблюдаемое в каждой из серии измерений максимальное отклонение от среднего арифметического

$$|\delta_{i_k}| = \max \left| t_{i_k} - \frac{\sum_{i=1}^{10} t_{i_k}}{10} \right|,$$

где t_{i_k} — измеренное i -е значение температуры в гигрокамере;

$$|\delta t_c| = \max \left| t_{ic} - \frac{\sum_{i=1}^{10} t_{ic}}{10} \right|,$$

где t_{ic} — измеренное i -е значение температуры в сатураторе;
 $|\delta t_c| = \max |\rho t_{ik}|$, где $|\rho t_{ik}|$ — измеренная i -я разность температур
 между двумя точками гигрокамеры.

Среднее арифметическое разностей между измеренной температу-
 рой сатуратора t_{ic} и точкой τ_{ir} росы, измеренной гигрометром

$$\bar{\Delta}_{\tau, r} = \frac{\sum_{i=1}^{10} (t_{ic} - \tau_{ir})}{10}.$$

Среднее квадратическое отклонение разностей от средней
 арифметической разности в серии

$$\sigma_{\tau, r} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} [(t_{ic} - \tau_{ir}) - \bar{\Delta}_{\tau, r}]^2}{9}}.$$

Систематическая погрешность термогигростата «Бриз» при вос-
 произведении точки росы в гигрокамере $\Delta\tau$ (°C) получается как
 половина $\bar{\Delta}_{\tau, r}$. Это обусловлено тем, что в результате физико-

Таблица 1

Точностный параметр	Средняя температура в гигрокамере $\bar{t}_k$ °C					
	+28,43	+7,27	+5,33	+4,30	-15,02	-15,25
$ \delta t_k $ °C	0,08	0,03	0,03	0,08	0,05	0,04
$ \delta t_c $ °C	0,04	0,05	0,08	0,07	0,08	0,06
$ \rho t_k $ °C	0,13	—	0,10	0,06	0,13	0,06
$\bar{\Delta}_{\tau, r}$ °C	+0,18	+0,06	+0,07	+0,02	+0,03	+0,05
$\sigma_{\tau, r}$ °C	0,04	0,04	0,06	0,06	0,02	0,05
$\bar{\Delta}\tau$ °C	+0,09	+0,03	+0,04	+0,01	+0,02	+0,03
σ_τ °C	0,02	0,02	0,04	0,04	0,01	0,04
z_τ °C	0,05	0,05	0,10	0,10	0,02	0,10
$\Delta p \tau$ °C	0,15	0,08	0,14	0,11	0,04	0,13
$\gamma_{пф}$ %	0,8	0,5	0,9	0,8	0,3	1,1
$\gamma_{пф}''$ %	0,4	0,4	0,5	0,5	0,6	0,6
$\gamma_{пф}'''$ %	0,3	0,6	1,0	1,0	0,7	1,3
$\gamma_{пф}^{(4)}$ %	0,7	1,0	0,7	0,5	1,0	0,5
$\gamma_{пф}^{(5)}$ %	1,2	1,2	1,2	1,1	1,2	1,4

Примечание. Все обозначения без индексов, содержащих буквы с, к
 т; относятся к камере термогигростата „Бриз“.

метрологического анализа источников погрешности ТГС и ГТ [7] получено, что их систематические погрешности должны быть одинаковы (или у ГТР больше), а по знаку разные, так как ГТ имеет тенденцию к завышению, а ГТР — к занижению результатов измерения. Оценка среднего квадратического отклонения σ_{τ} воспроизводимого ТГС «Бриз» значения точки росы получена из $\sigma_{\tau, \text{г}}$ ($\sigma_{\tau} = \sigma_{\tau, \text{г}}/\sqrt{2}$) на основании предположения о самом неблагоприятном для оценки точностной характеристики ТГС соотношении дисперсий $\tau_{\text{г}}$ гигрометра и $t_{\text{с}}$ сатуратора ($\sigma_{t_{\text{с}}} = \sigma_{\tau_{\text{г}}}$), тогда как в анализе и экспериментальных данных $\sigma_{t_{\text{с}}} < \sigma_{\tau_{\text{г}}}$. Проведенным ранее метрологическими исследованиями установлено практически полное отсутствие статистической связи между частными случайными отклонениями при измерении $t_{\text{с}}$ и $\tau_{\text{г}}$. Поэтому коэффициент корреляции $K_{\text{с, г}} = 0$ в формуле $\sigma_{\tau, \text{г}} = \sqrt{\sigma_{\tau_{\text{г}}}^2 + 2K_{\text{с, г}}\sigma_{\tau_{\text{г}}}\sigma_{t_{\text{с}}} + \sigma_{t_{\text{с}}}^2}$ откуда $\sigma_{\tau, \text{г}} = \sqrt{\sigma_{\tau_{\text{г}}}^2 + \sigma_{t_{\text{с}}}^2}$, а учитывая, что $\sigma_{\tau_{\text{г}}} = \sigma_{t_{\text{с}}}$, $\sigma_{\tau, \text{г}} = \sqrt{2\sigma_{t_{\text{с}}}^2} = \sqrt{2\sigma_{\tau}^2} = \sqrt{2}\sigma_{\tau}$. Согласно распределения Стьюдента для числа измерений в серии $n=10$ и доверительной вероятности $P=0,9$ коэффициент доверительного интервала $v=2,26$, следовательно границы доверительного интервала значений точки росы при воспроизведении этой величины в ТГС «Бриз» $z_{\tau} = v\sigma_{\tau}$; предел допускаемой погрешности воспроизведения точки росы в ТГС «Бриз» $\Delta_{\pi_{\tau}} = \Delta_{\tau} + z_{\tau}$; соответствующая этому пределу составляющая предела относительной погрешности воспроизведения относительной влажности $\gamma'_{\varphi} = \frac{L}{k} \cdot \frac{\Delta_{\pi_{\tau}}}{T^2}$ [7] и может быть получена из табл.

в [7].

Составляющая предела допускаемой относительной погрешности воспроизведения относительной влажности в гигрокамере ТГС «Бриз» вследствие погрешности измерения температуры в гигрокамере (предел допускаемой погрешности $0,07^{\circ}\text{C}$) γ'_{φ} оценивается аналогично. Предел допускаемой относительной погрешности воспроизведения относительной влажности в какой-либо точке гигрокамеры ТГС «Бриз» $\gamma_{\varphi} = \sqrt{(\gamma'_{\varphi})^2 + (\gamma''_{\varphi})^2}$. Относительная погрешность γ'''_{φ} воспроизведения относительной влажности в гигрокамере, вызванная неравномерностью $|\rho_{t\text{г}}|$ температурного поля в ней, оценивается так же, как $\gamma'_{\pi\varphi}$ и $\gamma'''_{\pi\varphi}$.

В итоге предел допускаемой относительной погрешности воспроизведения относительной влажности в любой точке полезного объема гигрокамеры составляет

$$\gamma_{\pi\varphi} = \sqrt{(\tilde{\gamma}_{\pi\varphi})^2 + (\gamma'''_{\pi\varphi})^2}.$$

Как видно из табл. 1, экспериментально полученные в процессе метрологической аттестации ТГС «Бриз» количественные оценки точностных параметров нигде не выходят за допускаемые

ределы, указанные в эксплуатационно-технической документации. В частности полученная суммарная относительная погрешность воспроизведения относительной влажности $\gamma_{п\varphi}$ (последняя строка табл. 1) согласуется с прямой экспериментальной оценкой этой погрешности, полученной с помощью гигрометра «Кварц». Наибольшее значение разности между воспроизводимой в ТГС относительной влажностью и результатом измерения гигрометром «Кварц» по всему множеству результатов измерений составило $\varphi = +0,8\%$ при $\varphi = 45\%$. Следовательно, наибольшее значение относительной погрешности воспроизведения относительной влажности составило $\gamma_{\varphi} = \frac{\Delta\varphi}{\varphi} = \frac{0,8}{45} \times 100\% = 1,8\%$. Таким образом, обе независимые экспериментальные оценки относительной погрешности воспроизведения относительной влажности в ТГС «Бриз» подтверждает, что предел допускаемой относительной погрешности воспроизведения относительной влажности составляет 2 %.

Комиссией был дан ряд рекомендаций, касающихся внешнего вида и удобства эксплуатации термогигростата. К настоящему моменту эти рекомендации полностью выполнены.

Как указано в Акте о метрологической аттестации, «...комиссия установила, что по основным метрологическим характеристикам (диапазоны и погрешности получаемых параметров влажности воздуха) ТГС «Бриз» соответствует предъявляемым к нему требованиям и требованиям рекомендаций СЭВ РС 3118-71» и рекомендовала установить межповерочный интервал для ТГС «Бриз» 1 г.

Рекомендовано также провести работу в специализированной организации Минприбора с целью серийного изготовления термогигростатов на основе «Бриз».

Метрологическая аттестация ТГС «Бриз» является важным шагом на пути реализации локальной поверочной схемы Госкомгидромета для средств измерений влажности воздуха.

Выполнение насыщенной программы метрологической аттестации в короткий срок оказалось возможным также благодаря активной работе членов комиссии Е. А. Гершкович (НПО НИИМ) и В. Т. Сополькова (СКБ ГМП).

Метрологической аттестации предшествовала большая подготовительная работа, в которой на разных этапах принимали участие сотрудники отдела метрологии ГГО: Б. В. Куров, Т. А. Буаченко, А. Ю. Рябов, Т. П. Доманькова, В. В. Чистобородов.

Этой работе и организации метрологической аттестации содействовал Н. П. Фатеев, ответственный исполнитель от ГГО единого межведомственного координационного плана метрологического обеспечения Госкомгидромета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беспалов Д. П., Школяр Л. Ф. Характеристики влажности воздуха и оценка погрешности их определения.— Труды ГГО, 1974, вып. 34, с. 31—63.
2. Гершкович С. Н. Создание образцового частотно-цифрового гигрометра. Изм. техника, 1975, № 10, с. 85—87.
3. ГОСТ 8.001—71. Организация и порядок проведения государственных испытаний средств измерений. М.: Изд-во стандартов, 1976.
4. Леонова Л. И., Резников Г. П., Рогалев Ю. В. Статистическая оценка погрешностей образцовых средств измерения влажности воздуха, входящих в состав поверочной схемы Гидрометслужбы.— Труды ГГО, 1975, вып. 34, с. 77—83.
5. Методика и результаты метрологических сравнений гигрометра точности 0,01 и генератора паровоздушных смесей («стенда вымораживания»)/Резников Г. П., Колышев Н. Д., Качакишвили Л. Д., Куров Б. В.— Труды ГГО, 1977, вып. 392, с. 36—46.
6. МУ 8.7—77. Методические указания по проведению метрологических аттестаций средств измерений.— М.: Изд-во стандартов, 1976.
7. Резников Г. П. Анализ физических процессов и погрешностей гигрометрического комплекса, основанного на термодинамическом принципе.— Труды ГГО, 1973, вып. 300, с. 15—39.
8. Резников Г. П. Физические и метрологические обоснования систем обеспечения единства измерений влажности воздуха в метеорологии.— Тезисы докладов на Пятой Всесоюзной научно-технической конференции по измерению влажности. Кутаиси, 1973.
9. Резников Г. П., Фатеев Н. П. Воспроизведение и передача размера единицы влажности воздуха при метеорологических измерениях.— Труды ГГО, 1974, вып. 340, с. 57—75.
10. Резников Г. П., Фатеев Н. П. Термогигростаты для системы обеспечения единства измерений влажности воздуха и температуры.— Труды ГГО, 1975, вып. 345, с. 67—76.

*Н. Н. Климан, Г. П. Резников, Б. И. Толстухин,
Н. П. Фатеев, Л. А. Ядова*

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДИКИ ГРАДУИРОВКИ И ПОВЕРКИ ПНЕВМОАНЕМОМЕТРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ АСПИРАЦИИ ПСИХРОМЕТРОВ

Погрешность аспирационных психрометров зависит от многих причин. Важнейшей из них является отклонение скорости аспирации от номинальной (2 м/с), которой соответствует психрометрический коэффициент $662 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$, принятый при расчетах психрометрических таблиц. Зависимость психрометрического коэффициента, а, следовательно, и погрешности аспирационных психрометров от скорости аспирации выявлена экспериментально в [5]. Из полученных там результатов следует, что погрешности измерения скорости аспирации и допускаемым отклонениям ее от номинального значения следует уделять большое внимание. Применяемое в настоящее время средство измерения скорости аспирации в психрометрах именуется установкой ПО-30.

Установка ПО-30 предназначена для измерения скорости воздушного потока в диапазоне (0,5—5,0) м/с в узких каналах, главным образом, для измерения скорости аспирации в аспирационных психрометрах.

Измерение скорости потока этой установкой основано на однозначной связи между скоростью, с одной стороны, создающимся разрежением и аэродинамическим сопротивлением в канале, с другой стороны, иначе говоря

$$V = f(P, R), \quad (1)$$

где V — скорость потока, $P = p_{\text{изм}} - p_a$ — разрежение, т. е. разность между давлением в точке измерения $p_{\text{изм}}$ и атмосферным давлением p_a , R_a — аэродинамическое сопротивление.

В соответствии с этим принципом установка содержит 3 элемента: микрозонды из капиллярной трубки, микроанометр и гибкие соединительные шланги для соединения микрозондов с микроанометром.

Здесь следует отметить, что используемое до настоящего момента принятое название «установка» неправомерно, поскольку и состав, и назначение рассматриваемого средства измерения отвечают содержанию этого понятия, принятому в стандарте [1]. Поскольку данное средство измерения предназначено для измерения скорости воздушного потока, то оно является анемометром. В соответствии с правилами образования названий анемометров первой частью термина служит наименование физического принципа или метода, положенного в основу его принципа действия (например, термоанемометр). На этом основании ПО-30 в статье (а впредь в нормативно-технической документации) называется пневмоанемометром. Оснований для изменения индекса ПО-30 нет, поскольку данный пневмоанемометр следует относить к поверочному оборудованию (для которого и введено обозначение ПО). Таким образом, окончательное название: «Пневмоанемометр ПО-30 для поверки аспирационных психрометров».

При существующей методике поверки ПО-30 связь между P отождествляется с разрежением, возникающим при установке трубки Пито вниз по потоку (т. е. когда динамическое отверстие находится в аэродинамической тени). В этом случае в уравнение связи между P и V входит аэродинамический коэффициент насадки (микрозонда), который определяется опытным путем с применением образцовой трубки Пито. Микроанометр же, входящий в комплект установки, подвергается градуировке или поверке с помощью гидростатических весов. К очевидной трудоемкости такой методики поверки прибавляется еще и недостаточная метрологическая обеспеченность как средств измерений скорости потока в диапазоне 0—5 м/с, так и гидростатических весов.

Возникает необходимость в замене существующей методики более совершенной в отношении трудоемкости и в особенности в отношении метрологической обеспеченности.

В поисках такой методики следует обратить внимание на два обстоятельства: 1) между средней по сечению скоростью потока в канале, сечением канала и расходом (объемной скоростью) существует однозначная связь

$$V = \frac{v}{S} = \frac{Q}{t \cdot S}, \quad (2)$$

где v — расход, S — сечение канала, Q — количество газа, прошедшее через сечение S за время t ; 2) измерение расхода может быть осуществлено серийно выпускаемыми ротаметрами или косвенным методом с помощью серийно выпускаемых газовых счетчиков и секундомеров. Все названные средства измерения метрологически обеспечены.

Имея систему уравнений (1) и (2), в которой P , v и S определяются инструментально, можно определить параметры уравнения $V=f(P)$ для неизвестного, но вполне определенного и неизменного значения R . Последнее условие означает, что параметры зависимости $V=f(P)$ принимают конкретные значения для канала

нкретного вида (обладающего конкретным R_a). Применительно ПО-30, используемого для поверки аспирационных психрометров, это условие еще более уточняется и означает, что схема градуировки и поверки этой установки должна включать в себя эквивалент аспирационного психрометра. Лучшим эквивалентом R_a аспирационного психрометра является сам психрометр, вернее, сть его без аспиратора. Значение R_a мало изменяется от одного экземпляра психрометра к другому, что объясняется слабой зависимостью между R_a и отклонениями формы, свойств внутренней поверхности и геометрических размеров каналов аспирации отдельных экземпляров психрометров. К тому же допуски невелики и выдерживаются хорошо. Вследствие этого в качестве эквивалента R_a может быть взят любой экземпляр из производственной партии психрометров. Определение номинальной статической градуировочной характеристики ПО-30 как измерителя скорости потока в канале с аэродинамическим сопротивлением R_a сводится, таким образом, к установлению экспериментальным путем соответствия значений P по микроанометру пневмоанометра ПО-30 значениям скорости, полученной по формуле (2), т. е.

$$P = f(V) = f\left(\frac{v}{S}\right) = f\left(\frac{Q}{t \cdot S}\right), \quad (3)$$

где $Q = v \cdot t$ — суммарный объем воздуха, прошедший по каналу психрометра за время t и зарегистрированный газовым счетчиком.

Сечение S складывается из поперечных сечений зазоров, образованных резервуарами термометров и цилиндрическими экранами внутренней и внешней радиационной защиты (рис. 1), за вычетом сечения зондов пневмоанометра ПО-30, т. е.

$$S = S_{\text{сух}} + S_{\text{бат}} - 2S_3, \quad (4)$$

где $S_{\text{сух}}$ — площадь сечения канала сухого термометра; $S_{\text{бат}}$ — площадь сечения канала смоченного термометра, обернутого баистом; S_3 — площадь поперечного сечения зонда ПО-30.

Погрешность задания скорости V , согласно формуле (2), определяется погрешностью измерения Q , t и S .

В худшем случае относительная погрешность $\delta_r V$ задания скорости V (представляющая собой погрешность градуировки)

$$\delta_r V = \frac{\Delta V}{V} = \left| \frac{\Delta Q}{Q} \right| + \left| \frac{\Delta t}{t} \right| + \left| \frac{\Delta S}{S} \right| = \delta Q + \delta t + \delta S. \quad (5)$$

Исходя из выявленных при анализе погрешностей аспирационного психрометра требований к точности задания и измерения скорости аспирации ($\pm 0,1$ м/с) и принимая во внимание номинальное значение этой скорости (2 м/с), получим, что предел допускаемой относительной погрешности, выраженной в процентах,

$\delta V_{\text{по}} = \frac{0,1 \cdot 100}{2} = 5$. Эта погрешность включает в себя погрешность $\delta_r V$ градуировки (или поверки) ПО-30 и погрешность $\delta_{\text{из}} V$ измере-

ния скорости с помощью ПО-30 (зависящую от случайных факторов и нестабильности элементов ПО-30 во времени), $\delta V_{\text{ПО}}$, следовательно, необходимо распределить между этими двумя составляющими

$$\delta V_{\text{ПО}} = \sqrt{(\delta_r V)^2 + (\delta_n V)^2}. \quad (6)$$

Если принять погрешность $\delta_n V = 4,5 \%$, а $\delta_r V = 2,5 \%$, то пользуясь последней формулой (6), можно убедиться, что суммарная погрешность $\delta V_{\text{ПО}}$ не превышает указанных 5 %. При этом, соотношение между погрешностями поверяемого и образцового среднего измерения равно двум $\left(\frac{\delta V_{\text{ПО}}}{\delta_r V} = \frac{5,0}{2,5} = 2,0\right)$.

Рассмотрим распределение погрешности $\delta_r V$ между ее составляющими. Относительная погрешность определения площади сечения канала прямо пропорциональна погрешности определения линейных размеров (радиуса r или диаметра $2r$)

$$\delta S = 2 \frac{\Delta r}{r} = 2 \delta r. \quad (7)$$

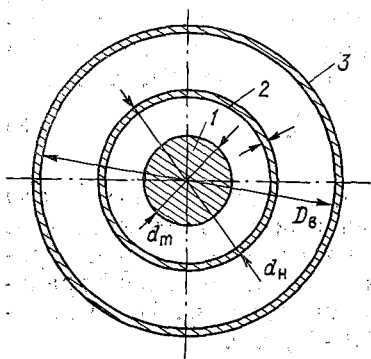


Рис. 1. Сечение одного из аспируемых каналов психрометра.

Измерение диаметра порядка 5 мм может быть выполнено штангенциркулем или микрометром с абсолютной погрешностью, не превышающей 0,02 мм. Следовательно, относительная погрешность определения площади соответствующего сечения, выраженная в процентах, превысит значения $\delta S = 2 \cdot \frac{0,02}{5} \times 100 = 0,8$.

Относительная погрешность измерения временного промежутка с помощью секундомера уменьшается с увеличением этого промежутка, так как абсолютная погрешность его измерения остается постоянной и зависит лишь от синхронности выполнения отсчетов по газовому счетчику и включения и выключения секундомера, т. е. $\Delta t \leq 0,2$ с. Для того, чтобы δt сделать пренебрежимо малой, можно принять t порядка 100 с тогда $\delta t = \frac{0,2}{100} \cdot 100 = 0,2$.

Относительная погрешность измерения суммарного расхода определяется классом газового счетчика. Широко допускаемые и метрологически обеспеченные серийные счетчики имеют класс 2,5.

Считая погрешности δQ , δS и δt независимыми, получим, что суммарная погрешность

$$\delta V = \sqrt{\delta^2 Q + \delta^2 S + \delta^2 t} = \sqrt{(2,5)^2 + (0,8)^2 + (0,2)^2} = 2,6. \quad (8)$$

Отсюда видно, что при использовании оценок $\delta S_{\text{и}}$ и δt погрешность задания скорости практически полностью определяется классом газового счетчика (наибольший допускаемый в данном случае класс 2,5).

В мае 1976 г. было выполнено несколько серий метрологических сравнений градуировочной характеристики пневмоанемометра ПО-30, полученной существующим способом, со значениями скоростей потока, задаваемых рассмотренным методом.

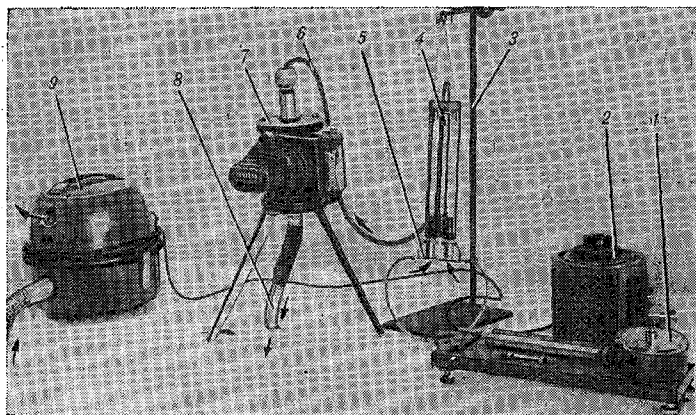


Рис. 2. Внешний вид установки для поверки пневмоанемометра.

1 — микроманометр установки ПО-30; 2 — регулятор напряжения (ЛАТР) на побудителе расхода; 3 — штатив; 4 — измерительная часть психрометра аспирационного (аспиратор снят); 5 — микронасадки с соединительными шлангами от ПО-30; 6 — шланг, соединяющий аспирационный канал психрометра с всасывающим патрубком газового счетчика; 7 — газовый счетчик; 8 — шланг, соединяющий выход газового счетчика с побудителем расхода; 9 — побудитель расхода (пылесос).

Схема соединений измерительных приборов и вспомогательных устройств показана на рис. 2. Стрелками указано направление воздушного потока.

В качестве газового счетчика класса точности 2,5 использовался счетчик типа РГ 40-1 (ГОСТ 8700—65), изготовленный в 1973 г.; для измерения временных промежутков применялся секундомер Златоустовского часового завода (№ 3357).

Задание необходимых значений скорости потока производилось подачей определенного напряжения на побудитель расхода лабораторного автотрансформатора, включенного непосредственно в электросеть.

Колебания напряжения в электросети находились при экспериментах в допустимых пределах ($-15 \dots +10 \%$ от номинального значения 220 В). Температура в помещении составляла $+18$ —

+20 °С, давление 763—765 мм рт. ст. при весьма слабой положительной тенденции (наблюдаемой по записи на барографе).

Перед началом экспериментов с помощью спиртомера измерена плотность заливаемого в микроманометр ПО-30 спирта, которая совпала с плотностью, указанной для условий градуировки микроманометра.

Площадь сечения канала для воздуха на уровне середины длины резервуаров термометров определялась экспериментальным расчетным путем. Как видно из рис. 1, сечение канала для воздуха равно

$$S = \frac{\pi}{4} (D_{\text{в}}^2 - d_{\text{н}}^2 + d_{\text{в}}^2 - d_{\text{т}}^2) = \frac{\pi}{4} [D_{\text{в}}^2 - d_{\text{н}}^2 + (d_{\text{н}} - 2\rho)^2 - d_{\text{т}}^2], \quad (1)$$

где $D_{\text{в}}$ — внутренний диаметр внешнего цилиндра радиационной защиты, $d_{\text{н}}$ — наружный диаметр внутреннего цилиндра, $d_{\text{в}}$ — внутренний диаметр внутреннего цилиндра, $d_{\text{т}}$ — наружный диаметр резервуара термометра, ρ — толщина стенки внутреннего цилиндра.

Площадь сечения при наличии батиста на резервуаре термометра на 2 мм² меньше, чем в его отсутствие, учет площади сечения микронзондов дает уменьшение еще на 2 мм². Суммарная площадь сечения (для обоих каналов) по результатам многократных измерений штангенциркулем, составила 295 мм² (без батиста), и с поправкой на площадь сечения микронзондов.

Желаемое значение скорости задавалось вращением ручки автотрансформатора до тех пор, пока показание микроманометра ПО-30 не устанавливалось соответствующим по градуировочной таблице требуемому значению скорости.

Отсчетное устройство газового счетчика позволяет производить измерения дискретностью 0,001 м³, т. е. 1 литр. Одному литру соответствует одно наименьшее деление на крайнем правом вращающемся барабане. В момент, когда неподвижная риска совмещалась с риской на барабане, соответствующей количеству, равному десяти, включался секундомер и записывалось показание счетчика (цифры справа от запятой) в литрах. В момент, когда показание счетчика увеличивалось ровно на 50 л, секундомер останавливался и записывалось его показание t , а также показание микроманометра ПО-30.

Таким образом, поскольку в данных экспериментах значения S и v остаются неизменными, то значение $V_{\text{г}}$ задаваемой скорости (м/с) может определяться более простым выражением, заменяющим (2)

$$V_{\text{г}} = B \cdot t^{-1}, \quad (10)$$

где t — показание секундомера (с), $B = 169,5$ м.

Повышенные требования к точности измерения V в данном случае, позволяют воспользоваться формулами (2) и (10) в непосредственном виде только для нормальных условий ($P_6 =$

$=760$ мм рт. ст. и $t_p = +20^\circ\text{C}$). Это связано с тем, что применяемый здесь счетчик РГ-40 градуирован при указанных условиях, поскольку он фиксирует не массовый, а объемный расход, то для приведения его показаний к нормальным условиям градуирования, эти показания (v_p) необходимо, согласно документации, умножить на поправочный множитель K

$$v_n = v_p \cdot K, \quad (11)$$

где v_n — показания счетчика для нормальных условий.

Поскольку воспроизводимые значения скорости V_r пропорциональны v_n , то это, соответственно отразится на формуле (10)

$$V_r = B \cdot K \cdot t^{-1}. \quad (12)$$

Поправочный множитель рассчитывается по формуле (13), приведенной в документации на счетчик,

$$K = 0,3855 \cdot \frac{P_6 + P_r}{273,16 + t_p}, \quad (13)$$

где P_6 — атмосферное давление (мм рт. ст.), P_r — разность между давлением на входе и давлением на выходе счетчика (мм рт. ст.), t_p — температура, которую имеет счетчик ($^\circ\text{C}$) (равна температуре помещения, где он установлен).

Необходимость учета отклонения атмосферного давления и температуры в помещении от их значений, принятых за нормальное, видна из табл. 1. Как видно из таблицы, пренебрежение этими отклонениями было бы существенным. Так при $P_6 = 755$ мм рт. ст. и $t_p = +25^\circ\text{C}$ $K = 0,98$, т. е. пренебрежение поправочным множителем приводит к завышению воспроизводимого значения скорости на 2 %.

Для условий, в которых проводились эксперименты, поправочный множитель практически оставался равным единице.

Результаты измерений и расчетов записывались в таблицу (см. табл. 2).

Всего было выполнено пять циклов сравнений. Каждый цикл содержал по три сравнения для четырех разных значений скоро-

Таблица 1

Значения коэффициента K для различных P_6 и t_p

t_p $^\circ\text{C}$	P_6 мм рт. ст.				
	750	755	760	765	770
30	0,955	0,962	0,968	0,975	0,981
25	0,971	0,978	0,984	0,991	0,997
20	0,988	0,995	1,001	1,008	1,014
+15	1,005	1,0012	1,019	1,035	1,032
+10	1,023	1,030	1,037	1,043	1,050

сти потока при ходе на повышение и при обратном ходе скорости на понижение. Для каждого из этих трех сравнений вычислялось среднее значение $\bar{\Delta}$ разностей Δ . На рис. 3 представлены наиболее типичные результаты. Как это следует из результатов исследований психрометра [5], скорость аспирации должна находиться в пределах 1,9—2,2 м/с, что, вообще говоря, должно определять диапазон измерений пневмоанемометра ПО-30. Однако исследования проведены в более широком диапазоне 1,6—3,2 м/с.

Таблица

Пример записи результатов и расчетов

$n_{V\lambda}$	t с	V_r , с м/с	$n_{\text{ПО}}$ (деления шкалы)	$V_{\text{ПО}}$ м/с	Δ м/с
020	0	2,48	28,5	2,42	—0,06
070	69		28,5		
100	0	2,51	29,0	2,44	—0,07
150	68		29,0		
200	0	2,48	29,0	2,44	—0,04
250	69		29,0		

Примечание. Здесь n_V — начальное и конечное показания газового счетчика; t — начальное и конечное показания секундомера; V_r — воспроизводимая скорость, полученная после подстановки t в формулу (12); $n_{\text{ПО}}$ — начальный и конечный отсчет по микроанометру пневмоанемометра ПО-30; $V_{\text{ПО}}$ — скорость потока, соответствующая среднему арифметическому из этих отсчетов по микроанометру, взятая из таблиц градуировки пневмоанемометра ПО-30 существующими методами; Δ — разность между скоростью, измеренной пневмоанемометром ПО-30, ($V_{\text{ПО}}$) и воспроизводимой скоростью V_r , с.

Из рис. 3 видно, что какое-либо четко выраженное отличие $\bar{\Delta}$ при ходе скорости на повышение от $\bar{\Delta}$ при ходе на понижение отсутствует и что в диапазоне допускаемых значений скорости аспирации (1,9—2,2 м/с) $\bar{\Delta}$ не превышает $\pm 0,04$ м/с. Анализируя поведение $\bar{\Delta}$ во всем диапазоне скорости (1,6—3,2 м/с), можно отметить совершенно явную детерминированную зависимость между $\bar{\Delta}$ и V . Можно было бы аналитически определить параметры этой зависимости, построив уравнение регрессии. Однако для круга решаемых здесь задач этого не требуется. Такое поведение $\bar{\Delta}$ в зависимости от V может быть связано с тем, что при измерении скорости с помощью ПО-30 учитывается разность между атмосферным давлением и динамическим, в то время как измерение скорости посредством обычной трубки Пито и микроанометра связано с учетом лишь разности между статическим и динамическим давлением в зоне расположения трубки [3]. До сих пор это различие не обнаруживало себя, по-видимому, в связи с исполь-

зованием ПО-30 в ограниченном диапазоне значений скорости (1,7—2,7 м/с) аспирации психрометров, при поверке которых пневмоанемометр главным образом и применяется. Из экспериментальных данных следует, что в этом диапазоне средние разности Δ не превышают $\pm 0,07$ м/с.

Проверка с использованием известных статистических критериев показала, что расхождения в значениях Δ , соответствующих примерно одному значению скорости во всех циклах, не являются статистически значимыми. Таким образом, Δ разных циклов относятся к одной статистической совокупности, каждая из которых содержит по 15 элементов (дискретных значений Δ). Средние квадратические отклонения от среднего в этих совокупностях состави-

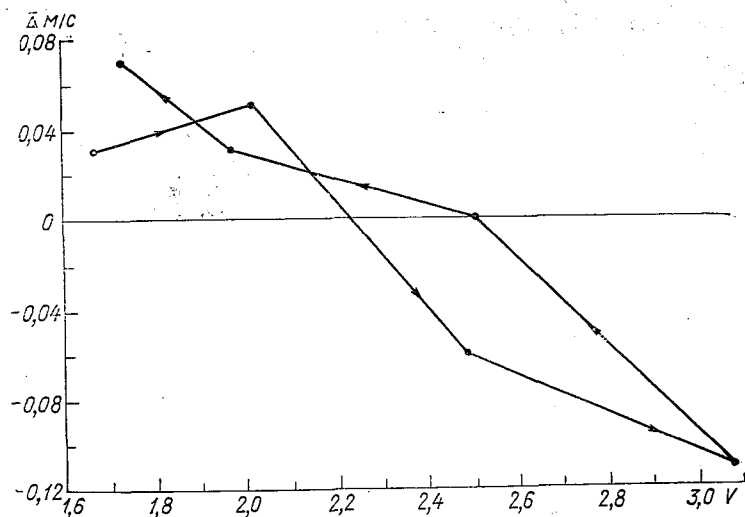


Рис. 3. Зависимость среднего значения разности Δ от скорости аспирации.

ли 0,01. Согласно распределения Стьюдента при доверительной вероятности $p=0,95$, доверительный коэффициент для числа дискретных значений $n=15$ доверительный коэффициент $v=2,13$. Следовательно, верхняя граница значений Δ составит $\pm 0,19$ м/с. Расчетная оценка погрешности градуировки пневмоанемометра ПО-30 существующим методом приводит к значению 2,5—3,0 %, т. е. предлагаемый метод (8) одинаков по точности с существующим. Поэтому средние разности Δ можно считать суммой двух одинаковых систематических для какой-либо V погрешностей. Следовательно, по экспериментальным данным погрешность градуировки новым методом составляет $\pm 0,04$ м/с в указанном диапазоне скоростей. Для нижней границы (1,7 м/с) этого диапазона погрешность в процентах относительно измеряемой величины со-

составляет $\frac{0,045}{1,7} \cdot 100 = 2,6$. Это наибольшее значение погрешности действительно практически совпадает с расчетной оценкой погрешности по формуле (8).

Таким образом, расчетным путем показано, а экспериментальным подтверждено, что статическая погрешность градуировки и поверки пневмоанемометра ПО-30 с помощью предлагаемой методики составляет 2,5 % в диапазоне скорости 1,7—2,7 м/с. По простоте метрологической обеспеченности и производительности методика обладает преимуществами перед существующей. Кроме того, поскольку условия измерений в дальнейшем мало отличаются от оптимальных условий рассмотренной методики градуировки и поверки, то погрешность измерения будет в основном определяться погрешностью градуировки и заведомо не превысит предельное значение 0,1 м/с в указанном диапазоне. Приведенные результаты совпадают с полученными ранее независимым методом [2].

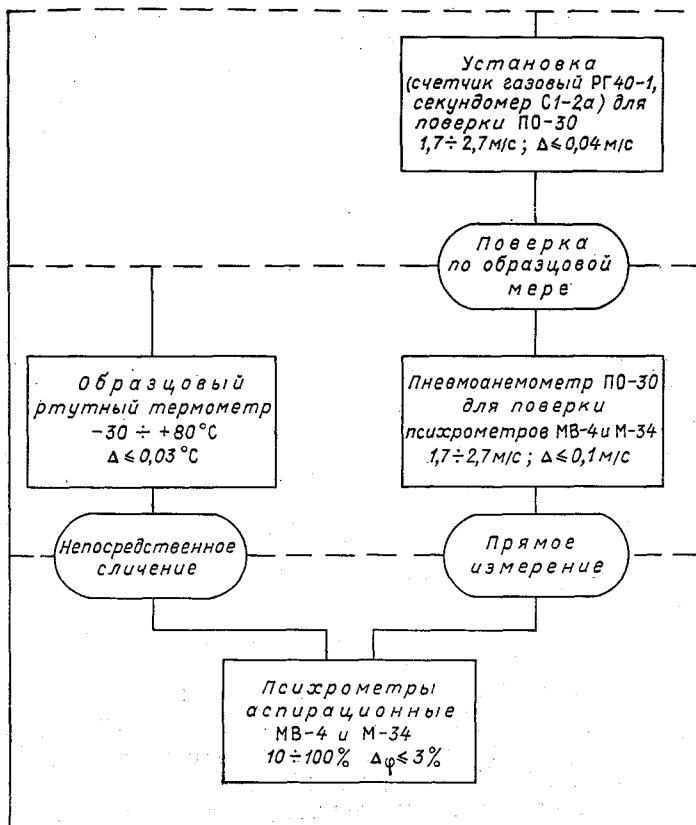


Рис. 4. Участок поверочной схемы для средств измерения влажности, отражающий метрологическое обеспечение психрометра аспирационного.

Выполненная работа позволяет конкретизировать и реализовать ту часть локальной поверочной схемы для средств измерения влажности воздуха [4], которая связана с метрологическим обеспечением психрометров аспирационных МВ-4 и М-34. Она приведена на рис. 4. Из нее видно, что пневмоанемометр ПО-30 фактически подвергается, согласно описанному методу, поверке по образцовой многозначной мере, воплощенной в виде установки (рис. 2), содержащей в качестве измерительных приборов газовый счетчик и секундомер. Эта ветвь поверочной схемы, по существу, должна являться частью поверочной схемы для средств измерения скорости воздушного потока, аналогично тому, как образцовый ртутный термометр, применяемый при передаче единицы температуры термометрам психрометра, (левая ветвь приводимой схемы), является частью поверочной схемы для средств измерения температуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 16263-70. Метрология. Термины и определения.— М.: Изд-во стандартов, 1970, с. 52.
2. Каменева А. И. Погрешности поверки аспирационных психрометров.— Труды ГГО, 1951, вып. 25 [87], с. 37—48.
3. Повх И. А. Аэродинамический эксперимент в машиностроении.— М.: Машгиз, 1959.—252 с.
4. Резников Г. П., Фатеев Н. П. Воспроизведение и передача размера единицы влажности воздуха при метеорологических измерениях.— Труды ГГО, 1974, вып. 340, с. 107—117.
5. Экспериментальные исследования аспирационных психрометров./ Леонова Л. И., Ядова Л. А., Климин Н. Н. и др.— Труды ГГО, 1973, вып. 414, с. 58—82.

В. Ю. Окоренков

ОБОСНОВАНИЕ МЕЖПОВЕРОЧНЫХ ИНТЕРВАЛОВ ДЛЯ ОБРАЗЦОВЫХ БАРОМЕТРОВ УГКС

Определение оптимальных межповерочных интервалов (МПИ) имеет особенно важное значение для образцовых средств измерений, так как они используются для поверок рабочих средств измерений (СИ). Наличие даже незначительного количества неисправных образцовых средств измерений может повлечь за собой нежелательные результаты. Установление необоснованно коротких МПИ связано со значительными материальными затратами на поверку данных СИ, кроме того, это приводит к интенсивной эксплуатации рабочих эталонов, что в свою очередь отрицательно сказывается на стабильности поддержания метрологических характеристик эталонов и приводит к преждевременному их износу.

Стабильность поправок для образцовых СИ значительно зависит от квалификации поверителей и от их субъективных возможностей. При наличии коротких МПИ смена поверителей, как правило, происходит чаще, чем при более длительных МПИ и приводит к значительно большему разбросу поправок аттестуемых приборов. Поэтому задача оценки погрешности, связанной с различной квалификацией поверителей тесно связана с определением оптимальных МПИ.

Точный расчет МПИ можно осуществить только в том случае, если определена функция распределения работы прибора без метрологических отказов (МО) при отсутствии поверок и ремонтов [5].

Практически определить функцию распределения времени работы прибора без МО можно лишь изучив все процессы, оказывающие существенное влияние на работу приборов в течение всего периода эксплуатации.

Для образцовых барометров УГКС, используемых в качестве основных и рабочих, и практически работающих в настоящее время без метрологических отказов в среднем в течение 26 лет, функцию распределения времени работы барометров без МО можно в первом приближении представить распределением изменения

величин поправок во времени при отсутствии поверок и ремонтов.

Данная зависимость позволит выявить период времени, за который изменение величин поправок может достигнуть предельно допустимой величины.

Основными источниками скрытых метрологических отказов образцовых барометров являются изменения, возникающие в результате постепенно развивающихся процессов, вызывающих ухудшение метрологических характеристик данных приборов. К ним в первую очередь относится процесс загрязнения коротких колен барометров, вызванных окислением ртути.

Процесс загрязнения окислами ртути короткого колена барометра сначала протекает медленно, что незначительно сказывается на метрологических характеристиках барометров, затем его интенсивность возрастает, что приводит к необходимости чистки короткого колена, т. е. периодическому ремонту, так как остановить процесс окисления невозможно. Нарушение жесткости соединений, износ, накопление деформации, усталость, как показала практика эксплуатации, сказываются незначительно вследствие малой интенсивности работы образцовых барометров. Как показала практика эксплуатации образцовых барометров, все основные и рабочие барометры УГКС работают без МО. Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод, что процесс старения образцовых барометров, в силу малой интенсивности их эксплуатации, протекает крайне медленно и практически не оказывает существенного влияния на изменение метрологических характеристик барометров. Паиболее существенное влияние на все ртутные барометры оказывает процесс окисления ртути и, как следствие этого процесса, загрязнение коротких колен барометров, вызывающее изменение поправок в отрицательную сторону.

Влияние процессов, вызывающих метрологические отказы данных приборов, практически полностью устраняется во время периодического ремонта (чистки короткого колена) или регулировки приборов. Это, в свою очередь, приводит к восстановлению первоначальных метрологических характеристик барометров.

Таким образом, при определении МПИ целесообразнее учитывать не весь период эксплуатации приборов, а лишь период времени между двумя ремонтами или чистками короткого колена, так как только в этом случае достигается почти полностью восстановление первоначальных метрологических характеристик [5]. Кроме того, необходимо учитывать только те данные о состоянии барометра до ремонта (или чистки короткого колена) и после него, которые получены одним и тем же поверителем. Это позволит исключить влияние погрешностей, связанных с индивидуальными качествами поверителей и различием их квалификации.

Очевидно, что для определения оптимального МПИ для образцовых СИ необходим значительный объем статистических данных, обладающих высокой надежностью и точностью. Поэтому в качестве исходного материала для определения МПИ для об-

разцовых барометров были использованы многолетние данные результатов аттестации образцовых барометров МПС в среднем за 26 лет. Рассматривался 71 барометр.

Как указывалось ранее, при отборе материалов аттестации принимались во внимание все факторы, оказывающие влияние на стабильность метрологических характеристик: ремонт барометра (чистка короткого колена барометров), смена поверителей, перенос барометров, регулировка и др.

Из материалов аттестации по каждому из образцовых барометров были выбраны данные о величинах изменения поправок

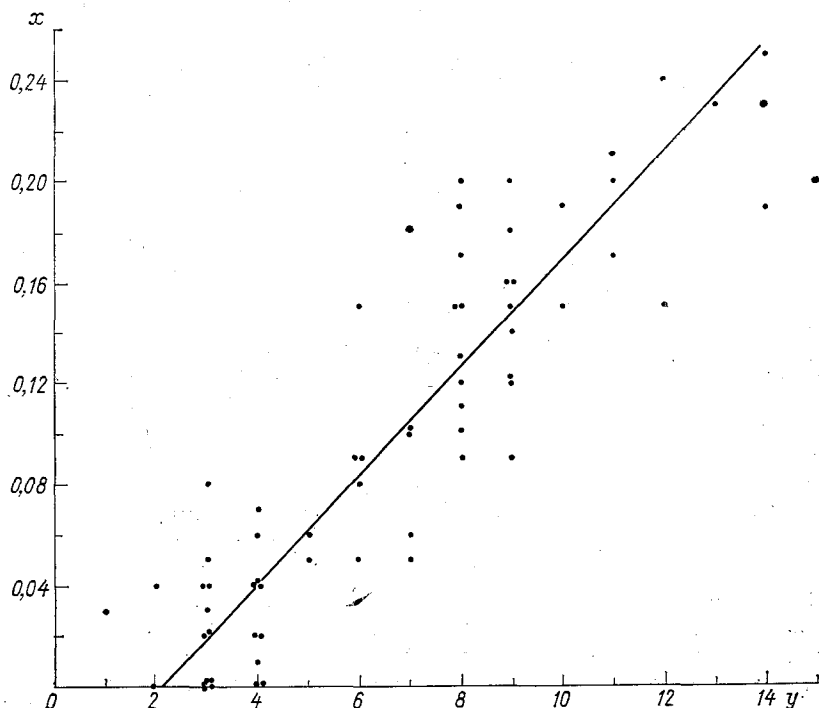


Рис. 1. Зависимость изменения величин поправок во времени при отсутствии поверок и ремонта.

(рассматриваемых по абсолютной величине) в течение периода времени между двумя чистками коротких колен барометров, полученные одним и тем же поверителем. Это позволило выявить количественную оценку полного изменения метрологических характеристик барометров, так как только при чистке короткого колена барометров полностью устраняется влияние процесса окисления ртути и, следовательно, загрязнения барометра. Кроме того, была выявлена взаимосвязь между величиной изменения поправок и периодом времени, за который произошло это изменение.

Изменение величин поправок x_i (гПа) во времени y_i (годы) при отсутствии поверок и ремонтов барометров

x	y_i	x_i	y_i	x_i	y_i	x_i	y_i	x_i	y_i	x_i	y_i	x_i	y_i
0,03	1	0,00	3	0,01	4	0,05	6	0,18	7	0,09	9	0,19	10
0,00	2	0,02	3	0,02	4	0,08	6	0,09	8	0,12	9	0,18	11
0,04	2	0,02	3	0,02	4	0,00	6	0,10	8	0,12	9	0,20	11
0,00	3	0,03	3	0,04	4	0,09	6	0,11	8	0,14	9	0,21	11
0,00	3	0,04	3	0,04	4	0,15	6	0,12	8	0,15	9	0,15	12
0,00	3	0,04	3	0,04	4	0,11	6	0,13	8	0,16	9	0,24	12
0,00	3	0,05	3	0,06	4	0,05	7	0,15	8	0,16	9	0,23	13
0,00	3	0,06	3	0,07	4	0,06	7	0,17	8	0,18	9	0,19	14
0,00	3	0,00	4	0,05	5	0,10	7	0,19	8	0,20	9	0,23	14
0,00	3	0,00	4	0,06	5	0,10	7	0,20	8	0,15	10	0,25	14
												0,20	15

Вследствие того, что поправки барометров [8] распределяются по нормальному закону, нет необходимости производить проверку анализируемых данных на нормальность распределения, так как они получены из всей совокупности результатов аттестации барометров.

Метод наименьших квадратов, используемый в данном случае не требует никаких предположений о нормальности, но эти предположения становятся необходимыми при построении доверительных интервалов.

Результаты аттестации образцовых барометров приведены в табл. 1 и на рис. 1.

Предположим, что в первом приближении регрессия y на x линейна. В этом случае уравнение регрессии имеет вид

$$Y = a + b(x - \bar{x}), \quad (1)$$

где $\bar{x} = \frac{1}{k} \sum \bar{x}_i$ определяет прямую, которая является оценкой для прямой регрессии; a , b — коэффициенты регрессии; k — количество результатов.

В результате расчетов были получены следующие значения $\sum x_i = 6,82$, $\sum y_i = 471,0$, $k = 71$, $\sum x_i^2 = 1,0460$, $\sum y_i^2 = 3953,0$, $\sum x_i y_i = 61,45$, которые по известным формулам [1] позволили вычислить

$$\sum (x_i - \bar{x})^2 = \sum x_i^2 - \frac{\Sigma(x_i)^2}{k} = 1,05 - \frac{(6,82)^2}{71} = 0,39;$$

$$\sum (y_i - \bar{y})^2 = \sum y_i^2 - \frac{\Sigma(y_i)^2}{k} = 3953 - \frac{(471,0)^2}{71} = 828,49;$$

$$\begin{aligned} \sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) &= \sum x_i y_i - \frac{\Sigma x_i \Sigma y_i}{k} = \\ &= 61,45 - \frac{6,82 \cdot 471,0}{71} = 16,21; \end{aligned}$$

$$\sum (\hat{y} - \bar{y})^2 = \frac{[\Sigma(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]^2}{\Sigma(x_i - \bar{x})^2} = \frac{262,76}{0,39} = 673,75;$$

$$\begin{aligned} \sum (y - \hat{y})^2 &= \sum (y_i - \bar{y})^2 - \frac{[\Sigma(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]^2}{\Sigma(x_i - \bar{x})^2} = \\ &= 828,49 - 673,75 = 154,74. \end{aligned}$$

Вычислим коэффициент регрессии

$$b = \frac{\Sigma(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\Sigma(x_i - \bar{x})^2} = \frac{16,21}{0,39} = 41,56.$$

Оценку дисперсии $D[b]$ получим по известной формуле [1]

$$D[b] = \frac{S^2}{\Sigma(x_i - \bar{x})^2} = \frac{2,18}{0,39} = 5,59.$$

Построим 95 %-ные доверительные пределы для коэффициента регрессии b . Так как $t_{0,975}(71) = 2,20$ и $\sqrt{D[b]} = 2,36$, то $\sqrt{D[b]} = 5,19$ и 95 %-ные доверительные пределы будут $41,56 \pm 5,19$.

Чтобы построить оцененную линию регрессии, необходимо еще вычислить $\bar{y} = 471,0/71 = 6,63$, $\bar{x} = 6,82/71 = 0,10$ и $b = 41,56$, откуда $\hat{y} = 6,63 + 41,46(x_{i_0} - 0,10)$. После преобразования получим

$$\bar{Y} = 41,56x_{i_0} + 2,47. \quad (2)$$

При $x_{i_0} = 0$, $\bar{Y} = 2,47$ $D[\bar{Y}_{x=0}] = 2,18[71 + (0 - 0,10)^2/0,39] = 0,087$.

Доверительными пределами для точки пересечения линией регрессии оси y являются $(2,47 \pm 2,20) \cdot \sqrt{0,087} = (1,83; 3,11)$.

Аналогично приведенному выше, по известной формуле [3] вычислим коэффициенты регрессии x на y :

$$\beta_{x/y} = \frac{\sum x_i y_i - \bar{y} \sum x_i}{\sum y_i^2 - \bar{y} \sum y_i} = \frac{61,45 - 6,63 \cdot 6,82}{3953,0 - 6,63 \cdot 471,0} = 0,019,$$

$$a_0 = \frac{\bar{x} \sum y_i^2 - \bar{y} \sum x_i y_i}{\sum y_i^2 - \bar{y} \sum y_i} = \frac{0,10 \cdot 3953,0 - 6,63 \cdot 61,45}{3953,0 - 6,63 \cdot 471,0} = -0,015.$$

Используя вычисленные коэффициенты, можно построить прямую регрессии, характеризующую приведенную выше зависимость. Уравнение линии регрессии можно представить в следующем виде:

$$x = 0,019y_{i_0} - 0,015. \quad (3)$$

Оценим дисперсии переменных x и y , применив в качестве оценки средние квадратические отклонения

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n}} = \sqrt{\frac{0,395}{71}} = 0,0745,$$

$$S_y = \sqrt{\frac{828,49}{71}} = 3,415.$$

Теперь мы можем вычислить коэффициент корреляции, позволяющий сделать вывод о существовании линейной зависимости, между двумя переменными и оценить ее.

По известной формуле [5] находим

$$r_{xy} = \frac{b \cdot S_x}{S_y} = \frac{41,56 \cdot 0,0745}{3,415} = 0,9066 \simeq 0,91. \quad (4)$$

Вследствие того что коэффициент корреляции близок к единице, можно сделать вывод, что между указанными выше переменными существует зависимость, близкая к линейной.

Подставив в уравнение (2) предельно допустимое значение изменения поправок образцовых барометров (0,2 гПа) за период между сличениями, получим предельно допустимую величину МПИ, выраженную в годах $\bar{Y} = 41,56 \cdot 0,20 + 2,47 = 10,78 \simeq 11$. Оценим насколько хорошо согласуются данные, полученные в реаль-

Таблица

Величины изменения поправок и их периоды, полученные при аттестации барометров и вычисленные по уравнению регрессии

x_i	x'_i	ν_i	y'_i	x_i	x'_i	y_i	y'_i
0,03	0,00	1	3,71	0,11	0,10	6	7,04
0,00	0,02	2	2,47	0,05	0,12	7	4,55
0,04	0,02	2	4,13	0,06	0,12	7	4,96
0,00	0,04	3	2,47	0,10	0,12	7	6,63
0,00	0,04	3	2,47	0,10	0,12	7	6,63
0,00	0,04	3	2,47	0,18	0,12	7	9,95
0,00	0,04	3	2,47	0,09	0,15	8	6,21
0,00	0,04	3	2,47	0,10	0,15	8	6,63
0,00	0,04	3	2,47	0,11	0,15	8	7,04
0,00	0,04	3	2,47	0,12	0,15	8	7,46
0,00	0,04	3	2,47	0,13	0,15	8	7,87
0,02	0,04	3	3,30	0,15	0,15	8	8,70
0,02	0,04	3	3,30	0,17	0,15	8	9,53
0,03	0,04	3	3,72	0,19	0,15	8	10,36
0,04	0,04	3	4,13	0,20	0,15	8	10,78
0,04	0,04	3	4,13	0,09	0,16	9	6,21
0,05	0,04	3	4,55	0,12	0,16	9	7,46
0,08	0,04	3	5,02	0,12	0,16	9	7,46
0,00	0,06	4	2,47	0,14	0,16	9	8,29
0,00	0,06	4	2,47	0,15	0,16	9	8,70
0,01	0,06	4	2,88	0,16	0,16	9	9,12
0,02	0,06	4	3,30	0,16	0,16	9	9,12
0,02	0,06	4	3,30	0,18	0,16	9	9,95

ных условиях при аттестации, с данными, вычисленными по уравнениям линии регрессии. Данные расчетов приведены в табл. 2. Очевидно, что если y и x нормально распределенные случайные величины [6], т. е. их закон близок к нормальному, то степень несогласованности линии регрессии и наблюдаемых значений может быть оценена с помощью величин разброса S'_x , S'_y , определяемых известной формулой [5]

$$S'_x = \sqrt{\frac{\sum (x' - x)^2}{N}}; \quad S'_y = \sqrt{\frac{\sum (y' - y)^2}{N}}, \quad (5)$$

где: x' , y' — вычисленные значения, x , y — наблюдаемые значения, $S'_x = 0,036$ гПа, $S'_y = 1,49$ года.

Таким образом, если принять величину $3S'_x = \pm 0,11$ и $3S'_y = \pm 4,47$ за верхнюю границу разброса данных величин [2], то с вероятностью $P = 0,9973$ можно утверждать, что величина $t_{\text{мпн}} = 11$ лет будет находиться в пределах 6,3—15,3 лет, следовательно, оптимальной величиной МПИ, с метрологической точки зрения, нужно считать $t_{\text{мпн}} = 6$ лет, при этом величина изменения оправок барометров с той же вероятностью будет находиться в пределах $-0,01 \dots 0,21$ гПа.

При определении оптимального МПИ для образцовых барометров необходимо учитывать, что, согласно [7], если величина изменения поправки не превышает величину 0,10 гПа, то поправку можно оставить прежней, следовательно, задавшись этой величиной, можно определить МПИ, который будет оптимально соответствовать требованиям высокой стабильности поправок образцовых барометров во времени, $Y = 41,56 \cdot 0,10 + 2,47 = 6,626 \approx 7$ лет.

Полученные данные о величине МПИ хорошо согласуются данными аттестации образцовых барометров.

Действительно, как видно из рис. 1, за период 6 лет максимальное изменение величин поправок составляло всего 0,15 гПа, в среднем не превышало 0,04 гПа.

Таким образом, получив две независимые оценки МПИ, можно утверждать, что существенную величину МПИ для образцовых барометров, равную 3 годам, можно увеличить до 6 лет.

В обработке данных аттестации образцовых барометров УГКС принимали участие сотрудники отдела метрологии ГГО Соловьева Н. А. и Климовская М. В.

В заключение можно сделать следующие выводы:

1. МПИ для образцовых барометров, обеспечивающий изменение систематической погрешности в пределах предельно допускаемой погрешности (0,20 гПа) с вероятностью не менее 0,9973, может быть увеличен до 6 лет.

2. Увеличение существующего МПИ для образцовых барометров УГКС с 3 до 6 лет по приближенной оценке даст экономию а 6 лет около 50 тыс. руб.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Браунли К. А. Статистическая теория и методология в науке и технике.— М.: Наука, 1977.
2. Бурдун Г. Д., Марков Б. Н. Основы метрологии.— М.: Изд-во стандартов, 1975.
3. Касандрова О. Н., Лебедев В. В. Обработка результатов наблюдений.— Л.: Наука, 1970, с. 70—78.
4. Методика расчета индивидуальных поверок большого парка средств измерений/Ю. З. Гуревич, Е. И. Король, Н. В. Кучина, П. В. Новицкий.— Метрология, 1977, № 10, с. 44—50.
5. Новицкий П. В., Гореликов Н. И., Смельницкая Ж. С. Методы расчета и корректировки межповерочных интервалов средств измерений.— Метрология, 1977, № 10, с. 36—43.

6. Пановский Г. А., Брайер Г. В. Статистические методы в метеорологии.— Л.: Гидрометеиздат, 1967.

7. Руководство по поверке метеорологических приборов/Под ред. И. А. Покровской.— Л.: Гидрометеиздат, 1967.

8. Эталонные барометры Гидрометеослужбы СССР/И. А. Покровская, Г. И. Полухин, В. А. Парнищев, И. П. Фатеев.— Труды ГГО, 1972, вып. 280 с. 68—80.

В. Ю. Окоренков

О МЕТОДИКЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОЧИХ ЭТАЛОННЫХ БАРОМЕТРОВ В ПЕРИОД ЭКСПЛУАТАЦИИ И ХРАНЕНИЯ

Для воспроизведения и передачи единицы атмосферного давления на сеть станций Госкомгидромета служат рабочие эталонные ртутные барометры № 3 и № 4 с интерференционным отсчетом конструкции ВНИИМ. Эталонные барометры хранятся в ГГО, где проводятся систематические исследовательские работы по поддержанию их метрологических характеристик. Эталонные барометры № 3 и № 4 являются региональными эталонами в системе Всемирной метеорологической организации (ВМО), что предъявляет к их метрологическим характеристикам особые требования.

Необходимость проведения систематических исследовательских работ по поддержанию метрологических характеристик эталонных барометров обусловлена значительным изменением условий эксплуатации.

Увеличение уровня вибрации грунта за последние 20 лет, вызванное интенсивным движением транспорта и работой близлежащих предприятий, создает определенные трудности в поддержании метрологических характеристик, приводит к необходимости более частой юстировки эталонных барометров, а главное, оказывает существенное влияние на случайные составляющие их погрешности.

Как указывалось в результатах исследований барометров при введении их в качестве эталонов [4, 5, 6], необходимо проводить исследования для более точного определения количественной оценки случайной составляющей погрешности, рассматривая ее как случайную функцию времени. Кроме этого, необходимо количественно оценить неисключенные остатки систематической составляющей погрешности рабочего эталона.

В связи с ростом требований к метрологическим характеристикам эталонных и образцовых средств измерений и с существенным влиянием внешних условий на результаты измерений, необ-

ходимо учитывать внешние воздействия путем задания функции влияния для каждой влияющей величины.

Преимущество задания функций влияния вместо дополнительных погрешностей заключается в том, что они делают возможным учет случайных изменений влияющих величин, а не только их наибольших отклонений от нормальных условий. Это имеет весьма существенное значение для современных средств измерений, которые используются в сложных условиях внешней среды, когда влияющие величины случайно изменяются в широких пределах [4]. Учет только наибольших отклонений влияющих величин в этом случае дает завышенные значения погрешности измерений.

Выявление функций влияния внешних условий позволит существенно снизить случайную составляющую погрешности путем определения оптимальных условий проведения измерений (в первом приближении на 0,7 Па (0,005 мм рт. ст.)).

В настоящее время основными направлениями развития измерительной техники являются автоматизация и объективизация измерений, поэтому к эталонным барометрам предъявляются особые требования. В первую очередь это требования высокой стабильности их метрологических характеристик во времени и автоматизации процесса измерения для снижения погрешностей измерений, связанных с субъективными качествами операторов.

Существующие рабочие эталоны удовлетворяют требованиям, предъявляемым к эталонам ВМО, обладают очень высокой стабильностью метрологических характеристик во времени, поэтому необходимо, наряду с исследовательскими работами по поддержанию метрологических характеристик, проводить работы по модернизации существующих эталонов, что экономически целесообразнее создания новых эталонов.

Оснащение сети станций Госкомгидромета образцовой грузопоршневой техникой ставит вопрос о необходимости создания грузопоршневого эталона давления. Поэтому в настоящее время в ГГО проводятся работы по изучению стабильности метрологических характеристик образцовых грузопоршневых манометров типа МАД-3М, ИМАД-4М, МПА-15 во времени. По предварительным результатам стабильность метрологических характеристик образцовых грузопоршневых манометров значительно уступает стабильности рабочих эталонных барометров, в основном из-за сложности их эксплуатации, значительно более высоких требований к работам по поддержанию их метрологических характеристик.

В настоящее время возникла острая необходимость в разработке методики исследования и поддержания метрологических характеристик не только рабочих эталонов, но и образцовых грузопоршневых манометров давления. В данной статье рассматриваются вопросы, связанные с разработкой методики исследования в основном эталонных барометров в период эксплуатации, хотя некоторые вопросы можно отнести и к грузопоршневой технике.

Систематическое исследование эталонных барометров проводится в отделе метрологии ГГО с 1963 г. За этот период накоплен значительный статистический материал по режиму эксплуатации барометров, поддержанию режима вакуумных систем, температурному режиму, данным по влиянию вибрации грунта и режиму ажности, а также результатам сличения эталонных барометров между собой и сличения с образцовыми грузопоршневыми барометрами типа МАД-ЗМ.

Из результатов сличения следует, что влияние внешних условий может быть настолько существенным, что в ряде случаев приводит к невозможности проведения измерений и значительно увеличивает погрешность измерений, поэтому необходимо изучить механизм их влияния и количественно оценить влияние каждого фактора в отдельности и всех факторов в совокупности.

Из материалов сличений барометров, проводимых в ГГО именно ряда средних квадратических отклонений (СКО) результатов сличений, определяющих случайную составляющую погрешности), следует, что СКО может изменяться в достаточно широких пределах, а именно 0,8—3,9 Па (0,006—0,030 мм рт. ст.). Это изменение следует отнести за счет влияния только внешних условий, тогда как юстировка эталонных барометров, проводимая перед каждым сличением может оказать влияние только на систематическую составляющую неисключенных остатков погрешности.

Изменение случайной составляющей погрешности в таких широких пределах позволяет сделать вывод о том, что влияние внешних условий, а именно, стабильности поля давления и температурного поля, а также длительность сличений, степень вибрации фундамента эталонных барометров, субъективные особенности операторов, недостаточная синхронность отсчетов оказывают значительное влияние на изменение случайных составляющих погрешности.

Анализ указанных факторов позволил выделить наиболее существенные из них и определить механизм их влияния.

Постоянный фон вибрации фундамента барометра несомненно оказывает влияние не только на случайную составляющую, но и на систематическую. Предположительно механизм влияния может быть следующий.

Вследствие того что для проведения сличений барометров выбирается период времени, когда уровень вибрации бывает минимальным, обычно ночное время (с 24 до 5 ч), то в среднем амплитуда вибраций бывает постоянной, следовательно, влияние одной величины вибраций можно отнести к систематической составляющей погрешности, так как минимальный фон присутствует во всех сличениях. Конечно, нельзя с определенной уверенностью утверждать, что величина вибрации бывает одной и той же во всех сличениях, но средняя величина остается постоянной почти во всех сличениях и составляет около 6—8 мк. Длительность сличения составляет в среднем 5 ч, и естественно,

что в течение этого периода происходят резкие изменения уровня вибрации (скачки), которые приводят к случайным ошибкам и грубым промахам операторов при наведении интерференционных картин. Как правило, наведение интерференционной картины осуществляется в тот момент времени, когда вибрации отсутствуют, следовательно, влияние вибрации может сказываться из-за того, что резкие изменения уровня вибрации (скачки) возникают у барометров не совсем синхронно, следовательно, моменты наводки отсчетов барометров будут не совпадать, а это в свою очередь при изменении атмосферного давления, может привести к появлению значительных случайных составляющих погрешности. Определение минимального фона вибрации, а именно, количественная оценка амплитуды и частоты вибрации, а главное, постоянный контроль данных параметров в течение всего периода сличения позволит не только определить наиболее оптимальные условия проведения сличения, но и позволит количественно определить погрешность, связанную с вибрацией, а при соответствующей обработке результатов измерений и исключить ее. Для решения этой задачи необходим определенный комплекс современной аппаратуры, который позволил бы повысить точность передаточной единицы измерения давления не только на сеть гидрометеорологических станций СССР, но также гидрометслужбам стран СЭВ.

В настоящее время существуют виброизмерительные комплексы промышленного типа, например типа ВИБ-5 (с датчиком ДУБ-5 разработанного В. А. Шмелевым, которые позволяют регистрировать основные параметры вибрации. В этом направлении существуют и новые разработки, например виброщуп 8Э242, который позволит практически измерять вибрации [1] в диапазоне частот 0—1000 Гц.

Как показали исследования параметров вибрации рабочих эталонных барометров, проводимые в ГГО, как правило, промышленный фон вибрации вызывает колебания ртути с частотой 2—4 Гц, а амплитуды вибрации в этих случаях могут достигать в среднем 5 мк. Эти данные подтверждаются также и зарубежными исследованиями, следовательно, влияние вибрации на амплитудах, соизмеримых с погрешностью эталонных барометров может быть, очень велико, поэтому при проведении сличений рабочих эталонных барометров контроль параметров вибрации необходим.

Для нормальной работы с эталонными барометрами вибрации с амплитудой 10—15 мк крайне недопустимы, так как они приводят к полному размыванию интерференционных картин барометров.

Новым направлением выявления механических резонансов и стабилизации параметров вибрации на заданном уровне, обеспечивающим высокую точность как измерения параметров вибрации, так и поддержания их заданного уровня, является применение лазерных установок [7].

Для стабилизации параметров вибрации лазерные установки делают, как правило, замкнутую систему автоматического регулирования, обратная связь в которой осуществляется при помощи различных фотоэлектрических преобразователей и устройств автоматической регулировки заданного параметра вибрации. Лазерные установки позволяют измерять амплитуду вибрации исследуемого объекта от единиц микрометров до единиц миллиметров.

Выходные сигналы в режиме измерения записываются на диаграммную ленту, расшифровка которой дает сведения о резонансных явлениях исследуемых объектов, их частоте, а также о поглощении энергии на определенных частотах, а следовательно, уменьшении амплитуды колебаний.

Применение лазерных установок в исследовании эталонных барометров позволило бы не только с высокой точностью определить параметры вибрации, воздействующей на них, но и позволило бы, изменяя динамические свойства виброизолирующего фундамента эталонных барометров, устранить резонансные явления, создать равнопрочную конструкцию эталонных барометров, также создать принципиально новую конструкцию фундамента эталонных барометров, позволяющую стабилизировать некоторые параметры вибрации путем введения в конструкцию замкнутой системы регулирования.

Для более четкого определения вклада вибрации в погрешность измерения необходимо, чтобы юстировка эталонных барометров не зависела от субъективных качеств наблюдателя и выполнялась всегда на одном и том же уровне. Для решения этой задачи, необходимо вместо ранее принятых критериев юстировки, именно четкости, размеров, качества интерференционных полос интерференционных картинах сличаемых эталонных барометров, применить более объективный критерий, позволяющий определить качество юстировки количественной оценкой, иными словами ввести постоянный коэффициент юстировки.

Возможным направлением решения этой задачи является применение в качестве индикатора юстировки ваттметров для оптического диапазона волн, позволяющих не только производить юстировку барометров по максимуму излучаемой мощности интерференционных картин, но и поддерживать юстировку барометра строго постоянной, что приведет к снижению систематической составляющей погрешности и, как указывалось ранее, создаст возможность количественно оценить вклад постоянного фона вибрации в систематическую составляющую погрешности.

Другим, более перспективным направлением в решении этой задачи является применение в качестве источника света в коллиматорах барометров лазеров, обеспечивающих высокостабильный источник монохроматического излучения.

В зарубежных конструкциях с этой целью используется метод распространенной модуляции, например в конструкции французского манобарометра фирмы «Jeger», который позволяет осуществлять наводку в пределах 3 мк. Разработка и внедрение по-

добных устройств позволит существенно повысить точность измерения давления эталонными барометрами.

Вторым фактором, оказывающим заметное влияние на погрешность измерения, является непостоянство поля температуры, а точнее градиент температуры $\Delta T/\Delta t$.

Механизм влияния данного фактора может быть следующий. Как указывалось ранее, продолжительность сличения составляет около 4—5 ч (в зависимости от вибрационных условий может быть и больше), и естественно, что за этот период происходит изменение температурного поля, вызванное нагреванием операторов приборов, что в свою очередь заставляет выравнивать градиент температуры как на концевой мере, так и на ртутных барометрах.

В период между отсчетами включается система вентиляции, которая способствует стабилизации температурного режима. Однако вследствие влияния вибрации время отсчета по эталонным барометрам колеблется в среднем от 5 до 10 мин и не всегда удается быстро стабилизировать температурное поле, поэтому момент отсчета температуры и градиентов температуры на концевой мере и ртутных эталонных барометров в большинстве случаев бывает сдвинут во времени относительно момента отсчета по эталонному барометру и возникает погрешность, вызванная несоответствием снятого отсчета действительному значению температуры и ее градиентам на мере и ртутных барометров в момент отсчета показаний давления.

Теоретически известно, что погрешность измерения температуры $0,01^\circ\text{C}$ вызывает погрешность измерения давления 1,4 мм.

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод, что снятие значений температуры, ее градиентов на мере и ртутных эталонных барометров должно производиться одновременно со снятием отсчетов по барометрам. Для этого необходимо автоматизировать процесс снятия и регистрации значений температуры и ее градиентов путем введения в конструкцию рабочих эталонных барометров блока автоматического опроса и регистрации соответствующих параметров.

Влияние изменений градиентов температуры в данном случае носит не систематический, а случайный характер, поэтому и погрешности, связанные с влиянием данного фактора, можно отнести к случайным составляющим погрешности.

Наиболее важным, доминирующим фактором, после вибрации оказывающим существенное влияние на сличение рабочих эталонных барометров, является нестабильность поля давления во времени, т. е. величина барометрической тенденции.

Рассмотрим возможный механизм воздействия этого фактора на процесс сличения. Как известно, микрофлуктуации атмосферного давления существуют постоянно и в период сличения могут достигать значительной величины, следует отметить, что синхронность отсчетов двух эталонов обеспечить очень трудно, так как она зависит от величины барометрической тенденции $\frac{\Delta p}{\Delta t}$ (мбар/ч).

с ее ростом синхронность все больше нарушается. Большое влияние на синхронность отсчетов оказывают вибрации ртутных эталонных барометров, так как приходится выжидать, когда четко будут видны интерференционные картины (полосы) одновременно обоих барометров. Несинхронность отсчетов, вызванная вибрацией ртуты, даже при стационарном поле давления приводит к значительным погрешностям, а при наличии существенной величины барометрической тенденции ($\frac{\Delta p}{\Delta t} > 0,2$ мбар/ч) она может привести к значительным погрешностям, ориентировочно составляющим 1,3—2,6 Па (0,01—0,02 мм рт. ст.), которые проявляются случайно, и их несомненно можно отнести к случайным составляющим погрешности.

Рассмотрим как влияет резкое изменение поля давления $\frac{\Delta p}{\Delta t} > 0,2$ мбар/ч. Во-первых, процесс наводки интерференционных картин (как верха, так и низа) у эталонных барометров резко ложится, наблюдается «сползание» интерференционной картины в период отсчета, а если учитывать, что в ряде случаев придется выжидать подходящего момента для наведения (из-за влияния вибрации), то время отсчета и наведения возрастает, главное, что моменты наведения и отсчета интерференционных картин у обоих барометров при данных условиях невозможно сделать одинаково, т. е. увеличиваются промахи операторов в наводке, разброс в отсчетах резко возрастает в 2—3 раза, кроме того, увеличение времени проведения измерения утомляет операторов и увеличивает грубые промахи в отсчетах. Из материалов исследований нетрудно выявить связь между барометрической тенденцией и средним квадратическим отклонением результатов, т. е. случайной составляющей погрешности.

Естественно, что с ростом барометрической тенденции число промахов, неточностей в наводке возрастает, так как наводку интерференционных картин и отсчет необходимо производить значительно быстрее.

Для исключения случайной составляющей погрешности, вызванной влиянием данного фактора, представляется целесообразным:

а) автоматизировать процесс грубой наводки интерференционных картин барометров;

б) исключить субъективизм поверителей в наводке отсчетов путем введения в конструкцию барометров индикатора точного наведения.

Перспективным направлением в решении этой задачи является, как указывалось ранее, применение в качестве индикаторов приборов, позволяющих измерять спектральную мощность интерференционных картин и осуществлять настройку по максимальной мощности.

Другим направлением в решении этой задачи является применение устройств, позволяющих преобразовывать изображение

интерференционной картины в модулированный сигнал, т. е. и пользоваться метод пространственной модуляции.

Прототипом подобного устройства может служить индикатор точного наведения, состоящий из первичного преобразователя, настроенного на наиболее четкую из интерференционных полос эталонного барометра, обычно черную, и усилителя постоянного тока с фотоэлектронным модулятором [2], сигнал которого выводится на осциллограф. Регулировку пределов, в которых осуществляется точная наводка отсчетов барометров, целесообразно осуществлять в пределах, соизмеримых с погрешностью эталонного барометра, т. е. ± 5 мк. Грубую наводку отсчета целесообразно осуществлять автоматически, синхронно у обоих барометров.

Метрологические характеристики эталонных барометров зависят не только от влияния внешних факторов и условий эксплуатации, но и от интенсивности эксплуатации.

В ходе исследований барометров было выявлено, что для поддержания их метрологических характеристик на одном и том же уровне в течение всего периода эксплуатации достаточно проводить не более 6 сличений в год между собой, что свидетельствует о высокой стабильности эталонных барометров.

Поддержание стабильных условий эксплуатации барометров, а именно, температурного режима в пределах $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$, режим вакуумной системы, обеспечивающего поддержание постоянного вакуума не менее $1 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст. в период между сличениями и $1 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст. во время сличения, положительно влияет на стабильность метрологических характеристик эталона, а отклонения от указанных условий вызывают их резкое изменение.

В данной статье не затрагиваются вопросы, связанные с определением динамической погрешности эталонных барометров вследствие того что ее влияние значительно меньше вышеприведенных факторов из-за сравнительно плавного изменения атмосферного давления. Однако в настоящее время планируются работы по экспериментальному определению динамических погрешностей, как эталонных барометров, так и грузопоршневых манометров, что для последних является особенно важным, так как манометры работают в широком диапазоне давления и применяются для поверки образцовых средств измерений по всему диапазону.

Рассмотрев основные факторы, оказывающие влияние на метрологические характеристики рабочих эталонных барометров, и наметив пути исключения их влияния, можно определить основные направления исследований, которые должна включать в себя методика исследования рабочих эталонных барометров в период эксплуатации.

Во-первых, как указывалось ранее, необходимо путем гармонического анализа результатов сличений выявить гармоники и их частоты, присущие влиянию, в первую очередь, вибрации, нестационарности поля температуры, давления и др., т. е. выявить и количественно оценить функции влияния внешних факторов.

Кроме того, при помощи гармонического анализа флуктуаций температуры и давления, наблюдаемые при сличениях, могут быть представлены в форме, удобной для использования их в качестве граничных условий при решении задач, связанных с исключением влияния на результаты сличений и определением оптимальных условий сличений. Далее проводится спектральный анализ, целью нахождения сглаженного спектра из которого путем статистической фильтрации исключается влияние внешних условий. В этом случае задача состоит в определении параметров фильтра, обусловленных функциями влияния. Протяженность спектра будет оказывать на то, какая должна быть инерция сличаемых приборов и какой следует ждать ошибки, если прибор реагирует медленно.

Другим направлением исследования является определение случайной составляющей погрешности как случайной функции времени и задание ее в виде автокорреляционной функции или спектральной плотности. Решение данной задачи позволит точно оценить случайную составляющую погрешности в зависимости от конкретного ряда наблюдений и условий проведения сличения, а также определить оптимальный интервал между отсчетами, определяемый инерционными свойствами барометров и случайными составляющими погрешности, связанными с изменением внешних условий.

Определение динамической погрешности рабочих эталонных барометров также является важным направлением в исследованиях, которое включает в себя нормирование времени успокоения (времени переходного процесса), т. е. промежутка времени с момента скачкообразного изменения измеряемой величины до момента, когда подвижный орган отсчетного устройства войдет в зону установившегося значения, а также допустимого значения первого отброса $X_{отб}$ или отношения $X_{отб}/X_{уст}$, которое не должно превышать 1,4 [4]. Особенно это важно для грузопоршневой техники, так как не всегда удается достаточно плавно изменять измеряемое давление во всем диапазоне приборов.

Таким образом, рассмотренные нами вопросы тесно связаны с разработкой методики исследования рабочих эталонных барометров в период эксплуатации, которая на наш взгляд, должна включать следующие разделы:

- определение и нормирование на основе статистического материала оптимальных условий проведения измерений;
- определение инерционных свойств барометров;
- определение погрешности измерения, связанной с инерционными свойствами барометров, т. е. определение динамической погрешности;
- определение вида и количественной оценки функций влияния внешних условий;
- определение параметров статистических фильтров, исключаящих влияние внешних условий при обработке результатов измерений;

- определение в чистом виде неисключенных остатков систематической и случайной составляющих погрешности измерений;
- задание случайных составляющих погрешности в виде автокорреляционной функции, учитывающей изменение данной составляющей погрешности в течение всего периода измерений;
- прогноз погрешности измерений в зависимости от влияния и изменения внешних условий, на основе функций влияния.

Разработка методики исследования эталонных и образцовых средств измерений в период эксплуатации позволит приблизиться к решению проблемы исследования метрологических эксплуатационных характеристик средств измерения в полевых условиях, что является не менее актуальной задачей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абжирко Н. И. Влияние вибрации на характеристики радиолокационных антенн.— М.: Советское радио, 1974.
2. Авдеев В. Н., Вартазаров Э. Г., Мартиросов В. Д. Усилитель постоянного тока с фотоэлектронным модулятором.— Измерительная техника, 1975, № 5.
3. Бурдун Г. Д., Марков Б. Н. Основы метрологии.— М.: Изд-во стандартов, 1975.
4. Покровская И. А., Лурье В. А. Результаты исследования новых эталонных барометров.— Труды ГГО, 1964, вып. 160.
5. Покровская И. А. Хранение и передача на сеть станций единицы атмосферного давления.— В кн.: Труды ВНМС. Л., 1963, т. IX.
6. Эталонные барометры Гидрометслужбы СССР/И. А. Покровская, Г. И. Полухин, В. А. Парнищев, Н. П. Фатеев.— Труды ГГО, 1972, вып. 280.
7. Рыгалин В. Г., Гречинский Д. А., Соболев А. Б. Применение лазерных установок для выявления механических резонансов и стабилизации параметров вибрации на заданном уровне.— Измерительная техника, 1975, № 5.

Г. И. Тетерев

О ТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОПРАВКЕ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ РТУТНЫМИ БАРОМЕТРАМИ И МАНОМЕТРАМИ

Известно, что влияние внешних условий и погрешность изготовления ртутных барометров и манометров учитывается при обработке измерений путем введения соответствующих поправок [1, 2]. Так, в показания ртутного манометра типа МБП и ртутных барометров типа КР, ИР, СР вводятся поправки шкалы, поправки на приведение показаний к нормальному ускорению свободного падения тел и поправки на приведение плотности ртути к 0°C (273 К), а длины шкалы к 20°C (293 К).

До 1977 г. заводы выпускали ртутные манометры и барометры с поправкой шкалы, которая определялась с учетом поправки на приведение плотности ртути и длины шкалы к 0°C (273 К). Температурная поправка вычислялась по формуле

$$\Delta B_t = \frac{-B_t(\alpha - \beta) \Delta t}{1 + \beta \Delta t}, \quad (1)$$

где B_t — показание барометра или манометра при температуре $t^\circ\text{C}$; $\Delta t = t_0 - t$; $t_0 = 0^\circ\text{C}$; α — температурный коэффициент линейного расширения шкалы, принятый до 1977 г. и равный $1,84 \times 10^{-5} (\text{C}^\circ)^{-1}$; β — температурный коэффициент объемного расширения ртути, равный $18,18 \cdot 10^{-5} (\text{C}^\circ)^{-1}$.

В настоящее время на сеть станций Госкомгидромета начали поступать манометры и барометры, в которых при обработке измерений плотность ртути, как и ранее, приводится к 0°C , а длина шкалы — не к 0°C , а к 20°C .

Вычисление поправок по технической документации разработанной заводом, должно производиться по формуле

$$\Delta B_t = -B_t[\beta t - \alpha(t - 20)], \quad (2)$$

где $\alpha = 2,05 \cdot 10^{-5} (\text{C}^\circ)^{-1}$.

Следует отметить, что формула (2) получена из формулы (1) с учетом приведения длины шкалы к 20°C и предположения, что

$$1 + \beta t \approx 1.$$

Однако для образцовых средств измерения и эталонов необходимы более точные значения поправки, которые можно получить применяя формулу в виде

$$\Delta B_t = - \frac{B_t[\beta t - \alpha(t-20)]}{1 + \beta t + \alpha(t-20)}. \quad (3)$$

В табл. 1 приведены температурные поправки, рассчитанные по формуле (3).

Таблица 1

Температура, °С	Давление, гПа (мбар)					
	500	550	600	650	700	750
10	-1,01	-1,11	-1,21	-1,31	-1,41	-1,51
20	-1,81	-1,99	-2,17	-2,35	-2,53	-2,71
30	-2,61	-2,87	-3,13	-3,39	-3,65	-3,92

Температура, °С	Давление, гПа (мбар)					
	800	850	900	950	1000	1050
10	-1,62	-1,72	-1,82	-1,89	-2,02	-2,12
20	-2,90	-3,07	-3,26	-3,44	-3,63	-3,81
30	-4,18	-4,44	-4,70	-4,96	-5,22	-5,49

Дальнейшее развитие системы единства измерений требует изменений в вычислении температурных поправок при измерении давления ртутными барометрами и манометрами, т. е. их следует рассчитывать по формулам (2) и (3).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карпуша В. Е., Чернов Б. С. Измерение атмосферного давления.— Л.: Гидрометеониздат, 1973.
2. Руководство по поверке метеорологических приборов.— Л.: Гидрометеониздат, 1967.

В. Ф. Фомин

К ВОПРОСУ КОНТРОЛЯ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ В АТМОСФЕРЕ

В настоящее время в практике измерений содержания компонента загрязнителя в воздушной среде широко применяются неавтоматические химические методы анализа.

Рассмотрим упрощенную схему анализа:

а) продувается известное количество атмосферного воздуха через подходящий поглотитель;

б) добавляют в поглотитель заданное количество определенного вещества, в результате чего поглотитель изменяет свою оптическую плотность;

в) измеряют оптическую плотность поглотителя и по ней определяют содержание измеряемого компонента в пробе.

Очевидно, что погрешность определения содержания измеряемого компонента складывается из многих составляющих, например, из погрешности измерения количества прокачиваемого воздуха, погрешности приготовления растворов, погрешности, вызванной неоднозначностью некоторых химических процедур, и т. д.

В связи с этим в настоящее время не удастся с приемлемой точностью оценить погрешность анализа состава атмосферы.

При наличии генераторов газовой смеси заданного состава для оценки точности химической методики анализа состава атмосферы используют методы дисперсного анализа.

Однако в случае, когда общепризнанная методика существует, возникает вопрос контроля правильности использования ее, т. е. задача оценки достоверности полученных результатов.

Ввиду сложности оценки суммарной погрешности анализа и, учитывая, что основная неопределенность оценки возникает при проведении химического анализа пробы, необходим контроль работы исследователя, который в сетевой лаборатории обычно осуществляется следующим образом: для проверки исследователю предлагается провести анализ определенного количества проб с неизвестным ему заданным содержанием компонента, после чего полученные результаты сравнивают с заданными. Сравнение можно проводить методом регрессионного анализа. В этом случае пред-

полагается, что зависимость между измеренным и заданным содержанием компонента в пробе линейна. Строится прямая уравнения регрессии, проходящая через начало координат, и проверяется гипотеза о равенстве коэффициента регрессии единице. В случае когда эта гипотеза не подтверждается, работа исследователя признается неудовлетворительной.

Этот метод оценки качества работы исследователя требует выполнения следующих условий:

а) закон распределения ошибок измерения содержания компонента в каждой пробе является нормальным,

б) дисперсии ошибок измерений для всех концентраций равны. Дисперсии ошибок измерения концентрации химическими методами путем измерения оптической плотности не равны. Поэтому для проведения оценки этим методом дополнительно определяются весовые коэффициенты, на которые умножается величина концентрации, полученная при обработке результатов измерений.

Для получения весовых коэффициентов, которые меняются при изменении класса используемой измерительной техники или замене приборов, необходим набор статистических данных и выполнение вышеуказанных предположений. Все это делает оценку работы исследователя сетевой лаборатории не всегда возможной либо очень трудоемкой и не позволяет быстро оценить правильность и квалификацию его работы.

Известны непараметрические методы оценки качества работы (например, критерий знаков), для применения которых не требуется никаких предварительных условий, за исключением предположения о том, что закон распределения ошибок измерений непрерывен, а этому требованию удовлетворяют все виды измерений. Поэтому, хотя использование непараметрического метода и приводит к увеличению ошибки 2-го рода по сравнению с ошибкой 2-го рода при использовании регрессионного анализа, этот метод для проведения быстрой оценки качества работы сетевой лаборатории при сравнительно небольшом статистическом материале представляется более удобным.

Проверка работы исследователя сетевой лаборатории и оценка результатов его измерений концентрации компонента в растворе непараметрическим методом состоит в следующем.

Для анализа специалисту, правильность работы которого проверяется, предлагают k различных растворов с известным содержанием измеряемого компонента y_j . Специалист проводит по три измерения концентрации компонента в каждом растворе и получает по три значения концентрации x_{ij} , где ($i=1, 2, 3; j=1, \dots, k$).

Таким образом, каждый раствор характеризуется функцией двух переменных $z_{ij}=f(y_j, x_{ij})$. Пусть

$$z_{ij} = \frac{y_j}{x_{ij}}, \quad (1)$$

тогда при правильном проведении анализа пробы все z_{ij} должны равняться единице. Таким образом, суть оценки работы специа-

листа заключается в проверке нулевой гипотезы $z_{ij}=1$. В случае, если полученные данные измерений удовлетворяют этой гипотезе, работа специалиста признается удовлетворительной, в противном случае — неудовлетворительной.

В результате вычислений получим $3k$ значений z_{ij} . Очевидно, что z_{ij} является случайной величиной с непрерывным законом распределения. Преобразуем случайную величину z_{ij} в случайную величину z'_{ij}

$$z'_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } 1 - z_{ij} > 0, \\ 0, & \text{если } 1 - z_{ij} < 0. \end{cases} \quad (2)$$

Случайные величины z'_{ij} , очевидно, независимы и поэтому с ними можно связать схему последовательных независимых испытаний, в которой вероятность $P\{z'_{ij}=1\}=1/2$ для каждого испытания. Следовательно, $\sum_{ij} z'_{ij}$ ($i=1, 2, 3, j=1, \dots, k$) распре-

делена по биномиальному закону $B(3k \cdot \frac{1}{2})$. Далее выбираем уровень значимости α , т. е. вероятность отвергнуть нулевую гипотезу, когда она в действительности верна.

Исходя из выбранного уровня значимости, определяем границы для $\sum z'_{ij}$, т. е. ее наибольшее и наименьшее значения, при которых с заданным уровнем значимости $z_{ij}=1$. Наибольшее значение суммы равно $r-1$, где r вычисляется по формуле

$$\frac{1}{2^{3k}} \sum_{v=0}^{3k-r} \binom{3k}{v} = 1 - B(r-1; n, \frac{\alpha}{2}) < \frac{\alpha}{2} \quad (3)$$

или, аппроксимируя биномиальный закон распределения нормальным, получим

$$1 - \Phi \left[\sqrt{[4(r-1) + 3] \cdot \frac{1}{2}} - \sqrt{[4 \cdot 3k - 4(r-1) - 1] \cdot \frac{1}{2}} \right] \leq \frac{\alpha}{2}. \quad (4)$$

Аналогично вычисляется наименьшее значение суммы $(S+1)$, где S вычисляется по формуле

$$\begin{aligned} \frac{1}{2^{3k}} \sum_{v=0}^S \binom{3k}{v} &= B(S; n, \frac{1}{2}) \approx \\ &\approx \Phi \left[\sqrt{(4S-3) \cdot \frac{1}{2}} - \sqrt{(4 \cdot 3k - 4S - 1) \cdot \frac{1}{2}} \right] \leq \frac{\alpha}{2}, \end{aligned} \quad (5)$$

Интервал $[S+1, r-1]$ с вероятностью $1-\alpha$ покрывает истинное значение $\sum_{ij} z_{ij}$. Если сумма внутри этого интервала, то работа специалиста признается удовлетворительной. В случае, когда сумма превышает значение $r-1$ или меньше $S+1$, можно сделать вывод, что результаты измерений, проведенные исследователем, систематически завышены или соответственно систематически занижены.

Использование вышеуказанного критерия упрощает процедуру анализа работы исследователя сетевой лаборатории, позволяя выявить систематические ошибки в работе, кроме того для использования его не требуется предварительного определения весовых коэффициентов и априорного предположения о нормальности распределения ошибок измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Браунли К. А. Статистическая теория и методология в науке и технике.— М.: Наука, 1977.
2. Уилкс С. Математическая статистика.— М.: Наука, 1967.
3. Шеффе Г. Дисперсионный анализ.— М.: Физматгиз, 1965.

А. А. Бузников, А. Ф. Полякова

СИСТЕМА СБОРА БОЛЬШОГО ОБЪЕМА ИНФОРМАЦИИ НА БАЗЕ МИНИ-ЭВМ

Современные мини-ЭВМ находят все большее применение в системах оперативной обработки экспериментальных данных.

Круг задач, связанных со сбором и обработкой данных самодельных измерений предполагает одновременное выполнение операций ввода больших массивов информации от нескольких устройств. Структура системы сбора в значительной степени зависит от количества и типов источников и приемников информации, от особенностей ее ввода и вывода, от типа используемой ЭВМ.

Устройство связи системы сбора информации с каждым из объектов должно состоять из коммутатора, аналого-цифрового преобразователя, контролера и интерфейсной карты. В связи с ограниченностью объема оперативной памяти (ОП) мини-ЭВМ целесообразно применение двухуровневой буферизации в двухтактном режиме работы. Между экспериментом и внешним запоминающим устройством-накопителем на магнитной ленте (НМЛ) включаются два буфера. В целях минимизации аппаратных затрат в качестве малого буфера (первый уровень буферизации) можно использовать один регистр данных. Большим буфером (второй уровень буферизации) будет являться часть ОП ЭВМ. Двухтактный режим работы буферизации позволяет производить одновременно запись данных от m пользователей системы в ОП и перепись информации из ОП на НМЛ.

К числу характерных особенностей мини-ЭВМ относится программное решение ряда функций ЭВМ, которые в больших ЭВМ обычно решаются схемным путем. Двухтактный режим буферизации может быть осуществлен с помощью режима условной программы передачи данных для записи каждого слова m -го пользователя в ОП и режима прямого доступа в память (ПДП) по окончании работы канала путем прерывания для переписи массива ячеек ОП на накопитель на магнитной ленте (НМЛ).

Использование одного канала ПДП для связи с НМЛ и программного ввода инициативных сигналов пользователей обеспечи-

вают структуру вычислительного комплекса с минимальными паратурными затратами.

Моменты обращения к ЭВМ каждого пользователя случайное каждое обращение представляет собой серию импульсов с частотой $f_i (i=1, m)$. Запись данных на НМЛ в режиме ПДП производится по специальным каналам, которые по мере надобности занимают циклы τ центрального процессора. ЭВМ проверяет наличие запросов в канале ПДП во время выполнения каждой команды программы. Если выявляется запрос на ПДП, следующий отрезок времени выделяется на передачу с ПДП, а выполнение программы задерживается на это же время.

Каждое из m устройств, подготовив информацию для ввода в ЭВМ, устанавливает в единицу флажок устройства. Будем предполагать, что обслуживание производится посредством циклического опроса всех флажков в порядке убывания частот f_i .

Если ЭВМ требуется время T на программную обработку входных данных, то в течение этого времени ЭВМ не может принимать другие входные данные. Интервал времени T называется мертвым временем системы сбора информации. Из-за наличия мертвого времени некоторые данные, возникшие в эксперименте, будут безвозвратно потеряны.

Сформулируем условие отсутствия потерь информации. Пусть T' — общее время обслуживания i -го пользователя с максимальной частотой сигналов $f_{\max}$ без учета занятия циклов. Время складывается из времени ожидания обслуживания i -го пользователя и собственно времени обслуживания

$$T' = T_{\text{ож}} + T_{\text{обсл.}}$$

В наихудшем случае

$$T_{\text{ож}} = (m - 1) (t_{\phi} - t_{\text{оп}}),$$

где t_{ϕ} — время опроса одного флажка, $t_{\text{оп}}$ — время записи одного слова в ОП. Тогда

$$T' = m(t_{\phi} + t_{\text{оп}}).$$

Применение режима ПДП увеличивает мертвое время системы, так как отодвигает момент окончания обслуживания

$$T = T' + \Delta T.$$

Для определения ΔT введем следующую модель. Будем считать, что в систему поступают требования двух приоритетов: одно требование низшего приоритета (НП), время обслуживания которого равно T' ; k требований высшего приоритета (ВП), поступающих в фиксированные моменты времени с интервалом $t_{\text{НМЛ}}$ равным времени записи одного слова на НМЛ при одновременной работе канала ПДП и процессора (в отличие от $t_{\text{НМЛ}}^{\text{м}}$, равного времени записи при мономольном режиме работы канала), время обслуживания каждого требования постоянно и равно τ .

С приходом каждого требования ВП обслуживание требования НП приостанавливается и момент окончания обслуживания требования НП отодвигается на интервал τ , так как при обмене ИДП не используется аккумулятор ЭВМ и содержимое рабочих устройств ЭВМ остается незатронутым. Для случая k требований ВП

$$\Delta T = k\tau$$

требование ВП приходит по отношению к некоторому рассматриваемому моменту времени t_0 с задержкой $t_{\text{зад}}$. Необходимо рассмотреть следующие два случая:

- а) $t_{\text{зад}} = 0$,
- б) $t_{\text{зад}} = t_{\text{нмл}} = \tau$.

Возьмем некоторый промежуток времени t , начиная с момента. Для случая «а» представим t в виде

$$t = bt_{\text{нмл}} + c\tau + q,$$

е

$$c \in \{0, 1\}; \quad q < t_{\text{нмл}} - \tau.$$

Число требований ВП, пришедших за интервал времени t , равно

$$k = b + c.$$

Для случая «б» представим t следующим образом:

$$t = bt_{\text{нмл}} + q,$$

е

$$q < t_{\text{нмл}} - \tau.$$

огда $k=b$.

Считаем, что случай «а» соответствует начальному моменту системы. Можно предложить следующий алгоритм определения числа занятых циклов k_j .

1. Начало.
2. $k:=0$. Перейти к п. 3.
3. $d_j:=T'$, где d_j — текущий интервал времени. Перейти к п. 4.
4. Представить d_j в виде $d_j = b_j t_{\text{нмл}} + c_j \tau + q_j$. Перейти к п. 5.
5. Проверить: $b_j=0$? Если да, перейти к п. 14. Если нет, перейти к п. 6.
6. $k_j:=k_j + b_j + c_j$ (имеем случай «а»). Перейти к п. 7.
7. $j:=j+1$.
8. $d_j:=k_{j-1}\tau + q_{j-1}$. Перейти к п. 9.
9. Представить d_j в виде $d_j = b_j t_{\text{нмл}} + q_j$. Перейти к п. 10.
10. Проверить: $b_j=0$? Если да, перейти к п. 14. Если нет, перейти к п. 11.
11. $k_j:=k_j + b_j$ (имеем случай «б»). Перейти к п. 12.

$$12. j := j + 1.$$

$$13. d_j := b_{j-1}\tau + q_{j-1}. \text{ Перейти к п. 9.}$$

14. Конец.

Как уже указывалось, вначале имеем случай «а». Для $j =$

$$d_1 = T'$$

и d_1 представляем в виде

$$d_1 = b_1 t_{\text{нмл}} + c_1 \tau + q_1.$$

На первом шаге число занятых циклов

$$k_1 = b_1 + c_1 = \left\lfloor \frac{d_1}{t_{\text{нмл}}} \right\rfloor + \left\lfloor \frac{d_1 - \left\lfloor \frac{d_1}{t_{\text{нмл}}} \right\rfloor t_{\text{нмл}}}{\tau} \right\rfloor,$$

где $\left\lfloor \frac{d_1}{t_{\text{нмл}}} \right\rfloor$ означает целое число, не большее $\frac{d_1}{t_{\text{нмл}}} = k'_1$.

Обозначим второе слагаемое

$$\left\lfloor \frac{d_1 - \left\lfloor \frac{d_1}{t_{\text{нмл}}} \right\rfloor t_{\text{нмл}}}{\tau} \right\rfloor = k'_0. \quad (1)$$

Тогда $k_1 = k'_1 + k'_0$

Учитывая, что происходит занятие k_1 циклов, для случая «а» по лучим

$$q_1 = d_1 - (k'_1 - 1) t_{\text{нмл}} - \tau.$$

Для $j=2$, учитывая, что имеем случай «б», представляем d в следующем виде:

$$d_2 = b_2 t_{\text{нмл}} + q_2.$$

Значение d_2 равно

$$d_2 = k_1 \tau + q_1.$$

Число занятых циклов на втором шаге

$$k_2 = b_2 = \left\lfloor \frac{d_2}{t_{\text{нмл}}} \right\rfloor,$$

$$q_2 = d_1 - k_2 t_{\text{нмл}}.$$

Для $j = \overline{3, \infty}$ имеем случай «б»:

$$d_j = k_{j-1} \tau + q_{j-1} = k_{j-1} \tau + d_{j-1} - k_{j-1} t_{\text{нмл}},$$

$$k_j = \left\lfloor \frac{d_j}{t_{\text{нмл}}} \right\rfloor.$$

Таким образом, число занятых циклов k определяется по следующей рекуррентной формуле:

$$k = k'_0 + \sum_{j=1}^{\infty} \left[\frac{d_j}{t_{\text{НМЛ}}} \right],$$

е

$$d_j = \begin{cases} d_1 & \text{для } j=1, \\ (k'_1 + k'_0)\tau + d_1 - (k'_1 + k'_0 - 1)t_{\text{НМЛ}} - \tau & \text{для } j=2, \\ k_{j-1}\tau + d_{j-1} - k_{j-1}t_{\text{НМЛ}} & \text{для } j=\overline{3, \infty}, \end{cases} \quad (2)$$

здесь k'_0 определяется из выражения (1),

$$d_1 = T'.$$

Для того чтобы экспериментальные данные не были потеряны, необходимо

$$T \leq \frac{1}{f_{\text{макс}}}. \quad (3)$$

Учитывая (3), сформулируем условие отсутствия потерь предложенной структуре с минимальными аппаратными затратами на базе мини-ЭВМ:

$$m(t_{\text{ф}} + t_{\text{оп}}) + \tau k'_0 + \tau \sum_{j=1}^{\infty} \left[\frac{d_j}{t_{\text{НМЛ}}} \right] \leq \frac{1}{f_{\text{макс}}}. \quad (4)$$

Значения k'_0 и d_j находим по формулам (1) и (2) соответственно. Так как для конкретной ЭВМ значения $t_{\text{ф}}$, $t_{\text{оп}}$, $t_{\text{НМЛ}}$, τ постоянны, выражение (4) определяет зависимость количества пользователей системы от максимальной частоты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Саати Т. Л. Элементы теории массового обслуживания и ее приложения.— М.: Сов. радио, 1971.
2. Соучек Б. Мини-ЭВМ в системах обработки информации.— М.: Мир, 1976.

СОДЕРЖАНИЕ

Н. П. Фатеев, В. А. Кузьмин, Д. Я. Блантер, А. Я. Ривлин. Измерение малых скоростей воздушного потока при поверке анемометров	
Б. Я. Толстобров, Н. П. Фатеев. Измерение скорости воздушного потока абсолютными методами	
Ю. В. Рогалев, Н. П. Фатеев. Методы поверки автоматических метеостанций с применением подвижных поверочных лабораторий	
В. В. Лячнев, Н. П. Фатеев. О формах представления результатов измерений	
Б. Л. Кожевников. Эффективность учета законов распределения погрешностей	
В. А. Клевандова, И. А. Покровская. К метрологической аттестации эталонного пиргелиометра Госкомгидромета	
В. А. Клевандова, И. А. Покровская, Л. Е. Шебелина. Экспериментальное определение погрешностей поверки гальванометров ГСА-1МА и ГСА-1МБ	
В. А. Клевандова, И. А. Покровская, Л. Е. Шебелина. Оценка случайных погрешностей при определении переводного множителя чувствительности пиранометров	
В. А. Клевандова, И. А. Покровская. Проект поверочной схемы для средств измерений энергетической освещенности радиацией Солнца	
Д. Я. Блантер, Ю. В. Рогалев. Результаты метрологической аттестации образцовых аэродинамических труб	
Г. П. Резников, И. А. Соков. Метрологическая аттестация термогигростата «Бриз»	
Н. Н. Климкин, Г. П. Резников, Б. И. Толстухин, Н. П. Фатеев, Л. А. Ядова. Разработка и исследование методики градуировки и поверке пневмоанемометра для измерения скорости аспирации психрометров	
В. Ю. Окоренков. Обоснование межповерочных интервалов для образцовых барометров УГКС	
В. Ю. Окоренков. О методике исследования рабочих эталонных барометров в период эксплуатации и хранения	1
Г. И. Тетерев. О температурной поправке при измерении атмосферного давления ртутными барометрами и манометрами	1
В. Ф. Фомин. К вопросу контроля точности измерения содержания загрязнений в атмосфере	1
А. А. Бузников, Л. Ф. Полякова. Система сбора большого объема информации на базе мини-ЭВМ	12

Труды ГГО, вып. 432

МЕТОДИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ВОПРОСЫ ПОВЕРКИ
МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ

Редактор Г. А. Солдатов. Техн. редактор Л. М. Шишкова. Корректор Т. Н. Черненко

Дано в набор 4.02.80. Подписано в печать 22.01.81. М-16430. Формат 60×90^{1/16}, бумага тип. № 1.
Шрифт литературный. Печать высокая. Печ. л. 8,5. Всего кр. отт. 8,75. Уч.-изд. л. 8,58.
Тираж 650 экз. Индекс МЛ-222. Заказ № 693. Цена 60 коп. Заказное.

Гидрометеиздат. 199053. Ленинград, 2-я линия, 23.

Сортавальская книжная типография Управления по делам издательств, полиграфии и книжной
торговли Совета Министров Карельской АССР. Сортавала, Карельская, 42.

