

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР
ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ
И КОНТРОЛЮ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

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

Выпуск

510

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
И ВОПРОСЫ ПОВЕРКИ
МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ

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



ЛЕНИНГРАД ГИДРОМЕТЕОИЗДАТ 1986

06
Т 78

УДК 551.501 + 551.508.824 :389

В сборнике представлены результаты метрологических исследований рабочего эталона скорости воздушного потока, рассматриваются методики оценки погрешностей измерения метеорологических информационно-измерительных систем и приборов, приводятся результаты поверки систем на месте эксплуатации. Часть работ посвящена вопросам надежности работы приборов и методике расчета оптимальных межповерочных интервалов средств измерений.

338875

Иркутский
Геофизический ин-т
БИБЛИОТЕКА
Л-д К-196, Малохтенский пр., 98

М 1903040000- 130
069 (02) -86 47-86 (1)

©

Главная Геофизическая
обсерватория им. А. И. Воей-
кова (ГГО), 1986 г.

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОЧЕГО ЭТАЛОНА ЕДИНИЦЫ СКОРОСТИ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА

В настоящее время в СССР разработано и используется большое количество разнообразных приборов для измерения скорости воздушного потока. Только в системе Госкомгидромета СССР парк средств измерения (СИ) скорости ветра превышает 100 тысяч единиц. В целях метрологического обеспечения этих СИ были разработаны ведомственные поверочные схемы /1, 2/, однако в масштабах страны единство измерений в этой области отсутствует в связи с отсутствием государственного эталона, который необходим для хранения и передачи размера единицы скорости потока образцовым и рабочим СИ.

В ВНИИМ им. Д. И. Менделеева и ГГО им. А. И. Воейкова были разработаны макеты рабочего эталона единицы скорости воздушного потока. Рабочий эталон будет применяться в системе Госкомгидромета СССР и храниться в ГГО им. А. И. Воейкова. Основные метрологические характеристики эталона приведены в табл. 1.

Таблица 1

Метрологические характеристики	Диапазон, погрешность
Диапазон измерения скорости потока воздуха, м/с	0,2—60,0
Суммарная погрешность (выраженная в виде доверительной границы погрешности при сличении с первичным эталоном) при доверительной вероятности $P = 0,99$:	
— на нижнем пределе, м/с	$\pm 0,052$ (20 %)
— на верхнем пределе, м/с	$\pm 0,6$ (1 %)
Нестабильность эталона в течение года, не более :	
— на нижнем пределе, м/с	$\pm 0,02$
— на верхнем пределе, м/с	$\pm 0,06$

В состав эталона входят три измерителя скорости:

- термоанемометрический с использованием вихревого анемометра; диапазон измерения 0,2—3,0 м/с;
- механический, основанный на преобразовании энергии воздушного потока во вращательное движение крыльчатки анемометра; диапазон 0,5—7,0 м/с;

— пневмометрический с использованием напорных трубок; диапазон 5,0—60 м/с.

Такой набор СИ позволяет осуществить измерение скоростей воздушных потоков во всем требуемом диапазоне скоростей 0,2—60,0 м/с с некоторым взаимным перекрытием и с погрешностью (Δ) не более $\pm(0,05 + 0,01 v)$ м/с. В комплект рабочего эталона должна входить также образцовая аэродинамическая труба.

В зависимости от измеряемой скорости воздушного потока в рабочем участке аэродинамической трубы (АТ) устанавливаются первичные измерительные преобразователи (ПИП) соответствующих СИ: трубка Пито дифференциальная, механический измеритель скорости и набор ПИП вихревого анемометра. Электрические сигналы, пропорциональные измеряемой скорости воздушного потока, регистрируются соответствующими вторичными измерительными приборами и по градуировочным зависимостям с помощью микрокалькулятора пересчитываются в текущее значение скорости.

Рассмотрим принципы действия и основы теории измерителей, используемых в составе рабочего эталона.

Вихревой измеритель скорости потока (ВИС). Принцип действия ВИС основан на зависимости частоты вихревых колебаний, возникающих при обтекании твердых тел потоком жидкости или газа, от скорости потока.

Впервые закономерности и количественное исследование явления образования вихревых колебаний были выполнены Струхалем Г. Оказалось, что частота вихревых колебаний пропорциональна скорости потока и обратно пропорциональна диаметру (форме) обтекаемого тела:

$$F = \gamma \frac{v}{d}, \quad (1)$$

где F — частота вихревых колебаний; γ — безразмерный коэффициент; v — скорость потока; d — характерный размер обтекаемого тела.

Дальнейшее объяснение этого явления дал Карман [3], который показал, что при обтекании тела потоком образуются вихри, периодически срывающиеся с краев препятствия (тела) и распространяющиеся затем в виде регулярной (обычно двумерной) вихревой дорожки. Дорожка Кармана наблюдается в интервале значений чисел Рейнольдса от 60 до 5000. Такие дорожки представляют собой последовательности вихрей, расположенных в шахматном порядке через равные интервалы. Из гидродинамической теории невязкого и вязкого течений следует, что вихревые дорожки можно экспериментально создать в воздухе, при этом частота периодического отрыва вихрей является важным параметром течения. Карман нашел, что система вихрей будет устойчивой относительно двумерных бесконечно малых смещений при условии:

$$\text{Sh} \frac{\pi r}{l} = 1$$

и

$$\frac{h}{l} = 0,281, \quad (2)$$

где l — горизонтальное расстояние между вихрями; h — вертикальное расстояние между вихрями. В общем случае поток может быть устойчивым при всех значениях h/l , если рассматривать средние значения h и l . Неустойчивость связана только с периодичностью.

Каждый раз при срыве вихря непосредственно за обтекаемым телом образуется импульс давления, который может зарегистрировать приемник колебаний, расположенный за препятствием. Сама вихревая дорожка не является источником колебаний. Непосредственно вихрь представляет собой устойчивую вращающуюся систему газа по которой можно судить о значении скорости потока, который индуцировал этот вихрь.

Измерительные приборы, принцип действия которых основан на вихревых явлениях при обтекании тел потоком, нашли применение при измерении скорости потока [3]. В них в качестве вихревых преобразователей (генераторов вихрей), используются тела с треугольным и цилиндрическим сечением. При создании рабочего эталона единицы скорости воздушного потока были выполнены макеты вихревых преобразователей с треугольным, цилиндрическим и квадратным сечением. Результаты измерений показали работоспособность таких преобразователей в диапазоне скоростей 0,2–6,0 м/с с регистрацией частот в диапазоне соответственно 2–200 Гц. Исследования ВИС осуществлялись как в двухсупловой аэродинамической трубе (АТ), так и с помощью лазерного анемометра фирмы "Малверн". Градуировку ВИС целесообразно осуществлять отдельно для всех трех тел. Возможность такой градуировки обусловлена частотно-модулированным характером сигнала ПИП, при этом должно отсутствовать воздействие регистрирующих блоков на ПИП, а работа регистрирующего блока не должна зависеть от амплитуды и формы частотно-модулированного сигнала. Достаточно высокая точность отдельной градуировки ВИС объясняется тем, что частотно-модулированный сигнал приемного преобразователя легко интегрируется, т. е. достаточно подсчитать общее число периодов сигнала в зависимости от скорости потока. При этом среднее значение частоты F_{cp} равно:

$$F_{cp} = \frac{1}{t}, \quad \int_0^t f dt = \frac{N}{t}, \quad (3)$$

где N — число периодов сигнала, t — время осреднения.

Регистрирующий преобразователь является, по существу счетчиком числа импульсов, точность его градуировки обеспечивается кварцевыми образцовыми источниками частоты и образцовыми частотомерами. Погрешность при поверке счетчиков импульсов составляет ± 1 импульс или $0,01\%$.

Оценка случайных погрешностей осуществлялась при градуировке ВИС, когда снимались экспериментальные зависимости выходной частоты $F_{\text{вых}}$ для ПИП от значений скорости воздушного потока $F_{\text{вих}} = f(\gamma)$ для всех трех тел (треугольник, цилиндр, квадрат) в трех отрезках диапазона. На каждой из отметок диапазона осуществлялось по 25 измерений и определялось значение σ . Значения σ для трех отметок диапазона не превысили $\pm 0,15\%$. Границы доверительного интервала, при заданной доверительной вероятности $P = 0,99$, рассчитывались по формуле:

$$\epsilon = t\sigma, \quad (4)$$

где t — коэффициент Стьюдента, равный $t = 2,576$ для $P = 0,99$ и $\sigma = 25$. Откуда $\epsilon_1 = \pm 2,576 \cdot 0,0015 = 0,003864$ или $\pm 0,4\%$. Предельно допустимые погрешности для блоков электроанемометра и частотомера, работающих совместно с ПИП, определенные по той же методике, соответственно равны: для блоков электроанемометра $\epsilon_2 = \pm 0,2\%$; для частотомера $\epsilon_3 = \pm 0,3\%$. Погрешность поверки составила $\Delta = \pm 0,2\%$.

При анализе систематических погрешностей можно выделить три составляющие: инструментальная погрешность Δ_1 ; погрешности, возникающие вследствие внешних влияющих факторов и свойств измеряемой среды Δ_2 ; методические погрешности Δ_3 . ВИС не имеют подвижных элементов в измеряемом потоке, поэтому инструментальные погрешности являются следствием несовершенства технологии при изготовлении приборов. Составляющие Δ_1 , возникшие за счет неточности при изготовлении приборов, могут быть устранены при сравнениях с Государственным специальным эталоном единицы скорости потока воздуха. Исследования составляющей погрешности Δ_2 , возникающей за счет внешних влияний и свойств измеряемой среды, показали, что изменение плотности газа не сказывается на результатах измерения. Реально, пульсирующий поток (вихрь) находится в области заполненной газом той же плотности. Следовательно, плотность не сказывается на распределении сил, действующих на вращающийся вихрь. Теоретически при измерении газовых потоков влияние плотности, в принципе, может сказаться за счет сжимаемости газа. Однако эти силы настолько незначительны, что в эксперименте ее влияние обнаружить не удалось. Температура измеряемого потока влияет на значение плотности воздуха. Кроме этого, температура измеряемой среды влияет на размеры вихреобразователя ВИС. Выражение (2)

показывает зависимость выходной частоты от геометрического размера вихреобразователя. Дополнительной погрешности от температуры измеряемой среды в диапазоне от $+10$ до $+30$ °С для вихреобразователя изготовленного, например, из сплава инвара не превышает $\pm 0,01$ %.

Влияние пространственной ориентации определялось с помощью координатного устройства с отклонениями $\pm 5^\circ$ по горизонтали и вертикали. Проведенные измерения показали, что эти отклонения не выходили за пределы нормированной основной погрешности.

Турбулентные пульсации набегающего воздушного потока оказывают влияние на выходную частоту с ПИП ВИС при интенсивности турбулентных пульсаций более 4 %. Для исключения этой систематической погрешности необходимо предъявлять определенные требования к создаваемому воздушному потоку, в котором производятся измерения. Пульсации потока не должны превышать 4 %.

Составляющая, обусловленная методической погрешностью Δ_3 , функционально представляет собой зависимость, связывающую значение скорости с частотой вихреобразования, теоретически является линейной (см. (2)). Выражение (2) учитывает и влияние вязкости в виде постоянного коэффициента γ . В диапазоне чисел Рейнольдса $10^{-3} \dots 10^{-6}$ это влияние незначительно, но все же может быть учтено. В диапазоне чисел Рейнольдса от 10^3 и выше эта составляющая погрешности не превышает $\pm 0,15$ %. Заранее учесть и исключить ее представляет определенную трудность, поэтому ее можно учесть лишь при обработке результатов измерений.

Механический измеритель скорости потока (МИС). Измеритель скорости, основанный на механическом методе, является СИ в котором кинетическая энергия движущегося потока преобразуется во вращательное движение оси крыльчатки. Для измерения малых скоростей весьма важно, чтобы трение в осях ветроприемника имело по возможности ничтожное значение. С одной стороны, это может быть достигнуто путем увеличения вращающего момента на оси по сравнению с моментом трения на ней за счет увеличения площади крыльев ветроприемника и расположения их на значительном радиусе от оси вращения. Однако увеличение этих размеров главным образом будет сказываться на инерционности движущихся частей МИС. Инерционность движущихся частей становится слишком большой и, как следствие, МИС не будет с достаточной чувствительностью воспринимать изменения скорости воздушного потока, т. е. его показания будут заметно отличаться от средней скорости потока воздуха.

Одной из важнейших характеристик МИС является порог реагирования v_0 (начальная чувствительность). Диапазон измеряемых скоростей МИС равен 0,5 ... 7,0 м/с, предел допускаемой погрешности измерения скорости нормирован аддитивно-мультипликативной формулой вида:

$$\Delta_d \leq \pm (0,05 + 0,01 v_{из}) \text{ м/с.} \quad (5)$$

Из (5) видно, что нижнее значение скорости воздушного потока (0,5 м/с) может быть измерено с погрешностью $\pm 0,055$ м/с, т. е. $\pm 11\%$. Эта погрешность в основном определяется v_0 и его нестабильностью в процессе эксплуатации.

Значение v_0 зависит от суммарных моментов трения, приведенных к оси вращения ветроприемника. Количественно v_0 измеряется скоростью потока v_0 , при которой момент аэродинамических сил равен моменту трения. Моменты трения и нагрузки на ось ветроприемника особенно существенно влияют на начальный участок градуировочной кривой в пределах диапазона измерения от v_0 до $10v_0$.

Проанализируем источники погрешностей МИС. Градуировочное уравнение винтового измерителя скорости с учетом вязкого трения воздуха и профильного сопротивления имеет вид:

$$\omega_0 r = v_H \operatorname{tg} \alpha \frac{1 + \frac{c_x}{c_y}}{1 + \frac{c_x}{c_y} \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha}, \quad (6)$$

где ω_0 — угловая скорость; r — радиус центра приложения аэродинамических сил; v_H — скорость набегающего воздушного потока; α — угол поворота (атаки) лопасти; c_y — коэффициент аэродинамической силы, направленный перпендикулярно лопасти ($c_y = 1,24$); c_x — коэффициент аэродинамической силы, направленный вдоль сечения лопасти ($c_x = 0,03$).

Момент аэродинамических сил $M_{аа}$, действующих на вращающийся винт при установившемся вращении, равен моменту трения и нагрузки на ось $M_{тр}$, т. е. $M_{аа} - M_{тр} = 0$, $v = v_0$ и $\omega = \omega_0$. Тогда для установившегося вращения выражение (6) преобразуется к виду:

$$\omega_0 r = v_0 k = v_0 \operatorname{tg} \alpha \frac{1 - \frac{c_x}{c_y}}{1 + \frac{c_x}{c_y} \operatorname{tg}^2 \alpha} \left(1 - \frac{v_H^2}{v_0^2 \sqrt{1 + \left(\frac{\omega_0 r}{v_0} \right)^2}} \right), \quad (7)$$

где k — коэффициент винтового измерителя скорости с учетом трения по осям.

Относительная погрешность для винтового измерителя скорости, при

$$\operatorname{tg} \alpha = 1 \text{ и } \frac{1 - c_x/c_y}{1 + c_x/c_y \cdot \operatorname{tg} \alpha} \sim 1, \text{ будет равна}$$

$$\delta = - \frac{v_H^2}{v_0 \sqrt{1 + (\omega_0 r / v_0)^2}}. \quad (8)$$

Как видно из (8) относительные погрешности зависят от отношения v_H/v_0 , т. е. погрешность уменьшается с увеличением скорости воздушного потока. На скорости $v_0 = 0,5$ м/с при начальной чувствительности $v_H = 0,18$ м/с значение $\delta = 9,3\%$.

На работу МИС оказывает существенное влияние интенсивность турбулентных пульсаций, особенно в диапазоне малых скоростей близких к v_0 . Проанализируем погрешности для этого случая. Относительную погрешность измерения можно вычислить по уравнению вида:

$$\delta = \frac{1}{\pi} \left[\arcsin \left(\frac{1 - v_H/v}{A/v_1} \right) - \frac{\pi}{2} + \sqrt{\left(\frac{A}{v_1} \right)^2 - \left(1 - \frac{v_H}{v_1} \right)^2} \right], \quad (9)$$

где v_H — начальная скорость; v_1 — значение скорости воздушного потока; A — амплитуда пульсации скорости. При скорости воздушного потока $v_1 = 0,5$ м/с значение $\delta = 0,32\%$.

Составляющую погрешности, вызванную неправильностью установки ветроприемника МИС по потоку, можно отнести к систематической погрешности. При угле отклонения даже в 10° эта погрешность не превышает $0,5\%$.

Систематическую погрешность в результаты измерения вносит и отклонение плотности воздуха ρ от нормальных условий. Эту погрешность можно устранить за счет введения поправки в градуировочную зависимость вида $v = F(v)$.

Погрешность измерения числа оборотов складывается из погрешности считывающего устройства и погрешности частотомера. Погрешность считывающего устройства, примененного в МИС составляет $\delta = 1/N$, где N — количество отверстий в кодовом диске, поэтому $\delta = 1\%$. Погрешность измерения применяемого частотомера пренебрежимо мала по отношению к этой величине.

Пневмометрический измеритель скорости (ПИС). Принцип действия подобного измерителя основан на применении уравнения Бернулли и подробно освещен в литературе /7/.

Перейдем к анализу погрешностей измерителя. Для исключения дополнительных погрешностей от влияния отклонения плотности воздуха от нормальных условий в качестве расчетной формулы для расчета

измеренной скорости воздушного потока используется выражение

$$v = \sqrt{42,2 \frac{273 + t}{P_{\text{атм}}} \left(1 - 0,378 \varphi \frac{\Delta P_{\text{ип}}}{P_{\text{атм}}} - 1 \Delta P\right)} \quad (10)$$

где t — температура воздуха в °С; P — атмосферное давление в момент измерения в гПа; φ — относительная влажность воздуха в %; $P_{\text{ип}}$ — давление насыщенных паров; ΔP — разность давлений, измеренная дифференциальным манометром.

Суммарная погрешность ПИС складывается из случайных погрешностей определения коэффициента напорной трубки δ_1 , преобразователя давления δ и регистрирующего прибора δ_3 . Все составляющие суммарной погрешности независимы и при нормальном законе распределения составляющих суммарная погрешность может быть рассчитана по формуле

$$\Sigma \delta = \sqrt{\delta_1^2 + \frac{1}{\Delta} (\delta_2^2 + \delta_3^2)}. \quad (11)$$

Расчет дополнительных погрешностей при измерении параметров воздуха Δt , $\Delta P_{\text{атм}}$, ΔP и $\Delta \varphi$, которые будут влиять на его плотность, можно вычислить по уравнениям для частных погрешностей:

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \frac{1}{2} \left[\frac{11521 \cdot t}{P_{\text{атм}}} \left(\frac{P_{\text{атм}} \Delta P}{P_{\text{атм}} \cdot 0,378 \varphi \Delta P_{\text{ип}}} \right) \right]^{-1/2} \times \left(\frac{11521 \Delta P}{P_{\text{атм}} - 0,378 \Delta P_{\text{ип}}} \right), \quad (12)$$

$$\frac{\partial v}{\partial P_{\text{атм}}} = \frac{1}{2} \left[\frac{11521 \cdot t}{P_{\text{атм}}} \left(\frac{P_{\text{атм}} \Delta P}{P_{\text{атм}} \cdot 0,378 \varphi \Delta P_{\text{ип}}} \right) \right]^{-1/2} \times \left(\frac{11521 \cdot t \Delta P}{P_{\text{атм}} - 0,378 \Delta P_{\text{ип}}} \right), \quad (13)$$

$$\frac{\partial v}{\partial \Delta P} = \frac{1}{2} \left(\frac{11521 \cdot t \Delta P}{P_{\text{атм}} - 0,378 \varphi \Delta P_{\text{ип}}} \right)^{-1/2} \times \left(\frac{11521 \cdot t}{P_{\text{атм}} - 0,378 \varphi \Delta P_{\text{ип}}} \right), \quad (14)$$

$$\frac{\partial v}{\partial y} = \frac{1}{2} \left(\frac{11521}{P_{\text{атм}} - 0,378 \varphi \Delta P_{\text{ип}}} \right)^{-1/2} \times$$

$$\times \left[- \frac{11521 \cdot \Delta P}{0,378 \Delta P_{\text{ип}} \left(\frac{P_{\text{атм}}}{0,378 \Delta P_{\text{ип}}} \right)} - \varphi \right]^2. \quad (15)$$

Для обеспечения заданной точности измерения скорости воздушного потока пневмометрическим методом, погрешность измерения перепада давления P не должна превышать 4 %. При измерении температуры с погрешностью $\pm 0,1$ % дополнительная погрешность не превысит $\pm 0,02$ %. При измерении P с погрешностью $1 \cdot 10^2$ Па дополнительная погрешность не превысит 0,06 %. При измерении φ с погрешностью ± 5 % дополнительная погрешность не превысит $\pm 0,02$ %. Численная оценка дополнительных погрешностей производилась по формулам (12), (13), (14) и (15). Таким образом, экспериментальные исследования всех трех типов измерителей скорости воздушного потока показали, что они соответствуют требованиям по точности, предъявляемым к рабочему эталону.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ф а т е е в Н. П. Поверочные схемы для метеорологических измерений. — Л., Гидрометеоиздат. Труды ГГО, 1973, вып. 313, с. 145—155.
2. Ф а т е е в Н. П. Передача размеров единиц физических величин и научно-технические мероприятия по разработке и внедрению локальных поверочных схем гидрометслужбы для метеорологических измерений. — Л., Гидрометеоиздат. Труды ГГО, 1978, вып. 414, с. 9—19.
3. V a m a s a k V. H. Development of the vortex blvmeter. — Journ. Zap., Petrob Just, 1971, N 8.
4. П р о т о п о в Н. Г. Проектирование ветроизмерительных приборов. — Л., Гидрометеоиздат, 1976.

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПОГРЕШНОСТИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ВЕТРА ПРИ ИХ ПОВЕРКЕ

В работе /1/ показано, что суммарная погрешность измерения скорости ветра существующими средствами измерений (СИ) складывается из погрешности, обусловленной наличием сил трения в механизме передачи вращения ветроприемника (погрешность нуля), погрешности, обусловленной преобразованием механического (силового) давления потока воздуха на ветроприемник (чашка или винт) в электрическую величину и погрешности из-за неидентичности изготовления ветроприемников.

Для всех без исключения СИ скорости ветра предел допускаемой основной погрешности $\Delta_{д(СИ)}$ нормируется двучленной формулой, представляющей собой сумму аддитивной и мультипликативной составляющих погрешности.

Аддитивная составляющая погрешности (погрешность нуля v_0) неизменна по диапазону измерения скоростей и, в зависимости от типа винтового или чашечного ветроприемников различных конструкций, колеблется в пределах $v_0 = 0,3 \dots 1,0$ м/с.

Мультипликативная составляющая погрешности обусловлена изменением коэффициента преобразования механического вращения ветроприемника в электрическую величину, которая линейно возрастает с увеличением измеряемой скорости $v_{изм}$.

Исходя из этого, формула для нормирования $\Delta_{д(СИ)}$ имеет вид:

$$\Delta_{д} = \pm (\Delta v_0 + b v_{изм}) \text{ м/с.} \quad (1)$$

Многочисленные экспериментально исследования различных типов СИ скорости ветра показали, что значение коэффициента не превышает 5 % от измеряемой $v_{изм}$. Тогда выражение (1) можно представить в виде

$$\Delta_{д(СИ)} = \pm (\Delta v_0 + 0,05 v_{изм}) \text{ м/с.} \quad (2)$$

В подавляющем большинстве СИ скорости ветра поверяются в аэродинамических трубах (АТ) путем сличения их показаний с образцовыми СИ. При аттестации АТ также определяют ее погрешность $\Delta_{д(АТ)}$, причем выражение для $\Delta_{д(АТ)}$ аналогично выражению (1). По результатам аттестаций ряда АТ установлено, что значение $\Delta_{д(АТ)}$ не превышает

$$\Delta_{д(АТ)} \leq (0,25 + 0,02 v_{изм}) \text{ м/с.} \quad (3)$$

Проанализируем далее из чего будет складываться погрешность поверки. В общем виде ее можно представить суммой трех составляющих

$$\Sigma \Delta_{\text{пов}} = \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3, \quad (4)$$

где Δ_1 — составляющая, обусловленная характеристиками воздушного потока в рабочей зоне АТ (зона установки поверяемого СИ), Δ_2 — составляющая, обусловленная погрешностью применяемого образцового СИ в АТ, Δ_3 — составляющая, обусловленная погрешностью от загромождения потока поверяемым СИ.

Составляющие Δ_1 и Δ_2 в (4) в первом приближении можно считать функционально связанными между собой, так как реальное значение характеристик воздушного потока в рабочем сечении АТ будет в конечном итоге определяться с погрешностью, которая приписана (нормирована) для применяемого образцового СИ. Современные конструкции АТ позволяют создавать воздушные потоки хорошего качества (малая интенсивность турбулентных пульсаций, равномерное поле скоростей в рабочей зоне АТ, хорошая стабильность потока во времени и т. п.), что в свою очередь позволяет сводить влияние составляющей Δ_1 к минимуму. Это неоднократно подтверждалось при аттестациях (или переаттестациях) образцовых АТ /3, 4/. Составляющая Δ_3 относится к методической погрешности, которая может возникнуть при несоблюдении требуемого соотношения между площадью проекции лопастей (или чашек) поверяемого СИ к площади поперечного сечения рабочей зоны АТ /2/. Используемые для поверки АТ имеют сечения рабочей зоны такие, что это соотношение не является источником возникновения погрешности Δ_3 (она пренебрежимо мала и ею можно пренебречь).

Таким образом, погрешность поверки $\Delta_{\text{пов}}$ будет определяться составляющей Δ_2 , т. е.

$$\Delta_{\text{пов}} = \Delta_2 = \pm (0,25 + 0,02v_{\text{изм}}) \text{ м/с.} \quad (5)$$

Однако в реальных условиях поверки погрешность поверяемого СИ складывается из погрешности поверки ($\Delta_{\text{пов}}$), погрешности образцового СИ ($\Delta_{\text{обр}}$) и погрешности поверяемого СИ ($\Delta_{\text{СИ}}$ — погрешность, нормированная выражением (2)):

$$\Sigma \Delta_{\text{д}}(\text{СИ}) = \Delta_{\text{пов}} + \Delta_{\text{обр}} + \Delta_{\text{СИ}}. \quad (6)$$

Анализ (6) показывает, что возникает задача суммирования погрешностей выраженных двучленными формулами с аддитивно-мультипликативными составляющими. Причем, такое суммирование должно осуществляться как в конкретной поверяемой отметке диапазона измерения, так и для всего диапазона измерения в целом.

В выражении (6), как было показано выше, составляющие и $\Delta_{обр}$ тождественно равны и нормированы выражением (5), т. е. окончательно выражение (6) перепишем в виде:

$$\Sigma \Delta_{д(СИ)} = \Delta_{СИ} + \Delta_{обр} \quad | \quad \Delta_{пов} = 2. \quad (7)$$

С учетом выражений (2) и (3) выражение (7) в развернутом виде перепишем в следующем виде:

$$\Sigma \Delta_{д(СИ)} = (0,5 + 0,05v_{изм})_{СИ} + (0,25 + 0,02v_{изм})_{обр}. \quad (8)$$

При проверке СИ скорости ветра определяют погрешность (или поправку) Δv_i на i -той отметке диапазона, представляющую собой разность между показаниями поверяемого СИ и применяемого образцового СИ в значениях скорости потока, причем Δv_i не должна превышать нормированного значения $\Delta_{д(СИ)}$ по (2):

$$\Delta v_i \leq v_{СИ} - v_{обр} \quad (9)$$

или

$$\Delta v_i \leq \pm (0,5 + 0,05v_{изм}) \text{ м/с.} \quad (9)$$

При каждом измерении значение Δv_i в (9) практически уже включает в себя две составляющие погрешности $\Delta_{СИ}$ и $\Delta_{обр}$, где под погрешностью $\Delta_{обр}$ принимается погрешность, нормированная выражением (3).

Таким образом мы, опять возвращаемся к задаче суммирования двучленных формул с аддитивно-мультипликативными составляющими вида (7), (8).

Такое суммирование можно осуществлять при соблюдении следующих условий:

- максимальные значения аддитивных и мультипликативных составляющих суммарной погрешности эквивалентны доверительным значениям;

- математическое ожидание каждой составляющей равно нулю (отсутствуют систематические погрешности);

- закон распределения соотношения между доверительными значениями и среднеквадратическим отклонением для аддитивных и мультипликативных составляющих близки по форме.

Если составляющие взаимно независимы, то заменив среднеквадратические отклонения доверительными значениями аддитивной и мультипликативной составляющими, формулу суммирования можно представить в виде

$$\Delta_{д(СИ)} = \sqrt{\Delta_{ад}^2 + (\Delta_{м} \cdot v_{изм})^2} \quad (10)$$

где $\Delta_{ад}$, $\Delta_{м}$ — соответственно, аддитивная и мультипликативная составляющие погрешности.

Тогда, с учетом (10) выражение (1) можно переписать в виде:

$$\Sigma \Delta_{д(СИ)} = \sqrt{(\sum_{l}^n v_0)^2 + (\sum_{l}^n k \cdot v_{изм})^2} \quad (11)$$

Для оценки $\Delta_{д(СИ)}$ по результатам поверки, используя выражение (8), получим:

$$\Sigma \Delta_{д(СИ)} = \sqrt{[\sum_{l}^n (v_0)_{пов}]^2 + [\sum_{l}^n (v_0)_{обр}]^2 + [\sum_{l}^n (k \cdot v_{изм})_{пов}]^2 + [\sum_{l}^n (k \cdot v_{изм})_{обр}]^2} \quad (12)$$

В выражении (12) первые два члена под корнем есть величины постоянные для конкретного типа СИ и применяемого образцового СИ по значениям их порогов реагирования v_0 . Действительно, по (2) и (3) значения v_0 соответственно равны $v_{0(пов)} = 0,5$ м/с, $v_{0(обр)} = 0,25$ м/с и они остаются постоянными по всему диапазону измерения. Исходя из этого выражение (12) можно несколько упростить; введя постоянный коэффициент:

$$\Sigma \Delta_{д(СИ)} = \sqrt{0,31 + [\sum_{l}^n (k \cdot v_{изм})_{пов}]^2 + [\sum_{l}^n (k \cdot v_{изм})_{обр}]^2} \quad (13)$$

По выражению (12) при известных составляющих в (6) можно рассчитывать предел допускаемой погрешности $\Delta_{д(СИ)}$.

Нормирование погрешности выражением (11), или развернутыми его видами (12), (13) будет наиболее соответствовать требованиям статистической теории и реально отражать оценку $\Delta_{д(СИ)}$, полученную при поверке СИ скорости ветра.

В таблице 1 приведены значения Δv_i по результатам поверки анеморумбометра М-63М-1 в образцовой АТ по нескольким отметкам диапазона измерения.

Таблица 1

$v_{АТ}$, м/с	$v_{пов}$, м/с	Δv_i , м/с	$v_{АТ}$, м/с	$v_{пов}$, м/с	Δv_i , м/с
4,5	5,1	0,6	14,0	14,3	0,3
5,8	6,0	0,2	20,1	19,7	-0,4
9,5	9,3	-0,2	23,2	22,7	-0,5
10,4	9,9	-0,5	24,8	24,1	-0,7
12,5	11,9	-0,6	26,5	27,0	0,5

Как отмечалось выше, в каждом единичном отсчете значения скорости по АТ ($v_{АТ}$) уже присутствует погрешность нормированная по (3), а в отсчете значения скорости по поверяемому СИ ($v_{пов}$), соответственно, входит погрешность, нормированная по (9). Если считать, что погрешность поверяемого СИ ($\Delta_{СИ}$) определяется разностью показаний между скоростью, измеренной образцовым СИ ($v_{обр}$) и скоростью, измеренной поверяемым СИ ($v_{пов}$), т. е.

$$\Delta_{СИ} = v_{обр} - v_{пов} \quad (14)$$

то ее значение не должно превышать величины, нормированной по (12) или (13), т. е.

$$\Delta_{СИ} = \Delta v_i \leq \Sigma \Delta_{д(СИ)} \quad (15)$$

Рассмотрим на примере расчет оценки погрешности поверяемого СИ скорости ветра, используя данные табл. 1. Пусть $v_{обр} = 10,8$ м/с, а $v_{пов} = 10,6$ м/с, тогда $\Delta v_i = +0,2$ м/с. Подставляя в формулу (12) или (13) значения $v_{обр}$ и $v_{пов}$ и производя расчет получим:

$$\Sigma \Delta_{д(СИ)} = \sqrt{0,31 + (0,05 \cdot 10,6)^2 + (0,02 \cdot 10,8)^2} = \sqrt{0,6379} = 0,79$$

Таким образом 0,2 0,79 и полученная оценка погрешности СИ находится в пределах нормированного допуска. В случае, когда $\Delta v_i > \Sigma \Delta_{д(СИ)}$, то на поверяемой отметке диапазона проводят повторные сличения и если условие (15) вновь не соблюдается осуществляют регулировку СИ с последующей поверкой.

Возможно применение еще одного варианта оценки погрешности СИ скорости ветра при их поверке. При этом варианте по полученным при поверке значениям $v_{пов}$ и $v_{обр}$ по формулам (2) и (3) рассчитываются значения $\Delta_{д(обр)}$ и $\Delta_{д(пов)}$. Расчет $\Sigma \Delta_{д(СИ)}$ осуществляется по формуле:

$$\Sigma \Delta_{д(СИ)} = \sqrt{\Delta_{д(обр)}^2 + \Delta_{д(пов)}^2} \quad (16)$$

В этом случае, также разность (14) не должны превышать значения $\Sigma \Delta_{д(СИ)}$, рассчитанного по формуле (16).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фатеев Н. П. Поверка метеорологических приборов. — Л., Гидрометеиздат, 1975. 310 с.
2. Фатеев Н. П. Аппаратура для поверки метеорологических приборов. — Л., Гидрометеиздат. Труды ГГО, 1969, вып. 240, с. 109—123.

3. Блантер Д. Я., Рогалев Ю. В. Результаты метрологической аттестации образцовых аэродинамических труб. — Л., Гидрометеоздат, Труды ГГО, 1981, вып. 432, с. 63—72.
4. Рогалев Ю. В., Куров Б. В. К вопросу о переаттестации образцовых аэродинамических труб. — См. наст. сборник.
5. Купершmidt Я. А. Точность телеизмерений. — М., Изд-во "Энергия", 1978, 167 с.

338875

Ленинградский
Гидрометеорологический институт
БИБЛИОТЕКА
Л-д К-196, Малоохтенский пр., 98

МЕТОДИКА НОРМИРОВАНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Задача нормирования погрешностей информационно-измерительных систем (ИИС) достаточно широко освещена в литературе /1—7/. Наиболее интересны в этом плане работы М. А. Земельмана /3/, С. М. Мандельштама и Г. Н. Солопченко /4/, а также материалы, изложенные в /5/.

Анализ указанных работ показал, что ряд математико-статистических приемов и методов нормирования погрешностей ИИС, могут быть применимы и при нормировании $\Delta_{д(к)}$ для АМС.

Канал измерения любой АМС можно $\Delta_{д(к)}$ представить совокупностью трех основных элементов: измерительного преобразователя (ИП), линии связи (ЛС) и центрального устройства (ЦУ). Эти элементы взаимно связаны и каждый выполняет определенную функцию по преобразованию входного метеопараметра в электрический сигнал, его передачу по всему каналу измерения и выдачи значения метеопараметра в единицах измеряемой физической величины.

Для подавляющего большинства каналов измерения АМС $\Delta_{д(к)}$ выражается в виде одночленной или двучленной формул, являющихся по существу сложной функцией ряда составляющих погрешностей измерительного комплекса.

Для АИС целесообразно выбрать методику нормирования $\Delta_{д(к)}$ по каналу измерения в целом путем суммирования накапливающихся погрешностей по каждому из составных элементов. По нормированным частным погрешностям $\Delta_{д(э)_i}$ можно находить далее значение $\Delta_{д(к)}$ с учетом корреляционных связей, законов распределения $\Delta_{с}$ и $S(\Delta)$ составляющих суммарной погрешности $\sum_{i=1}^n \Delta_{д(э)_i}$.

Рассмотрим источники погрешностей по составным элементам аналоговых (температура и влажность воздуха, атмосферное давление) и импульсных (скорость ветра) каналов. В этом случае выходными электрическими сигналами ИП будут электрическое сопротивление R_t , отношение сопротивлений R_1/R_2 , последовательность импульсов и напряжение постоянного тока v .

Аналоговые каналы измерения. Уравнение преобразования термометра относительно температуры t имеет вид /8/:

$$t = \left[\frac{1}{a} \left(\frac{R_t}{R_0} - 1 \right) + \delta \left(\frac{t}{100} \right)^2 + \beta \left(\frac{t}{100} - 1 \right) \left(\frac{t}{100} \right)^3 \right] \quad (1)$$

Для практических расчетов, а также исходя из того, что ИП температуры АМС работают в более узком диапазоне от -50 до $+50$ °С, уравнение (1) можно упростить:

$$R_{t_{\text{вых}}} = F(t) = R_0(1 + at). \quad (2)$$

Здесь R_0 — сопротивление термометра при $t = 0$ °С, a — температурный коэффициент, t — измеряемая температура воздуха.

Выражение (2) есть выходная статическая характеристика, которая линейна в указанном выше диапазоне температур. Исследования ИП температуры показали, что из всей совокупности составляющих погрешности $\Delta_d(\text{ИП})$ можно выделить четыре основные, которые учитываются при оценке и нормировании $\Delta_d(\text{ИП})$. К ним следует отнести следующие погрешности: погрешность, обусловленную неточностью определения коэффициента a (δa), причем коэффициент a находится в функциональной зависимости от отношения R_{100}/R_0 ; погрешность, обусловленную нелинейной зависимостью сопротивления платины от температуры ϵ ($\delta \epsilon$); погрешность, обусловленную нагревом чувствительного элемента измерительным током схемы i (S_i). Эти погрешности вносят наибольший вклад в суммарную погрешность измерения температуры на выходе ИП. Исходя из этого, реальная функция преобразования (2) на выходе ИП будет иметь вид:

$$R_{t_{\text{вых}}} + \delta R_{t_{\text{вых}}} = F(t, \delta R_0, \delta a, \delta \epsilon, S_i). \quad (3)$$

Перепишем выражение функции (3) через абсолютные погрешности аргументов:

$$\Delta_t = \sum_i^n \left[\left(\frac{\partial t}{\partial R_0} \right) \Delta R_0 + \left(\frac{\partial t}{\partial a} \right) \Delta a + \left(\frac{\partial t}{\partial \epsilon} \right) \Delta \epsilon + \left(\frac{\partial t}{\partial i} \right) \Delta i \right]. \quad (4)$$

Для оценки составляющих в (4) их удобнее представить в виде:

$$\left. \begin{aligned} \delta R_0 &= \frac{1}{a} \frac{Rt}{R_0^2} \Delta R_0 \\ \delta a &= -\frac{\Delta a}{a} t \\ \delta \epsilon &= -R_0 B \frac{t_{\text{max}}^2}{4} \\ \delta i &= \frac{0,24 \text{ J}^2 \cdot R_0 \cdot t}{\text{cm} + a \cdot \rho \cdot t} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Тогда с учетом (5), выражение для $\Delta_{д(ИП)}$ перепишем в виде

$$\Delta_{д(ИП)} = \sum_i^n \left[\left(\frac{1}{a} \frac{R_t}{R_0} \Delta R_0 \right) + \left(-\frac{\Delta a}{a} t \right) + \right. \\ \left. + \left(-R_0 B \frac{t_{\max}^2}{4} \right) + \left(\frac{0,24 J^2 R_0 t}{cm + a S \cdot t} \right) \right]. \quad (6)$$

Численная оценка составляющих в (6) показала, что $\delta R_0 \pm 0,06^\circ \text{C}$, $\delta a \leq \pm 0,04^\circ \text{C}$, $\delta \epsilon \pm 0,055^\circ \text{C}$ и $\delta_i \pm 0,02^\circ \text{C}$. Принимая во внимание, что эти составляющие слабо коррелированы между собой, выражение для нормирования $\Delta_{д(ИП)}$ представим в виде

$$\Delta_{д(ИП)} = \sqrt{\sum_i^n \left(\frac{\partial t}{\partial R_0} \Delta h_0 \right)^2 + \left(\frac{\partial t}{\partial t} \Delta a \right)^2 + \left(\frac{\partial t}{\partial \epsilon} \Delta \epsilon \right)^2 +} \\ + \left(\frac{\partial t}{\partial i} \Delta_i \right)^2 \quad (7)$$

Суммарное влияние этих составляющих на погрешность измерения температуры Δt для ИП АМС не превысило $0,04-0,06^\circ \text{C}$. При выбранной доверительной вероятности $P = 0,95$ и учитывая, что законы распределения составляющих близки к нормальному, расчет $\Delta_{д(ИП)}$ по (7) показал, что $\Delta_{д(ИП)} \pm 0,1^\circ \text{C}$.

Приведенный выше анализ и численная оценка составляющих погрешностей в сумме представляют собой инструментальную погрешность ИП, включающую в себя как Δ_c , так и $\delta(\Delta)$.

При нормировании $\Delta_{д(ИП)}$ необходимо учитывать две составляющие $\Delta_{д(ИП)}$ и Δ_ξ . Определим их вклад в $\Delta_{д(ИП)}$. К влияющим факторам для ИП следует в первую очередь отнести нагрев рабочей части ИП солнечной радиацией $\delta_{\text{рад}}$, а также неравномерность скорости аспирации $\delta_{\text{ва}}$. К минимуму составляющих $\delta_{\text{рад}}$ и $\delta_{\text{ва}}$ в конструкции ИП предусматривается специальная радиационная защита, а скорость аспирации должна поддерживаться постоянной. Составляющая $\Delta_{\text{дин}}$ определяется в основном тепловой инерцией ИП и зависит в частности от временной структуры (пульсаций) поля температуры в локальной точке проведения измерений ИП и выбранным интервалом осреднения. Для сведения к минимуму $\Delta_{\text{дин}}$ предусматривается 10-ти минутная выдержка ИП перед началом измерения и аспирации его в течение этого же интервала. Исследования показали, что на составляющие Δ_ξ и $\Delta_{\text{дин}}$ соответственно, приходится $\Delta_\xi \pm 0,05^\circ \text{C}$ и $\Delta_{\text{дин}} \pm 0,05^\circ \text{C}$. Таким образом, получим

$$\Delta_{д(ИП)} = \sqrt{0,1^2 + 0,05^2 + 0,05^2} = \sqrt{0,015} = 0,12^\circ \text{C}.$$

Результирующий закон распределения Δ_d (ИП) на выходе ИП может быть аппроксимирован, как нормальный.

Аналогично для ИП относительной влажности воздуха АМС можно написать систему уравнений, характеризующую выходную статическую характеристику ИП и группу составляющих погрешностей, влияющих на погрешность измерения ИП

$$R_{\text{тр}} = F(\tau),$$

$$R_{\text{твых}} + \delta R_{\text{твых}} = F(\tau, \Delta\theta, \Delta t, \Delta v_a),$$

$$\varphi_{\text{вых}} + \delta\varphi_{\text{вых}} = F(\varphi, \Delta t_{\text{сyx}}, \Delta t_{\text{см}}, \Delta t_{\text{сyx}}(\text{СИ})). \quad (8)$$

Исследования ИП относительной влажности воздуха АМС происходили по трем составляющим погрешностей, обусловленных нестабильностью во времени градуировочной характеристики ЧЭ ($\Delta\theta$), неправильным выбором тока подогрева ЧЭ (Δi) и нестабильностью скорости аспирации Δv_a . Исследовались хлористолитиевые ИП точки росы (АМС типа М-106М), психрометрические и гигрометрические ИП (АМС типа КРАМС).

Выяснилось, что нестабильность градуировочных характеристик психрометрических ИП обусловлена в основном погрешностью в определении R_0 и a ($a = R_{100}/R_0$). Для измерения φ с нормированной погрешностью Δ_d (ИП) $\leq \pm 5\%$ при $t = -10^\circ\text{C}$ необходимо, чтобы измеряемая разность температур платиновыми ТС осуществлялась с погрешностью не более $\pm 0,01^\circ\text{C}$. Скорость аспирации при этом должна находиться в пределах 2,5–3,0 м/с, так как нестабильность v_a приводит к нарушению времени переходного процесса в ИП и неопределенности наступления момента динамического равновесия. Исследования составляющих погрешностей гигрометрических ИП показали, что в сумме они не превышают Δ_d (ИП) $\pm 15\%$.

Выходная статическая характеристика для ИП атмосферного давления (для АМС типа М-106, М-106М и КРАМС) представляет собой

$$P_{\text{вых}} = F(R_1/R_2). \quad (9)$$

Анализ погрешностей для ИП АМС типа М-106М, приведенный в /11, 12/, показал, что погрешность в измерении атмосферного давления на выходе ИП определяется в основном как составляющими, присущими непосредственно ртутным барометрам, так и особенностям следящей системы. К этим составляющим следует отнести погрешность в измерении следящей фотоэлектрической системой высоты столба ртути в трубке (Δh); погрешность в определении плотности ртути ($\Delta\rho$); погрешность в определении ускорения свободного падения (Δg); остаточное давление паров ртути и воздуха над поверхностью

ртути в трубке ($\Delta\rho$); капиллярную депрессию (Δa); погрешность от нестабильности и отклонений от номинала элементов (резисторов) мостовой схемы измерения ИП (ΔR); свойства кинематической схемы фотоследящего устройства ($\Delta\Phi$). Исходя из этого, выходная статическая характеристика может быть представлена уравнением вида:

$$P_{\text{вых}} + \delta P_{\text{вых}} = F(P_{\text{вх}}, H, \rho, g, R, a, \Phi) \quad (10)$$

или

$$P_{\text{вых}} + \delta P_{\text{вых}} = \sum_l \left(\frac{\partial P}{\partial H} \right) \Delta H + \left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right) \Delta \rho + \left(\frac{\partial P}{\partial g} \right) \Delta g + \left(\frac{\partial P}{\partial R} \right) \Delta R + \left(\frac{\partial P}{\partial a} \right) \Delta a + \left(\frac{\partial P}{\partial \Phi} \right) \Delta \Phi. \quad (11)$$

Ниже приведены численные оценки составляющих погрешностей по (11), полученные при экспериментальных исследованиях ИП.

Составляющие погрешностей: ΔH $\Delta \rho$ Δg ΔR Δa $\Delta \Phi$

Значения погрешностей 0,006 0,001 0,001 0,01 0,001 0,01 0,1

Наибольший вклад вносит составляющая $\Delta\Phi$. Другие составляющие в сумме (с учетом отсутствия корреляционной связи между ними) не превышают 0,015 гПа. $\Delta_d(\text{ИП}) \leq \pm 0,15$ гПа, закон распределения погрешности нормальный, а выходная статическая характеристика ИП линейна в измеряемом диапазоне давлений.

Аналогичные исследования были проведены для канала давления АМС типа КРАМС /13, 14/, где в основу анализа погрешностей выходной статической характеристики было положено уравнение шкалы вида /15, 16/

$$\Delta h = \frac{IP}{5tG} (PS_{\text{эф}} - 6 \frac{l_k}{l_p}), \quad (12)$$

где l_p , l_k — длины плеч рычагов компенсационной системы ИП; $S_{\text{эф}}$ — эффективная площадь сильфона; G — вес компенсационного груза; $P = P_0 + \Delta P$ (где P — начальное давление, или заданное начало диапазона измерения ИП, ΔP — приращение давления); t — средний шаг винта компенсационной системы. Исследования ИП показали, что значение $\Delta_d(\text{ИП}) \leq 0,15$ гПа, результирующий закон распределения погрешности на выходе ИП может быть аппроксимирован нормальным.

Импульсные каналы измерения. Для ИП скорости ветра при нормировании величины $\Delta_d(\text{ИП})$ анализировались лишь две составляющие погрешности: погрешность обусловленная неидентичностью изго-

товления ветроприемников — δv_1 (это вызывает разброс выходной статической характеристики на выходе ИП), погрешность, обусловленная моментом трения и нагрузки на оси ветроприемника — δv_2 (порог реагирования v_0 ветроприемника). В общем виде выходная статическая характеристика ИП, связывающая скорость воздушного потока v , воздействующего на винт, с числом оборотов винта N в единицу времени может быть представлена уравнением вида:

$$N = \frac{30}{\pi R_B} \operatorname{tg}(\varphi - \gamma) \cdot v, \quad (13)$$

или относительно v :

$$v_B = B \frac{\pi R_B}{30 \operatorname{tg}(\varphi - \gamma)^2}, \quad (14)$$

где B — коэффициент пересчета; φ — угол атаки лопастей винта; γ — угол, учитывающий момент трения, приведенный к оси винта; R_B — радиус винта.

В выражении (14) угол γ представляет собой функциональную зависимость вида:

$$\gamma = F(v_0) = 0,22 \sqrt{M_{\text{тр}}}. \quad (15)$$

Исследования, проведенные в аэродинамической трубе по большому количеству ИП скорости ветра показали, что погрешность измерения скорости ветра ИП находится в пределах нормированного допуска и выражается двучленной формулой вида:

$$\Delta v \leq \pm (v_0 + 0,05v_{\text{изм}}) \text{ м/с}, \quad (16)$$

где v_0 — порог реагирования, как функция момента трения $M_{\text{тр}}$ (аддитивная составляющая погрешности), $v_{\text{изм}}$ — измеренное значение скорости (мультипликативная составляющая погрешности).

Выходная статическая характеристика ИП (13) линейна в диапазоне скоростей от 2 м/с до 60 м/с. В диапазоне скоростей до 2 м/с эта зависимость не подчиняется линейному закону, что обусловлено существенным влиянием M по (15). Результирующий выходной закон распределения погрешности на выходе ИП может быть аппроксимирован нормальным.

К импульсным ИП следует отнести также и ИП атмосферного давления АМС типа М-107, где выходным сигналом является последовательность электрических импульсов. Основное влияние на величину Δ_d (ИП) оказывают две составляющие, обусловленные конструкцией

кинематической системы ИП и погрешности квантования по уровню. Исследования в барокамере показали, что в сумме эти составляющие не превышают $\Delta_{д(ИП)} \leq \pm 0,7$ гПа /17/. Выходная статическая характеристика линейна в измеряемом диапазоне давлений, а результирующий закон распределения погрешности может быть аппроксимирован, как равномерный.

Линия связи. Проанализируем погрешность, вносимую линией связи. Как показано в /9/ линия связи обеспечивает передачу электрического сигнала от ИП до ЦУ чаще всего в виде постоянного напряжения или тока. В современных АМС предпринят ряд мер для сведения к минимуму погрешности, обусловленной влиянием линии связи. Например, для аналоговых каналов это обеспечивается путем подключения ИП к ЦУ по 4-х проводной схеме с термокомпенсационными линиями. Практически, полностью не удается устранить погрешности, обусловленную вариацией сопротивления линии связи R_n , хотя числовое значение погрешности ограничивается соотношением между этой вариацией и сопротивлением нагрузки R_H . Величина R_n зависит от температуры и при вариации ее в пределах $\pm 50^\circ\text{C}$ может изменяться до $\pm 20\%$ номинального значения. Погрешность измерения сопротивления ИП, вносимая линией связи, может быть рассчитана по формуле:

$$\delta = \pm \frac{2\Delta R_n + \Delta r_{кУ}}{\Delta R_t}, \quad (17)$$

где $2\Delta R_n$ — суммарная вариация сопротивления измерительной линии; $\Delta r_{кУ}$ — вариация сопротивления коммутирующего устройства; ΔR_t — изменение сопротивления ИП в диапазоне измеряемых температур. Учитывая соотношение между R_n и R_H для относительной погрешности δ получим

$$\delta = \pm \frac{2\Delta h_n}{R_H}, \quad (18)$$

где $R_H \approx (2 \dots 5) 10^3 \Delta R_t$. Отсюда относительная погрешность измерения сопротивления ИП АМС будет равна:

$$\delta \approx \pm 0,001 \frac{\Delta R_n}{\Delta R_t}. \quad (19)$$

Например, при обычно встречающихся значениях $R_n = 10$ Ом и $\Delta R_n = \pm 2$ Ом погрешность линии связи лежит в пределах $\delta = \pm 0,002\%$. Часто пользуются формулой для расчета погрешности, обусловленной изменением температуры линии связи на погрешность измерения тем-

пературы ИП (в нашем случае на выходе канала измерения АМС), в виде /10/:

$$\Delta t = \frac{R_n (t_2 - t_1)}{R_0 \alpha (\tau + \tau_1)}, \quad (20)$$

где R_n — сопротивление линии связи при температуре при которой производилась подгонка линии связи; t_2 — температура, при которой линия связи находится в эксплуатации; $\tau = 1/\alpha_n$ (α_n — температурный коэффициент сопротивления материала линии связи; α — температурный коэффициент сопротивления материала чувствительного элемента ИП).

Практически при наличии в схемах АМС термокомпенсации и незначительности погрешности δ ($\delta = 0,002\%$) этой составляющей можно пренебречь. Основной вклад в $\Delta_{д(к)}$ будут вносить погрешности составных элементов канала, т. е. ЦУ и ИП.

Перейдем к вопросу нормирования погрешности по каналу измерения АМС в целом. В нашем случае задача состоит в том, чтобы по известным (нормированным) параметрам составных элементов канала измерения $\Delta_{д(э)}_i$, дать оценку погрешности канала измерения АМС в целом $\Delta_{д(к)}$. Задача может быть решена методами, применяемыми при обработке результатов косвенных измерений. Поскольку, погрешность $\Delta_{д(к)}$ есть функция ряда аргументов (погрешностей составных элементов канала измерения АМС $\Delta_{д(э)}_i$), то ее можно представить в виде:

$$\Delta_{д(к)} = F[\Delta_{д(э)}_1, \dots, \Delta_{д(э)}_n]. \quad (21)$$

Если известны погрешности составных элементов канала измерения АМС, то можно написать:

$$\Delta_{д(к)} = F[\Delta_{д(ИП)}, \Delta_{д(лс)}, \Delta_{д(ЦУ)}], \quad (22)$$

или в общем виде с учетом (21):

$$\Delta_{д(к)} = \sum_i^n \Delta_{д(э)}_i. \quad (23)$$

Каждая из составляющих в (22) обладает собственной фиксированной (нормированной) погрешностью $\Delta_{д(э)}_i$, содержащей как случайную $S(\hat{\Delta})$, так и систематическую Δ_c составляющие. Причем на Δ_c кроме составляющих $S(\hat{\Delta})$ и Δ_c оказывают влияние дополнительные погрешности $\Delta_{доп(э)}_i$ и динамические погрешности.

Как показано в /1/ погрешность какой-либо измерительной системы можно представить как сумму предела допускаемой основной (стати-

ческой) погрешности, дополнительной погрешности и динамической погрешности.

$$\Delta_{\text{доп}} = \Delta_0(\kappa) + \Delta_{\text{доп}}(\kappa) + \Delta_{\text{дин}}(\kappa), \quad (24)$$

где Δ_0 — статическая основная погрешность.

Для i -х элементов канала измерения АМС можно записать:

$$\Delta_{\text{д}}(\kappa) = \sum_{i=1}^n \Delta_{\text{доп}}(\varepsilon)_i + \sum_{i=1}^n \Delta_{\text{дин}}(\varepsilon)_i. \quad (25)$$

Для любого i -го составного элемента канала измерения АМС значение $\Delta_{\text{д}}(\varepsilon)_i$ можно представить в виде суммы и при нормировании Δ_0 , записать

$$\Delta_{\text{д}}(\varepsilon)_i = \Delta_{0i} = F \left(\sum_{i=1}^n \rho(\Delta)_i + \sum_{i=1}^n \overset{\circ}{\Delta}_{c_i} \right). \quad (26)$$

При заданной доверительной вероятности $P = 0,95$ с учетом вида закона распределения погрешности, выраженного соответствующим коэффициентом γ , можно записать, что:

$$\Delta_{\text{д}}(\varepsilon) = \gamma \cdot 2\delta(\overset{\circ}{\Delta}) + (\Delta_c), \quad (27)$$

или для канала измерения в целом по любому из составных элементов:

$$\Delta_{\text{д}}(\kappa) = \sum_{i=1}^n (\varepsilon)_i = \sum_{i=1}^n [\gamma \cdot 2\delta(\overset{\circ}{\Delta}) + |\Delta_c|]_i. \quad (28)$$

С учетом приведенных выше выражений получим математическую модель погрешности ИИС в виде:

$$\Delta_{\text{д}}(\kappa) = \sqrt{ \left[\left\{ \gamma \cdot 2 \left[\sum_{i=1}^n S(\overset{\circ}{\Delta})_i \right] + \sum_{i=1}^n \Delta_{c_i} \right\} + \sum_{i=1}^n \Delta_{\text{дин}_i} \right]^2_{\text{ИП}} + \left[\left\{ \gamma \cdot 2 \left[\sum_{i=1}^n S(\overset{\circ}{\Delta})_i \right] + \sum_{i=1}^n \Delta_{c_i} \right\} \Delta_{\text{доп}_j} + \sum_{i=1}^n \Delta_{\text{дин}_i} \right]_{\text{лс}} + \left[\left\{ \gamma \cdot 2 \left[\sum_{i=1}^n S(\overset{\circ}{\Delta})_i \right] + \sum_{i=1}^n \Delta_{c_i} + \sum_{i=1}^n \Delta_{\text{доп}_i} + \sum_{i=1}^n \Delta_{\text{дин}_i} \right\} \right]_{\text{ЦУ}}, \quad (29)$$

В выражении (29) учтены все факторы, влияющие на составные элементы канала измерения АМС. Из выражения (29) также видно, что в качестве статистических характеристик основной погрешности для любого элемента канала измерения будут математическое ожидание $M[\Delta_0] = \Delta_c$ и среднеквадратическое отклонение $\sigma[\Delta_0] = S(\overset{\circ}{\Delta})$. При нормировании $\Delta_{\text{д}}(\kappa)$ в рабочих условиях κ показателям точности $S(\overset{\circ}{\Delta})$ и добавляется $\Delta_{\text{доп}}$ (или комплекс дополнительных погрешностей), обусловленных влияющими факторами (функциями влияния). Естественно, что статистическая достоверность оценок влияющих факторов (или иначе $\Delta_{\text{доп}}$), а также их учет, может быть обеспечен

при обработке выборок достаточно большого объема и требует большой затраты времени и труда. В принципе составляющие погрешностей $S(\Delta)$, Δ_c , $\Delta_{\text{доп}}$ и $\Delta_{\text{дин}}$ можно определить в рабочих условиях, но это требует проведения искусственного воздействия на составные элементы канала измерения АМС всех влияющих факторов, что также практически неудобно и крайне затруднительно. Поэтому метрологическое исследование составных элементов канала измерения АМС (ИП, ЛС, ЦУ) обычно проводят пораздельно в нормальных условиях и в статическом режиме.

Рассмотрим теперь физический смысл и степень влияния на каждую из составляющих в (29) составных элементов канала измерения АМС. Основная статическая погрешность Δ_0 характеризует только влияние собственных свойств составного элемента канала измерения АМС (ЦУ, ЛС, ИП) при некоторых условиях, принятых за нормальные. Дополнительная погрешность отражает влияние внешних факторов и зависит как от собственных свойств элементов канала измерения АМС, так и от характера изменений внешних величин.

Динамическая составляющая погрешности будет в большей степени обусловлена инерционными свойствами ИПАМС, а также частотным спектром входного метеозлемента (пространственно-временной изменчивостью метеозлемента в локальной точке пространства, где производится измерение ею АМС) и в меньшей степени, — от инерционных свойств ЛС и ЦУ.

Центральное устройство любой АМС практически находится в нормальных условиях, что позволяет, в принципе, пренебречь составляющей $\Delta_{\text{доп}}$, а рассчитывать (нормировать) лишь статическую составляющую погрешности Δ_0 . Как показано в /22/, при отклонении температуры в помещении, где устанавливается ЦУ АМС от нормальной, влияние $\Delta_{\text{доп}}$ не существенно и составляет $\Delta t \approx 0,01^\circ \text{C}$. Аналогично и для составляющей $\Delta_{\text{дин}}$ можно сказать, что время обработки сигнала в ЦУ намного меньше времени измерения непосредственно ИП входного метеозлемента.

Что касается влияния АМС, то они по своему роду работы должны находиться в условиях атмосферы и к ним приняты необходимые меры в части конструкции для сведения к минимуму инструментальной погрешности $\Delta_{\text{ин}}$. Для ИП АМС целесообразно рассчитывать (нормировать) составляющую Δ_0 и по возможности $\Delta_{\text{дин}}$.

На линии связи АМС в большинстве случаев оказывают влияние только температурные перепады, т. е. преобладающей составляющей является $\Delta_{\text{доп}} = f(t)$. В ряде АМС приняты меры для сведения к минимуму $\Delta_{\text{доп}}$ путем включения термокомпенсационных линий, а также подключения ИП температуры воздуха и влажности воздуха к ЦУ по мостовой 3-х и 4-х проводным схемам.

Исходя из вышеизложенного, выражение (29) можно упростить, преобразовав к виду

$$\Delta_{д(к)} = \sqrt{\left[\left\{ r \cdot 2 \left[\sum_l^k S(\Delta) \right]_i + \sum_l^k \Delta_{c_i} + \sum_l^k \Delta_{дин_i} \right\}_{ИП} + \left[\sum_l^k \Delta_{доп_i} \right]^2 + \left\{ \left[r \cdot 2 \left[\sum_l^k S(\Delta) \right]_i + \sum_l^k \Delta_{c_i} \right\}^2 \right. \quad (30)$$

Обозначив каждое из слагаемых в (30) через предел допускаемой погрешности для составных элементов канала АМС как $\Delta_{д}$ и считая, что эти составляющие погрешностей некоррелированы, получим

$$\Delta_{д(к)} = \sqrt{\Delta_{д(ИП)}^2 + \Delta_{д(ИС)}^2 + \Delta_{д(ЦУ)}^2} \quad (31)$$

Если для ИП АМС значения $\Delta_{д(ИП)}$ достаточно хорошо исследованы и их нормирование можно считать вполне обоснованным, то особый интерес представляет нормирование $\Delta_{д(ЦУ)}$ для ЦУ АМС и далее по каналу измерения АМС в целом, включая составляющие $\Delta_{д(ИП)}$ и $\Delta_{д(ИС)}$.

Как показали экспериментальные исследования ЦУ АМС типа М-106М, КРАМС и М-107 /17, 19, 20, 21/ с применением специальных имитирующих устройств /18/ в подавляющем большинстве каналов измерения ЦУ преобладает систематическая составляющая $\Delta_{с}$. Для ЦУ АМС по результатам исследований, мы имеем статистические величины $\Delta_{с}$ и $S(\Delta)$, которые получены по дискретным отметкам диапазона измерения и, таким образом, необходимо оценить (нормировать) величину $\Delta_{д(ЦУ)}$ по диапазону в целом по любому из каналов на основе дискретных значений $\Delta_{с_i}$ и $S(\Delta)_i$. Методами математической статистики определить тот доверительный интервал в котором с доверительной вероятностью $P = 0,95$ будет находиться $\Delta_{д(ЦУ)}$. Каждую дискретную i -тую отметку диапазона измерения ЦУ АМС, где определена $\Delta_{с_i}$, можно в принципе рассматривать как множество возможных реализаций $\Delta_{с}$ и принять ее за случайную величину с равномерным законом распределения в каждой i -той отметке диапазона. Таким образом, возникает задача корректного суммирования $\Delta_{с_i}$ по диапазону с учетом закона распределения. Для ЦУ АМС распределение $\Delta_{с_i}$ в

каждой i -той исследуемой отметке диапазона можно аппроксимировать равномерным законом. Как показано в /23/ плотность распределения суммы двух слагаемых с равномерным распределением аппроксимируется распределением Симпсона. При числе слагаемых $n > 2$ функция распределения почти неотличима от нормальной.

При нормировании погрешностей измерения на выходе аналоговых и импульсных каналов измерения ЦУ АМС за основу брались их корреляционные связи, вид законов распределения с введением коэффициента аппроксимации g .

В общем виде, выражение для $\Delta_{д(ЦУ)}$ в каждой i -той отметке диапазона измерения, а также и по диапазону в целом, можно предста-

вить в виде

$$\Delta_{д(ЦУ)} = \sum_{i=1}^n \Delta_{д(ЦУ)} = \frac{1}{D} S [M(\Delta_c) + S(\Delta)] \omega[\Delta_{д}] d(\Delta). \quad (32)$$

Нормирование по (32) в НТД громоздко и неудобно для практических целей, так как поверителю фактически необходимо знать лишь численное значение поля допуска, где с заданной доверительной вероятностью нормирован $\Delta_{д(ЦУ)}$. Практически целесообразно применять формулу (27):

$$\Delta_{д(ЦУ)} = r \cdot 2 \cdot S(\Delta) + |\Delta_c|, \quad (33)$$

где r — коэффициент аппроксимации, учитывающий вид закона распределения составляющих погрешностей на выходе ЦУ АМС.

Составляющую $S(\Delta)$, с учетом корреляционных связей и законов распределения по i -тым отметкам поверки, можно рассчитать по формуле

$$\sum_{i=1}^n S(\Delta) = r_1 \sqrt{\sum_{i=1}^n \delta_i^2}. \quad (34)$$

Рассматривая $S(\Delta)$ в каждой i -той отметке поверки, как случайную реализацию по диапазону измерения ЦУ АМС в целом, рассчитываем по формуле,

$$\sum_{i=1}^n S(\Delta)_i = r \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\Delta_{ci}}{r} \right)^2}. \quad (35)$$

Расчет $\Delta_{д(ЦУ)}$ по (33) производился для $P = 0,95$ и $r = 1,7$ (для аналоговых каналов ЦУ), $r = 2,04$ (для импульсных каналов ЦУ).

Значения коэффициентов $r = 1,07$ и $r = 2,04$ выбраны из предположения, что составляющая Δ_c превалирующая и распределяется на выходе ЦУ АМС по нормальному (для аналоговых каналов измерения) и равномерному (для импульсных каналов измерения) законам.

В табл. 2–4 представлены результаты расчета по (33) для трех типов станций.

Аналогично в табл. 5–7 представлены результаты метрологических исследований для ИП АМС и результаты расчета $\Delta_{д(ИП)}$.

Рассмотрим далее вопрос о нормировании величины $\Delta_{д(k)}$ применительно к случаю, когда известны метрологические характеристики составных элементов канала измерения АМС, т. е. известны $\Delta_{д(ИП)}$, $\Delta_{д(ЦУ)}$ и $\Delta_{д(по)}$. При нормировании (расчете) $\Delta_{д(k)}$ необходимо учитывать законы распределения составляющих $\Delta_{д(ИП)}$, $\Delta_{д(ЦУ)}$ и $\Delta_{д(по)}$ путем введения соответствующего коэффициента, учитываю-

Таблица 2

Метеорологические характеристики ЦУ АМС типа М-106М

Характеристики	$t^{\circ}\text{C}$	$\tau^{\circ}\text{C}$	P_{rPa}	V м/с	
				текущий	max
r	1,07	1,07	1,07	2,04	2,04
P	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
$\pm\Delta_{д}$ (ЦУ)	0,12	0,12	0,20	0,01	0,40

Таблица 3

Метеорологические характеристики ЦУ АМС типа КРАМС

Характеристики	$t^{\circ}\text{C}$	$\tau^{\circ}\text{C}$	$\varphi\%$	P_{rPa}	V м/с	
					текущий	max
r	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	2,04
P	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
$\pm\Delta_{д}$ (ЦУ)	0,06	0,50	0,30	0,05	0,90	0,95

Таблица 4

Метеорологические характеристики ЦУ АМС типа М-107

Характеристики	$t^{\circ}\text{C}$	P_{rPa}	$V_{ср}$ м/с
r	1,07	1,07	1,07
P	0,95	0,95	0,95
$\pm\Delta_{д}$ (ЦУ)	0,60	1,00	0,50

Таблица 5

Метеорологические характеристики ИП станции М-106М

Характеристики	$t^{\circ}\text{C}$	$\tau^{\circ}\text{C}$	$\varphi\%$	P_{rPa}	$V_{тек}$		V_{max}	
					1 м/с	40 м/с	3м/с	60 м/с
r	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07
P	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
$\pm\Delta_{д}$ (ИП)	0,12	0,25	7,0	0,15	0,55	2,50	1,21	5,20

Метеорологические характеристики ИП станции КРАМС

Характеристики	t °C	τ °C	φ %	P _{г.п.а}	V _{ср} м/с		V _{max} м/с	
					1	40	3	60
г	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07
Р	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
±Δ _д (ИП)	0,12	0,15	7,0	0,15	0,55	2,50	1,21	6,50

Таблица 7

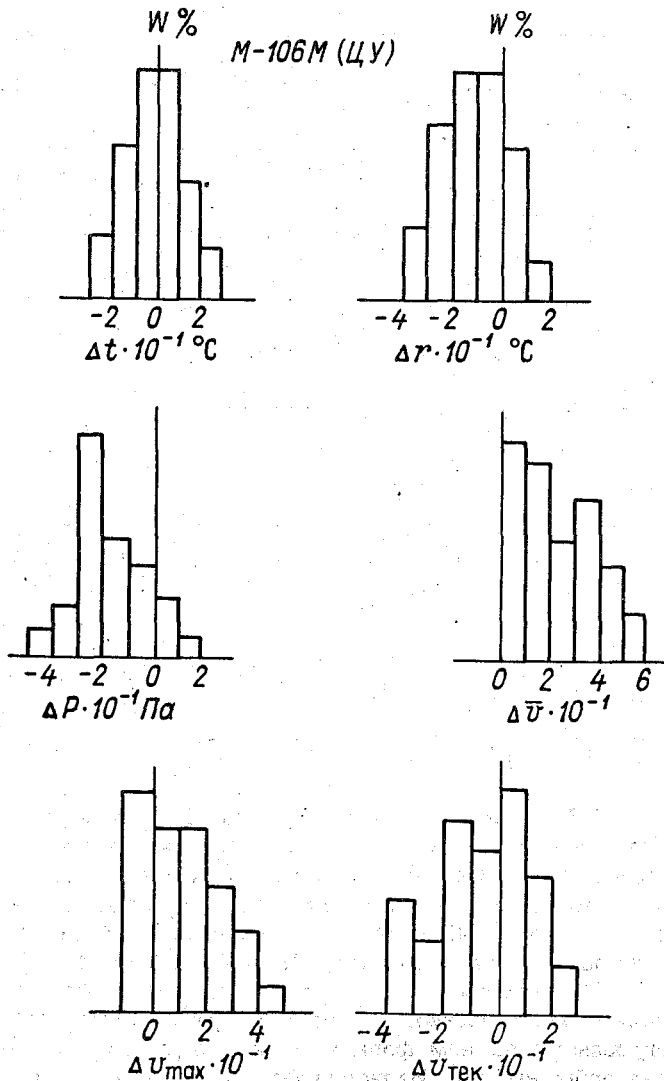
Метеорологические характеристики ИП станции М-107

Характеристики	t °C	P _{г.п.а}	V _{ср} м/с	
			1	40
г	1,07	2,04	1,07	1,07
Р	0,95	0,95	0,95	0,95
±Δ _д (ИП)	±0,3	±0,7	±0,55	±2,50

щего вид распределения погрешностей. Исходя из этого, выражение (31) преобразуем к виду:

$$\Delta_{д(к)} = \sqrt{(r_1 \Delta_{д(ИП)})^2 + (r_2 \Delta_{д(ЦУ)})^2 + (r_3 + \Delta_{д(ло)})^2}. \quad (36)$$

В выражении (36) коэффициенты r_1 — r_3 характеризуют суммарный закон распределения погрешности на выходе составных элементов канала измерения АМС. Следует отметить, что коэффициенты r_1 — r_3 являются поправочными и вводятся для учета влияния форм кривых распределений. На рис. 1—8 представлены некоторые из гистограмм распределения погрешностей на выходах ЦУ АМС трех типов (М-106М, КРАМС и М-107), построенные по результатам экспериментальных метрологических исследований. Анализ гистограмм показывает, что аппроксимированные по ним формы законов распределения имеют довольно разнообразный вид. Из теории вероятности и математической статистики известно, что при большом числе составляющих погрешностей и близких друг другу их значениях, суммарная погрешность будет иметь нормальное распределение, а практически распределение близкое к нормальному будет иметь суммарная погрешность, полученная по



2019

Рис. 1

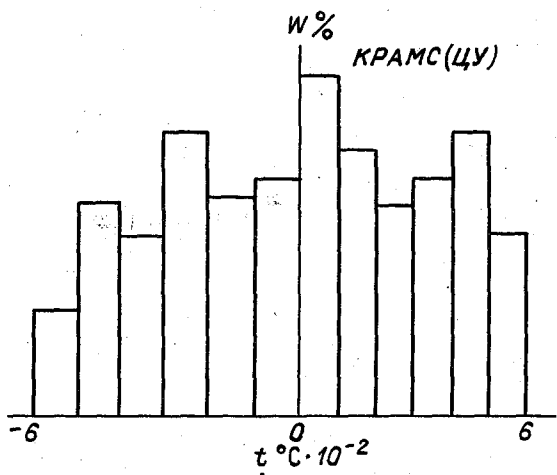


Рис. 2.

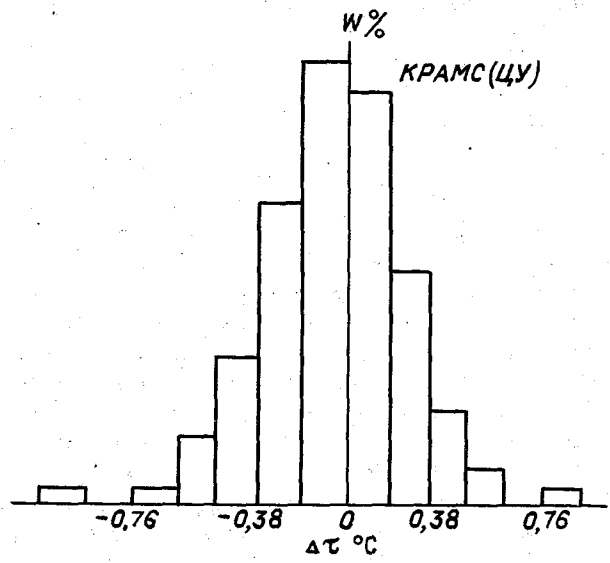


Рис. 3.

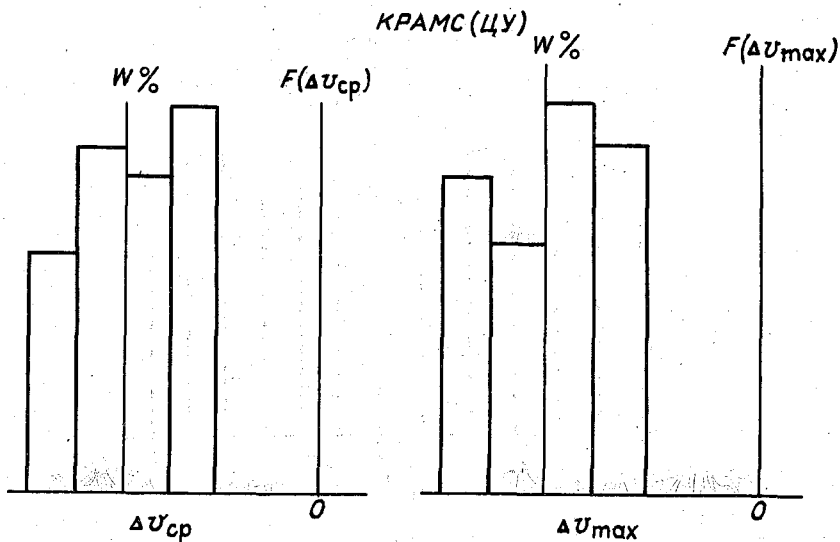


Рис. 4.

5—6 составляющим с любыми эмпирическими распределениями. Для нашего случая расчет $\Delta_{\text{д}}(\kappa)$ производится лишь по двум составляющим $\Delta_{\text{д}}(\text{ИП})$ и $\Delta_{\text{д}}(\text{ЦУ})$, что требует учета формы распределения и введение в (36) соответствующего коэффициента γ . Возможны два варианта нахождения коэффициента γ . Первый вариант заключается в том, что если известны значения среднеквадратических погрешностей σ составных элементов канала измерения АМС и вид закона распределения на выходе его, то подбор коэффициентов γ может быть осуществлен по ГОСТу 8.011-72 — Показатели точности измерений и формы представления результатов измерений. Стандартные аппроксимированные функции распределения случайной составляющей погрешности характеризуются σ , а предельная погрешность рассчитывается умножением σ на соответствующий коэффициент γ , т. е. $\Delta = \sigma \gamma$.

Значения, нормируемые в НТД на АМС, обычно не подразделяются на систематические и случайные составляющие, что затрудняет применение ГОСТа 8.011-72. В этом случае может быть применим второй вариант, сущность которого заключается в том, что необходимо кривые распределения погрешностей $\Delta_{\text{д}}(\text{ИП})$ и $\Delta_{\text{д}}$ привести к одной какой-либо кривой распределения принятой за основную. Обычно за основную выбирают кривую нормального распределения. Следует также оговорить при этом условие задания основной доверительной вероятности P , т. е. если $\Delta_{\text{д}}(\text{ИП})$ рассчитана для доверительной вероятности $P =$

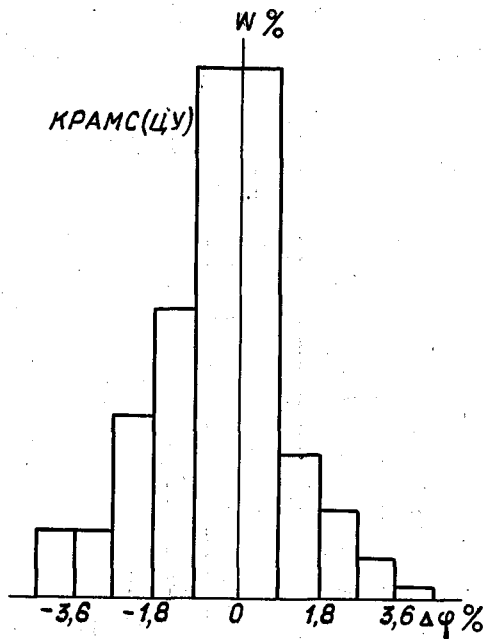


Рис. 5.

2949
 = 0,95, то $\Delta_{д(ЦУ)}$ и $\Delta_{д(к)}$ должны быть рассчитаны для $P = 0,95$. Исследования ЦУ АМС показали, что в большинстве случаев распределение погрешности на выходе ЦУ имеет равновероятное распределение и при приведении равновероятного распределения к нормальному необходимо вводить поправочный коэффициент γ , рассчитываемый как $\gamma = 1/\sqrt{3}$. Равновероятное распределение обычно дает значения σ (или $\Delta_{д}$) по сравнению с другими эмпирическими распределениями, наиболее сильно отличающиеся от значений γ нормального распределения. Исходя из этого, удобнее рассчитывать поправочный коэффициент, как $\gamma = 1/1,22$, т. е. рассчитывать γ для распределения Симпсона, которое занимает некоторое промежуточное положение и будет более корректно отражать фактическое распределение погрешностей $\Delta_{д(ИП)}$ и $\Delta_{д(ЦУ)}$ на выходах ИП и ЦУ АМС.

Рассмотрим на примере расчет значений $\Delta_{д(к)}$ для двух вариантов. Первый вариант предусматривал следующие входные данные: $P = 0,95$;

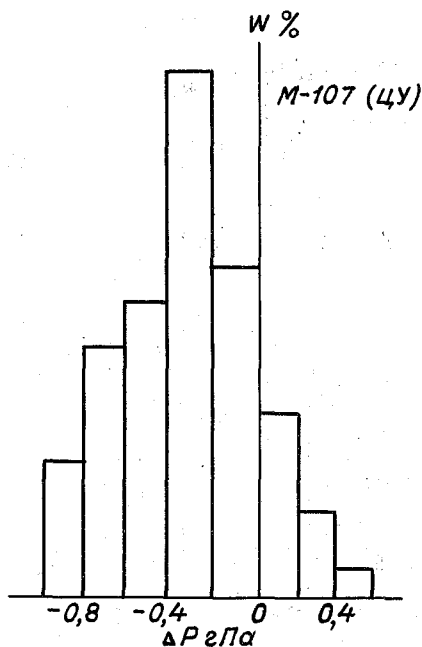


Рис. 6.

коэффициенты γ взяты со значениями $\gamma = 1,07$ (для импульсных каналов измерения). Данные для расчета по первому варианту брались из табл. 2—4 для ЦУ АМС и табл. 5—7 для ИП АМС. Закон распределения составляющей Δ_d (ИП) принимался за нормальный.

Для второго варианта были взяты исходные данные: $P = 0,95$; коэффициенты γ для ИП АМС были взяты те же (табл. 5—7), а по данным анализа гистограмм для ЦУ АМС (рис. 1—8) был рассчитан коэффициент $\gamma = 0,82$ ($\gamma = 1/1,22 = 0,82$) с целью приведения вида закона распределения Δ_d (ЦУ) к нормальному. Значения брались из таблиц 2—4.

Расчет осуществлялся по формуле (36), где вместо Δ_d (ЦУ) = 1,07 (или 2,04) подставлялся коэффициент $\gamma = 0,82$. Так же как составляющая Δ_d (к) пренебрежимо мала ($\Delta_d(10) \ll 0,002\%$), то ей практически можно пренебречь и при расчете Δ_d (к) не учитывать.

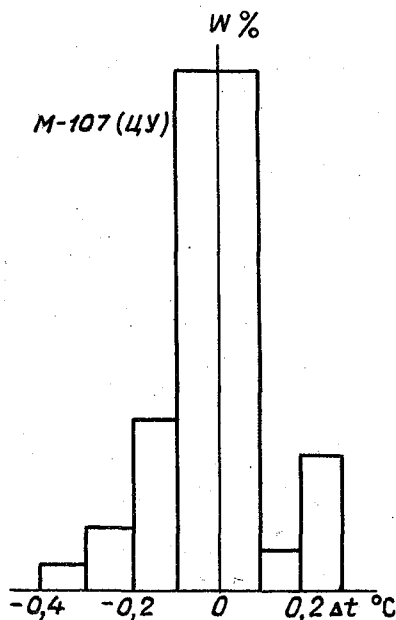


Рис. 7.

Численные значения $\Delta_d(\kappa)$ для ряда каналов измерения двум расчетам и трем типам АМС представлены в табл. 8.

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Предложенные результаты расчета $\Delta_d(\kappa)$ по (36) хорошо согласуются с экспериментальными данными, полученными при метрологических исследованиях, а также по результатам поверки АМС.

2. Некоторое завышение значений $\Delta_d(\kappa)$, рассчитанное по первому варианту, объясняется тем, что выбор значений коэффициентов $\gamma = 1,07$ или $\gamma = 2,04$ для $\Delta_d(\text{ЦУ})$ не всегда возможен. Если составляющая погрешности $\Delta_d(\text{ИП})$ на выходе ИП АМС практически всегда имеет вид нормального распределения, то для составляющей $\Delta_d(\text{ЦУ})$ на выходе ЦУ АМС это не всегда подтверждается данными метрологических исследований различных экземпляров ЦУ АМС, что требует

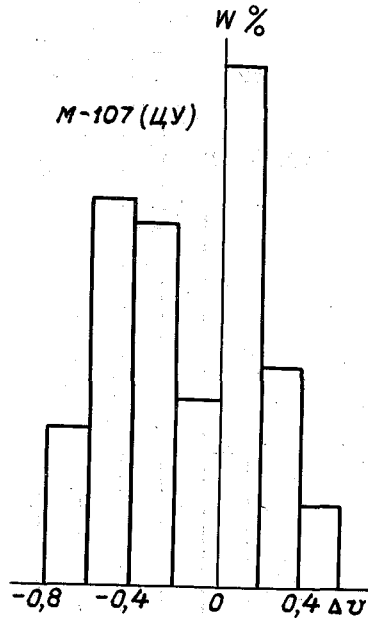


Рис. 8.

приведения зачастую различных видов законов распределения Δ_d (ЦУ) к какому-либо одному (к нормальному распределению) для дальнейшего нормирования Δ_d (к).

3. При нормировании предела допускаемой погрешности измерения по каналу в целом в АМС целесообразно применять второй вариант расчета Δ_d (к).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Земельман М. А. Методика расчета погрешности линейной измерительной информационной системы. — Измерительная техника, № 5, 1973, с. 6–9.
2. Заико А. И., Куликовский Л. Ф. Метод нормирования погрешностей информационно-измерительных систем. — Измерительная техника, № 8, 1981, с. 16–19.

Таблица 8

Канал измерения	Значения Δ_d (к)					
	М-106М		КРАМС		М-107	
	I	II	I	II	I	II
Температура воздуха, °С	0,18	0,16	0,14	0,14	0,72	0,59
Влажность воздуха, %	—	—	8,15	7,88	—	—
Температура точки росы, °С	0,30	0,16	0,56	0,44	—	—
Атмосферное давление, гПа	0,26	0,23	0,59	0,46	1,79	1,65
Скорость ветра, $V_{\text{тек}}$ м/с	0,59 2,68	0,59 2,7	—	—	—	—
Скорость ветра, V_{max} м/с	1,53 5,62	1,33 5,57	2,33 6,20	1,51 5,95	—	—
Скорость ветра, м/с	—	—	—	—	0,8 2,7	0,72 2,7

3. Земельман М. А. Об исходных предпосылках расчета погрешностей измерительных информационных систем. — Измерительная техника, № 4, 1973, с. 14—16.
4. Мандельштам С. М., Солопченко Г. Н. Метрологическое обеспечение агрегатных ИИС. — Приборы и системы управления, № 1, 1977, с. 17—19.
5. Методический материал по применению ГОСТ 8.009-72 "ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений". — М., Изд-во стандартов, 1975, с. 45—52.
6. Браилов Э. С., Сиверс В. Н. О математической модели погрешности измерительного канала ИИС. — М., Труды ВНИИФТРИ, 1978, с. 29—33.
7. Вострокнутов Н. Г., Евтихеев Н. Н. Информационно-измерительная техника (теоретические основы). — М., Изд-во Высшая школа, 1977, 232 с.
8. Сосновский А. Г., Столярова Н. И. Измерение температур. — М., Изд-во Комитета стандартов, мер и измерительных приборов при СМ СССР, 1970, 257 с.

9. Афиногенов Л. П., Грушин С. И., Романов Е. В. Аппаратура для исследований приземного слоя атмосферы. — Л., Гидрометеиздат, 1977. 319 с.
10. Точность контактных методов измерения температуры. — М., Изд-во стандартов, 1976. 231 с.
11. Роголев Ю. В. Некоторые результаты поверки аналоговых каналов станции М-106. — Л., Гидрометеиздат. Труды ГГО вып. 340, 1974, с. 130—137.
12. Попандопуло Г. К., Голуненко А. С. Датчик атмосферного давления для автоматических гидрометеорологических станций. — Труды НИИ ГМП, вып. 26, 1972, с. 21—25.
13. Роголев Ю. В., Андреев М. А. Анализ результатов поверки преобразователя атмосферного давления автоматической метеостанции в естественных условиях. — Труды ГГО вып. 392, 1977, с. 90—93.
14. Роголев Ю. В., Тетерев Г. И. Методика поверки измерительных преобразователей атмосферного давления, работающих на деформационном принципе. — Труды ГГО, вып. 414, 1978, с. 37—43.
15. Фатеев Н. П. Поверка метеорологических приборов. — Л., Гидрометеиздат, 1975. 311 с.
16. Карпуша В. Е., Чернов Б. С. Измерение атмосферного давления. — Л., Гидрометеиздат, 1973. 275 с.
17. Роголев Ю. В. Экспериментальная оценка погрешностей измерения атмосферного давления и скорости ветра при поверке станции М-107. — Л., Гидрометеиздат. Труды ГГО вып. 345, 1975, с. 84—94.
18. Роголев Ю. В., Фатеев Н. П. Анализ погрешностей имитирующих устройств, применяемых при поверке автоматических метеостанций. — Л., Гидрометеиздат. Труды ГГО, вып. 392, 1977, с. 103—116.
19. Роголев Ю. В. Исследование погрешностей устройства автоматики и регистрации станций М-106М. — Л., Гидрометеиздат. Труды ГГО, вып. 392, 1977, с. 127—143.
20. Роголев Ю. В. Исследование погрешностей центрального устройства метеостанции КРАМС. — Л., Гидрометеиздат. Труды ГГО, вып. 392, 1977, с. 117—126.
21. Роголев Ю. В. Анализ результатов поверки канала температуры станции М-107. — Л., Гидрометеиздат. Труды ГГО, вып. 345, 1975, с. 95—108.
22. Кузьминых И. П., Богачев А. Д. Автоматическая гидрометеорологическая станция УАТГМС-4. Труды Всесоюзной конференции молодых ученых гидрометеорологической службы СССР. — Л., Гидрометеиздат, 1972, с. 78—89.
23. Рабинович С. Г. Погрешность измерений. — Л., Изд-во Энергия, 1978. 261 с.

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТЕЙ ПОВЕРКИ АВТОМАТИЧЕСКИХ МЕТЕОСТАНЦИЙ

Основной задачей поверки средств измерения (СИ) является определение соответствия их точностных характеристик нормированным значениям. Для достижения этой цели все СИ, находящиеся в эксплуатации, должны подвергаться периодической поверке. При выпуске СИ из производства их погрешности определяются экспериментально путем испытаний. Применяются также теоретические расчеты погрешностей СИ, которые дают возможность предсказать точность проектируемых СИ или оценить их суммарную погрешность при эксплуатации.

При поверке автоматических метеорологических станций (АМС) определяют само значение погрешности СИ или указывают находится ли она в заданных пределах. Поверка может быть комплексной и поэлементной. При комплексной поверке определяется погрешность СИ как единого целого, при поэлементной — погрешности составных блоков АМС с последующим их суммированием. Более предпочтительной является комплексная поверка, но в большинстве случаев ее осуществить не представляется возможным. При поэлементной поверке также решается прямая задача, т. е. рассчитывается погрешность СИ в целом. Необходимые для расчета данные получают путем определения погрешностей блоков АМС, причем эта задача в полном объеме решается только при первичной поверке. В дальнейшем цель поверки АМС заключается лишь в контроле метрологических параметров блоков и проверке ее работоспособности. Если параметры блоков соответствуют нормированным значениям, то и погрешность поверяемой АМС в целом также не выйдет за пределы допуска.

Точное значение погрешности $\delta_{\text{пов}}$ определяется как

$$\delta_{\text{пов}} = A_{\text{пов}} - A_{\text{обр}}, \quad (1)$$

где $A_{\text{пов}}$ — показания поверяемого прибора, $A_{\text{обр}}$ — действительное значение измеряемой величины, воспроизводимой образцовыми СИ.

Для получения достоверных результатов поверки АМС необходимо соблюдать ряд таких условий, как правильный выбор образцовых СИ, определение оптимального числа поверяемых точек градуировочной характеристики и распределение их по диапазону измерения, определение необходимого количества отсчетов на поверяемой отметке, применение рациональной методики обработки результатов поверки.

При выборе образцового СИ и соблюдении соотношения погрешностей между поверяемым каналом измерения АМС и образцовым СИ требуется определенный подход, зависящий от назначения поверяемого канала АМС, условий проведения поверки, а также исходя из экономи-

ческих требований поверка должна быть по возможности проста и экономична.

Обычно устанавливается соотношение между образцовым и поверяемым СИ, как 1:3, 1:4 или 1:5 [1]. Соотношение 1:2 и менее также может оказаться приемлемым, но при условии, если случайные погрешности $\delta(\Delta)$ поверяемого и образцового СИ незначительны, а их точность определяется в основном только систематическими погрешностями Δ_c . При поверке каналов измерения АМС допустимо соблюдать соотношение 1:2 и 1:3.

Погрешность образцового СИ ($\delta_{обр}$) включает в себя как систематическую Δ_c , так и случайную $\delta(\Delta)$ составляющие, которые находятся между собой в различных соотношениях. Если $\Delta_c \gg \delta(\Delta)$, то обычно влиянием $\delta(\Delta)$ пренебрегают и в результатах сличений (поверки) будет присутствовать Δ_c образцового и поверяемого СИ. При больших значениях Δ_c и $\delta(\Delta)$ учитываются обе эти составляющие. Естественно, что погрешность поверяемого СИ будет определена с большей точностью в том случае, когда выбрано соотношение 1:3. При выборе такого соотношения погрешность $\delta_{обр}$ ввиду ее относительно небольшого значения практически не увеличивает значение общей погрешности и поэтому может не учитываться в конечных результатах, поскольку вероятность выхода общей погрешности за пределы допуска весьма мала (не превышает 0,27–0,3 %) при нормальном законе распределения.

Иногда по тем или иным обстоятельствам приходится проводить сличения при соотношении 1:1. В этом случае погрешность образцового СИ необходимо разделить на учитываемую и неучитываемую составляющие, причем неучитываемая часть составляющей погрешности образцового СИ должна удовлетворять критерию ничтожных случайных погрешностей [2]:

$$\frac{1}{3} \leq \frac{\delta_{обр}}{\delta_{пов}} \quad (1)$$

В таких случаях предел допускаемой погрешности поверяемого СИ определяется по уравнению

$$\Delta_{д(пов)} = \pm (\delta_{пов} - \delta_{обр}) \quad (2)$$

Значение $\Delta_{д(пов)}$ трактуют еще как технологический допуск (ТД) на погрешность поверяемого СИ. Таким образом, при условии (1) предел допускаемой погрешности образцового СИ должен быть учтен путем соответствующего уменьшения $\Delta_{д(пов)}$. Распределим $\delta_{обр}$ на учитываемую δ' и неучитываемую δ'' части, представив ее в виде

$$\delta_{\text{обр}} = \delta'_{\text{обр}} + \delta''_{\text{обр}} \quad (3)$$

Тогда согласно (2) погрешность $\Delta_{\text{д(пов)}}$ будет

$$\Delta_{\text{д(пов)}} = \pm (\delta_{\text{пов}} - \delta'_{\text{обр}}), \quad (4)$$

а неучитываемая часть погрешности образцового СИ в соответствии с критерием ничтожных погрешностей должна в этом случае удовлетворять условию

$$k = \frac{\delta''_{\text{обр}}}{\Delta_{\text{д(пов)}}} \leq \frac{1}{3}. \quad (5)$$

Из уравнений (3), (4) и (5) можно получить значение учитываемой части погрешности образцового СИ

$$\delta'_{\text{обр}} = \frac{\delta_{\text{обр}} - k \delta_{\text{пов}}}{1 - k} = \delta_{\text{пов}} \frac{n - k}{1 - k}, \quad (6)$$

и значение неучитываемой части погрешности образцового СИ

$$\delta''_{\text{обр}} = \frac{k}{1 - k} (\delta_{\text{пов}} - \delta_{\text{обр}}) = \delta_{\text{пов}} \frac{k(1 - n)}{1 - k}, \quad (7)$$

где величина $n = \frac{\delta_{\text{обр}}}{\delta_{\text{пов}}}$ равна соотношению погрешностей образцового и поверяемого СИ, причем $0 \leq n \leq 1$.

В выражениях (6) и (7) $k = n$ в интервале $0 \leq n \leq \frac{1}{3}$, а $k = \frac{1}{3}$ в интервале $\frac{1}{3} \leq n \leq 1$. Учитываемая часть погрешности $\delta'_{\text{обр}}$ уменьшает $\Delta_{\text{д(пов)}}$ по сравнению с его исходным (нормированным) значением $\delta_{\text{пов}}$

$$\gamma = \frac{\Delta_{\text{д(пов)}}}{\delta_{\text{пов}}} = \frac{1 - n}{1 - k}, \quad (8)$$

где γ — коэффициент, характеризующий относительное уменьшение

$\Delta_{\text{д(пов)}}$. Таким образом, распределение $\delta_{\text{обр}}$ осуществляется как бы между двумя составляющими $\delta'_{\text{обр}}$ и $\delta''_{\text{обр}}$ из которых составляющая $\delta''_{\text{обр}}$ пренебрежимо мала по сравнению с $\Delta_{\text{д(пов)}}$ ($\delta''_{\text{обр}} \ll \ll \frac{1}{3} \Delta_{\text{д(пов)}}$). Из сравнения выражений (8) с (2) вытекает

важный вывод о том, что ТД при поверке может быть увеличен в 1,5 раза по отношению к нормированному (2), что не уменьшает качества поверки.

Для иллюстрации рассмотрим численный пример при поверке канала измерения температуры АМС. Пусть нормированная погрешность поверяемого канала температуры равна: $\delta_{\text{пов}} = \pm 0,2^\circ\text{C}$, а погрешность применяемого образцового СИ $\delta_{\text{обр}} = \pm 0,15^\circ\text{C}$, т. е. $p = 0,75$. Следовательно, при поверке каналов измерения температуры АМС с нормированной погрешностью $\delta_{\text{пов}} = \pm 0,2^\circ\text{C}$ только те каналы признаются годными (с вероятностью $P = 0,99$) измеренные значения погрешностей которых при поверке не превысят $\delta_{\text{обр}} < \pm 0,15^\circ\text{C}$. Далее, достоверность результатов поверки зависит от числа выбранных по диапазону измерений отметок поверки, а также от интервала между отметками Δn_T . Это обусловлено тем, что составляющие погрешности Δ_c и $S(\Delta)$ могут изменяться по диапазону измерения от отметки к отметке n_T , а также еще и тем, что выходные статистические характеристики каналов могут быть нелинейны. Это положение распространяется на все составные элементы АМС (ЦУ и ИП), а также на канал измерения в целом. Распределение Δ_c и $S(\Delta)$ по диапазону и, соответственно, выбор n_T , определяется на основе проведения метрологических исследований АМС при выпуске из производства (при заводских испытаниях ЦУ, ИП и по каналам измерения в целом).

Для ЦУ АМС превалирующей составляющей погрешностью по диапазону является $\Delta_c / 3-6$. Причем случайная составляющая $S(\Delta) < \Delta_c$ и постоянна по диапазону. Поэтому, выбор n_T обосновывается анализом функции $n_T = F(\Delta_c)$ по диапазону поверки. Если функция $F(\Delta_c)$ неразрывна и линейна по диапазону измерения, то $n_T = 5-6$. Здесь также следует отметить следующее, что в начале берется учащенный выбор n_T , основанный на принципе выделения экстремума распределения $F(\Delta_c)$. В случае, если Δ_c изменяется незначительно по диапазону, или находится близко к пределу нормированного интервала погрешности, то n_T следует брать с большей частотой в области резкого изменения (экстремума) систематической составляющей Δ_c .

Могут быть случаи, когда и Δ_c и $S(\Delta)$ изменяются по диапазону, т. е. $S(\Delta) \neq \text{const}$ и $\Delta_c \neq \text{const}$. Здесь возникает необходимость определения такого количества n_T , чтобы по значениям Δ_c и $S(\Delta)$ в этих точках можно было бы оценить с известной погрешностью точность как составных элементов канала измерения АМС (ЦУ и ИП), так и канала измерения в целом. Эту задачу можно решить, если известна реальная статическая характеристика $F_p(X)$ на выходе ЦУ, ИП или канала измерения АМС. Тогда, находят n_T , аппроксимируя $F_p(X)$ полиномом при определенной погрешности аппроксимации. Для каналов измерения АМС, где выходные статические характеристики как для ЦУ и ИП, так и канала измерения в целом, являются линейными (или практически линейными), приемлемый выбор n_T может быть получен

и при номинальной передаточной характеристике $F_H(x)$. Тогда вполне достаточно выбрать $n_T = 10$.

Рассмотрим еще случай, когда $S(\Delta)$ практически постоянна по диапазону поверки $S(\Delta) = \text{const}$, а составляющая Δ_c периодически меняется по диапазону измерения $\Delta_c \neq \text{const}$. Тогда выбор n_T должен базироваться на основе нелинейности функции $F(\Delta_c)$ по диапазону. В этом случае Δ_c можно представить в виде:

$$F(\Delta_c) = \Delta_c(x) = a + bx + c(x), \quad (9)$$

где a — аддитивная составляющая погрешности Δ_c , bx — мультипликативная составляющая погрешности Δ_c , $c(x)$ — погрешность от нелинейности функции $F(\Delta_c)$. Из-за наличия a и bx в (9) поверка в двух крайних отметках диапазона измерения не вызывает сомнений. При выборе n_T внутри поверяемого диапазона, с какой бы частотой не выбирались n_T , из-за нелинейности $F(\Delta_c)$ погрешность в промежутках между выбранными n_T может превысить наибольшую погрешность в самих поверяемых отметках n_T . Естественно, что это положение не распространяется на непрерывную функцию поверки, когда частота дискретно выбранных n_T практически восстанавливает форму функции $F(\Delta_c)$. В этом случае большое количество выбранных n_T экономически невыгодно, так как усложняет поверку и значительно увеличивает время и стоимость поверки. Исходя из вышеизложенного, можно сформулировать общие положения при обосновании выбора n_T , которые сводятся к следующему:

- поверяемые отметки n_T следует выбирать, основываясь на анализе закономерностей изменения Δ_c и $S(\Delta)$ по диапазону;

- поверяемые отметки n_T внутри диапазона должны выбираться таким образом, чтобы погрешность в любой неповеренной отметке диапазона не превышала наибольшую погрешность в поверяемых n_T (Δ_n) на некоторое малое заданное значение Δ_3 , т. е. $\Delta_n \leq \Delta_3$.

Если функция распределения погрешности неразрывна и линейна в исследуемом диапазоне, то достаточно брать $n_T = 5 - 6$, которые равномерно распределены по диапазону и при условии, что $S(\Delta) \approx \text{const}$ (в число этих точек входят точки начала и конца диапазона). Если $\Delta_c \leq S(\Delta)$ и $\Delta_c \approx \text{const}$ по диапазону, то достаточно брать $n_T = 10$.

Вопрос об оптимальном выборе количества отсчетов (измерений) N на выбранных n_T также базируется на анализе Δ_c и $S(\Delta)$. Как известно, характеристикой точности любого СИ является суммарная предельно допустимая погрешность, при которой оно может быть признано пригодным к эксплуатации. Эта суммарная погрешность в общем виде выражается так:

$$\Sigma \delta = \Delta_c \pm KS(\Delta), \quad (10)$$

где K — коэффициент, учитывающий закон распределения.

Для обоснования выбора числа N необходимо знать какой вклад вносят Δ_c и $S(\hat{\Delta})$ в суммарную погрешность по (10). В случае, когда $\Delta_c \rightarrow \min$, а $S(\hat{\Delta})$ является превалирующей, то Δ_c пренебрегают при условии выполнения неравенства /11/:

$$\frac{\theta}{S(\hat{\Delta})} < 0,8, \quad (11)$$

где θ — оценка границ суммы неисключенных остатков, $S(\hat{\Delta})$ — оценка СКО среднего арифметического. Оценка θ может быть рассчитана по методике, изложенной в ГОСТе 8.207-76. В случае, когда $S(\hat{\Delta}) \rightarrow \min$, а Δ_c является превалирующей, то $S(\hat{\Delta})$ пренебрегают при условии выполнения неравенства:

$$\frac{\theta}{S(\hat{\Delta})} > 0,8. \quad (12)$$

Значение $S(\hat{\Delta})$ обычно вычисляется по формуле:

$$S(\hat{\Delta}) = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{N(N-1)}}, \quad (13)$$

или

$$S(\hat{\Delta}) = \frac{S}{\sqrt{N}}, \quad (14)$$

где N — выбранное число измерений при поверке.

Анализируя выражение (13) и (14) видно, что при $N \rightarrow \infty$ значение $S(\hat{\Delta}) \rightarrow 0$. Ясно, что практическое увеличение $N \rightarrow \infty$ нереально, сама функция (13) такова, что при увеличении N от 2 до 5 значительно снижает величину $S(\hat{\Delta})$, при $N = 5 - 10$ — снижение уменьшается, а при $N = 20 - 30$ $S(\hat{\Delta})$ изменяется мало. Увеличение N имеет смысл до тех пор, пока доверительная погрешность измерения не будет определяться только Δ_c . Исходя из этого неравенства Э (12) и с учетом (14) можно рассчитать N_{\max} :

$$N_{\max} = 64 \left(\frac{S(\hat{\Delta})}{\theta} \right)^2. \quad (15)$$

Проанализируем далее некоторые вопросы существующего нормиро-

вания величины $\Delta_{д(к)}$ по каналу измерения АМС. Обычно в нормативно-технической документации (НТД) на АМС нормируется предел допускаемой погрешности по каналу измерения в целом $\Delta_{д(к)}$ и эта же погрешность для ИП — $\Delta_{д(ИП)}$, которые выражаются либо одной, либо двумя формулами. Диапазоны измерения метеозаписей у всех типов АМС примерно одного порядка, а значения $\Delta_{д(к)}$ и $\Delta_{д(ИП)}$ различны в зависимости от требований точности измерения ИП, а также от специфических условий работы самих АМС. Зачастую встречаются разночтения при нормировании $\Delta_{д(к)}$ и $\Delta_{д(ИП)}$. В одном случае значения $\Delta_{д(к)}$ и $\Delta_{д(ИП)}$ принимают как просто погрешность измерения метеозаписей, в другом случае их принимают за предел допускаемой основной погрешности, но при этом не нормируется дополнительная погрешность $\Delta_{доп}$. Здесь следует отметить, что $\Delta_{доп}$ сама является сложной функцией $\Delta_{доп} = F(\Delta_{вл\ ф}, \Delta_{мет}, \Delta_{дин})$, где $\Delta_{вл\ ф}$ — погрешность от влияющих факторов, $\Delta_{мет}$ — методическая погрешность и $\Delta_{дин}$ — динамическая погрешность. Характерным является то, что для всех без исключения АМС не нормируется величина $\Delta_{д(ЦУ)}$ как основного элемента канала измерения выполняющего функции преобразования, обработки и линеаризации выходных сигналов с ИП. Часто условно принимают, что величина $\Delta_{д(ЦУ)}$ или пренебрежимо мала, или наоборот утверждают, что $\Delta_{д(ЦУ)} = \Delta_{дин}/2$. Исходя из этого, для расчета $\Delta_{д(ЦУ)}$ применяют формулу вида

$$\Delta_{д(ЦУ)} = \pm \sqrt{\Delta_{д(к)}^2 - \Delta_{д(ИП)}^2}, \quad (16)$$

то есть должно в конечном итоге выполняться условие

$$\Delta_{д(ЦУ)} = \pm \sqrt{\Delta_{д(к)}^2 - \Delta_{д(ИП)}^2} \leq \frac{\Delta_{д(ИП)}}{2}. \quad (17)$$

В реальных условиях работы АМС, при обработке в ЦУ выходных сигналов с ИП, $\Delta_{д(к)}$ определяется не только характеристиками ИП, но и характеристиками ЦУ, а в зависимости от режима измерения включает в себя как статическую, так и динамическую составляющие погрешностей.

Таким образом, при нормировании $\Delta_{д(к)}$ и $\Delta_{д(ИП)}$ их необходимо трактовать как пределы допускаемых погрешностей с определенной доверительной вероятностью. По требованиям ГОСТа 8.009-72 /9/ нормируемые метрологические характеристики должны:

- давать исчерпывающую характеристику всех метрологических свойств СИ,
- отражать определенные физические свойства средств измерения,
- служить основой для расчета некоторых производных характе-

ристик, соответствующих различным критериям сравнения средств измерений между собой,

– легко контролироваться при осуществлении поверки СИ.

Для АМС выполнение подобных условий может быть в свою очередь обеспечено только при соблюдении условий:

– наличия определенной связи между нормируемой метрологической характеристикой и погрешностью результата измерения, учитывающей и другие характеристики измерительного процесса,

– возможности установления связи между нормируемыми метрологическими характеристиками составных элементов канала измерения АМС и метрологической характеристикой канала измерения в целом, представляющей собой комбинацию составных элементов канала измерения АМС.

Исходя из этого, напомним выражения для суммарной погрешности по каналу измерения в целом для статического и динамического режимов измерения. Для статического режима измерения суммарная погрешность по каналу измерения в целом запишется в общем виде как

$$\Delta_{д(к)} = F(\Delta_{ст}) = \sum_{i=1}^n (\delta_{ин(ИП)} + \delta_{ин(ЦУ)}) \quad \left| \quad X = const' \right. \quad (18)$$

соответственно, в динамическом режиме:

$$\Delta_{д(к)} = F(\Delta_{дин}) = \sum_{i=1}^n (\delta_{м(ИП)} + \delta_{ин(ИП)} + \delta_{ин(ЦУ)} + \delta_{дин(ИП)} + \delta_{дин(ЦУ)}) \quad (19)$$

В выражениях (18) и (19) X обозначает входной (воздействующий) на вход канала измерения АМС метеозлемент. Приемлемой метрологической характеристикой канала измерения АМС в целом в НТД является $\Delta_{д(к)}$, учитывающая режимы измерения АМС входной величины X . Нормирование $\Delta_{д(к)}$ должно при этом осуществляться на основе анализа точностных характеристик ИП и ЦУ, как статическом, так и в динамическом режимах измерения. Отсутствие данных об одном из составных элементов канала измерения АМС ($\Delta_{д(ИП)}$ или $\Delta_{д(ЦУ)}$), а также недостаточно достоверные оценки $\Delta_{д(ИП)}$ и $\Delta_{д(ЦУ)}$ могут частично или полностью приводить к неправильному нормированию значений $\Delta_{д(к)}$.

Следует учитывать также, что практически погрешность измерения метеозлемента на выходе канала АМС, главным образом будет обусловлена погрешностью ИП, причем как составляющей $\Delta_{дин(ИП)}$ (учитывающей инерционные свойства ИП), так и $\Delta_{ст(ИП)}$. При быстродействии обработки сигналов современных ЦУ АМС составляющей $\Delta_{дин(ЦУ)}$ практически можно пренебречь.

2049

ВЫВОДЫ.

1. Соотношение между погрешностью поверяемого канала АМС и погрешностью выбранного образцового СИ допускается выбирать как 1:2, при меньшем соотношении необходимо учитывать составляющие погрешности образцового СИ.

2. Выбор отметок поверки по диапазону и количества измерений в этих отметках должен базироваться на анализе распределения по диапазону систематической и случайной составляющих погрешности.

3. Нормирование значения $\Delta_{d(k)}$ должно осуществляться с учетом статической и динамической погрешностями составных элементов канала измерения АМС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. М а л и к о в С. Ф., Т ю р и н Н. И. Введение в метрологию. Издательство Государственного комитета стандартов, мер и измерительных приборов СССР. — М., 1965. 240 с.
2. Ш в е ц к и й Б. И., Ш р а ш к о в А. Я. О выборе соотношения погрешностей поверяемого и образцового приборов. — Автометрия, № 5, 1974, с. 95—97.
3. Р о г а л е в Ю. В. Некоторые результаты поверки аналоговых каналов станции М-106. — Труды ГГО, вып. 340, 1974, с. 130—137.
4. Р о г а л е в Ю. В. Оценка погрешности центрального устройства станции КРАМС по результатам поверки каналов измерения температуры и влажности воздуха. — Труды ГГО, вып. 346, 1976, с. 97—109.
5. Р о г а л е в Ю. В. Исследование погрешностей устройства автоматики и регистрации станции М-106М. — Труды ГГО, вып. 392, с. 127—143.
6. Р о г а л е в Ю. В. Исследование погрешностей центрального устройства метеостанции КРАМС. — Труды ГГО, вып. 392, 1977, с. 117—126.
7. М е т о д ы обработки результатов наблюдений при измерениях. — Труды метрологических институтов СССР, вып. 134 (194), 1972. 117 с.
8. Г О С Т 8.207-76. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Основные положения. — М., Изд-во стандартов, 1978. 10 с.
9. М е т о д и ч е с к и й материал по применению ГОСТ 8.009-72. "ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений". — М., Изд-во стандартов, 1975. 79 с.

Ю. В. Рогалев, Б. Л. Кожевников, С. Л. Аствацатуров,
И. И. Маньков, Н. П. Фатеев, Л. В. Анискин

РЕЗУЛЬТАТЫ ПОВЕРКИ АВТОМАТИЧЕСКИХ МЕТЕОСТАНЦИЙ КРАМС В АЭРОПОРТАХ

В целях улучшения метрологического обслуживания КРАМС в аэропортах в ГГО им. А. И. Воейкова были разработаны методические указания по контролю ее метрологических характеристик непосредственно на месте эксплуатации. Методические указания включают в себя методы поверки каналов измерения метеорологической дальности видимости (МДВ), высоты нижней границы облаков (ВНГО), атмосферного давления (АД), параметров (ПВ), температуры и влажности (ТВ), а также центрального устройства (ЦУ) и дистанционных блоков (ДБ) станции.

Методические указания построены таким образом, что вначале определяется работоспособность по перечисленным каналам измерения, а затем производится проверка сохранности градуировочных характеристик каналов в целом на выбранных участках диапазона измерений. При поверке ЦУ и ДБ КРАМС предусматривается применение специальных тест-программ с помощью которых осуществляется проверка по эталонам сопротивления и напряжения ЦУ и ДБ. С помощью тест-программ проверяются также работоспособность каналов измерения атмосферного давления, температуры и влажности воздуха.

В 1982–1983 гг. в ряде аэропортов (Внуково, г. Москва и Пулково, г. Ленинград) были проведены экспериментальные работы с целью опробования этих методических указаний. В а/п Пулково были поверены две станции КРАМС (№ 007 и № 012) по каналам измерения МДВ, ВНГО, АД, а также осуществлена поверка ЦУ и ДБ.

При поверке канала измерения МДВ в качестве образцовых СИ применяются набор аттестованных Госстандартом СССР (ВНИИМ им. Д. И. Менделеева) нейтральных светофильтров. Были исследованы 10 каналов измерения МДВ по восьми отметкам диапазона. В замыкатель ИП МДВ устанавливались поочередно образцовые нейтральные светофильтры с различными коэффициентами пропускания τ : 71; 64; 49,5; 37,5; 25,2; 17,3; 8,8 и 2,6 %; а на выходе канала измерения (на ленте РТА) фиксировались значения коэффициентов пропускания τ , измеренные каналом КРАМС. На каждой отметке диапазона, для каждого из вставляемых фильтров осуществлялось по 5 измерений коэффициента пропускания и вычислялся средний коэффициент $\bar{\tau}$.

Предел допускаемой основной погрешности измерения τ на выходе канала измерения МДВ характеризуется $\delta_{д(\tau)осн} \leq \pm 2\%$. При поверке канала в естественных условиях может возникнуть дополнительная погрешность, обусловленная влиянием температуры и влажности

воздуха. Эта погрешность нормирована $\delta_{(\tau) \text{ доп}} \leq \pm 2\%$. Таким образом, предел допускаемой суммарной погрешности измерения τ на выходе канала измерения МДВ не должен превышать $\sum \delta_{d(\tau)} \leq \pm 2,8 \approx \pm 3\%$. В табл. 1 приведены результаты проведенной поверки каналов измерения МДВ. По каждому из каналов измерения МДВ по результатам поверки были рассчитаны статистические характеристики: систематическая составляющая погрешности Δ_c , среднее квадратическое отклонение δ , случайная составляющая погрешности при выбранной доверительной вероятности $P = 0,9$ и суммарная погрешность $\sum \delta_{d(\tau)}$. Результаты расчетов приведены в табл. 2.

Таблица 1

Средние значения $\bar{\tau}$ для ИП МДВ на поверяемых отметках по всему диапазону измерений

Номер ИП МДВ	Коэффициенты пропускания образцовых светофильтров, %							
	71,0	64,0	49,5	37,5	25,2	17,3	8,8	2,6
КРАМС № 012								
871	69,0	62,0	47,5	37,0	25,0	19,0	10,0	4,0
436	71,0	64,0	48,0	36,0	24,0	15,0	7,0	3,0
648	71,0	64,0	47,0	36,0	24,0	17,5	9,0	3,0
669	74,0	62,0	50,5	38,0	25,0	21,0	10,0	4,5
28	72,0	65,0	50,0	38,0	26,0	19,0	10,0	3,0
КРАМС № 007								
682	71,5	65,0	50,5	39,5	23,0	20,0	10,0	4,0
673	71,0	65,0	50,0	38,0	25,0	19,0	11,0	4,0
872	70,0	63,0	48,0	37,0	25,0	19,0	10,0	3,0
63	72,0	65,0	50,5	39,0	27,0	19,0	10,0	3,0
359	71,0	64,0	48,0	38,0	24,0	17,5	7,0	3,0

Систематическая составляющая погрешности $\Delta_{c(\tau)}$ рассчитывалась по формуле:

$$\Delta_{c(\tau)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta \tau_i, \quad (2)$$

где n — число поверенных отметок диапазона измерения МДВ ($n = 8$).

Отклонения для каждой отметки поверяемого диапазона по 10 каналам измерения τ рассчитывались по формуле:

Таблица 2

Номер ИП МДВ	Статистические характеристики			
	Δ_c %	δ %	$\delta(\overset{\circ}{\Delta})$ %	$\Delta_d(\tau)$ %
КРАМС № 012				
871	-0,3	$\pm 1,5$	$\pm 2,8$	$-0,3 \pm 2,8$
436	-1,0	$\pm 0,9$	$\pm 1,7$	$-1,0 \pm 1,7$
648	-0,6	$\pm 1,0$	$\pm 1,8$	$-0,6 \pm 1,8$
669	+0,5	$\pm 1,74$	$\pm 3,2$	$0,5 \pm 3,2$
28	+0,9	$\pm 0,4$	$\pm 0,75$	$0,9 \pm 0,75$
КРАМС № 007				
682	+0,95	$\pm 1,35$	$\pm 2,5$	$0,95 \pm 2,5$
673	+0,9	$\pm 0,8$	$\pm 1,5$	$0,9 \pm 1,5$
872	-0,1	$\pm 1,0$	$\pm 1,9$	$-0,1 \pm 1,9$
63	+1,2	$\pm 0,42$	$\pm 0,8$	$1,2 \pm 0,8$
359	-0,42	$\pm 0,86$	$\pm 1,6$	$-0,42 \pm 1,6$

$$\Delta\tau = \bar{\tau}_i - \tau_{\phi} \quad (1)$$

где τ_i — среднее из пяти отсчетов значение τ на выходе канала измерения МДВ, τ_{ϕ} — значение прозрачности задаваемое на входе канала измерения МДВ образцовым фильтром.

Среднеквадратическое отклонение для каждого единичного отсчета в проверяемой отметке диапазона рассчитывалось по формуле:

$$\delta_{\tau} = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\tau_i - \tau_{\phi})^2}{n - 1}} \quad (3)$$

Случайная составляющая погрешности $\delta(\overset{\circ}{\Delta})$ по диапазону измерения рассчитывалась как

$$\delta(\overset{\circ}{\Delta})_{\tau} = t_{\delta t} \delta_{\tau} \quad (4)$$

где $t_{\delta t}$ — коэффициент Стьюдента, равный $t_{\delta t} = 1,86$, выбранный при заданных $P = 0,90$ и $n = 8$.

Предел допустимой погрешности $\delta_d(\tau)$ по каналу измерения в целом рассчитывался по формуле

$$\delta_d(\tau) = \Delta_c(\tau) \pm \delta(\overset{\circ}{\Delta}) \quad (5)$$

Предоставляет определенный интерес проанализировать разброс

показаний по 10 каналам измерения значений τ однотипными ИП МДВ в качестве которых использованы приборы РДВ-2. Данные для расчета брались из табл. 1, а результаты расчета приведены в табл. 3. Среднее значение τ по 10 каналам измерения τ для каждой из 8 отметок диапазона рассчитывалось по формуле:

$$\tau \Big| \tau_{\text{обр}i} = \frac{\sum_{i=1}^n \tau_i}{n} \% \quad (6)$$

В формуле (6) коэффициент прозрачности $\tau_{\text{обр}}$ представляет собой значение прозрачности образцового нейтрального светофильтра, устанавливаемого в замыкатель ИП МДВ. Значение $\tau_{\text{обр}}$ для каждой поверяемой i -той отметки диапазона есть величина постоянная, т. е. $\tau_{\text{обр}} = \text{const}$. Например, при $\tau_{\text{обр}} = 71,0 \%$ и пользуясь данными табл. 1, рассчитаем значение $\bar{\tau}$ по 10 каналам измерения МДВ по формуле (6):

$$\bar{\tau} \Big|_{\text{при } \tau_{\text{обр}} = 71,0 \%} = \frac{\sum_{i=1}^n \tau_i}{n} =$$

$$= \frac{69,0 + 71,0 + 71,0 + 74,0 + 72,0 + 71,5 + 71,0 + 7,0 + 72,0 + 71,0}{10} = 71,25 \%$$

Значение $\delta_{\bar{\tau}}$ для каждой из i -той поверяемой отметки диапазона одновременно по 10 каналам измерения рассчитывалось по формуле:

$$\delta_{\bar{\tau}} = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{\tau} - \tau_i)^2}{n(n-1)}} \quad (7)$$

Результаты полученного расчета приведены в табл. 3.

Таблица 3

Значения $\tau_{\text{обр}} \%$															
71,0		64,0		49,5		37,5		25,2		17,3		8,8		2,6	
$\bar{\tau}$	$\delta_{\bar{\tau}}$	$\bar{\tau}$	$\delta_{\bar{\tau}}$	$\bar{\tau}$	$\delta_{\bar{\tau}}$	$\bar{\tau}$	$\delta_{\bar{\tau}}$	$\bar{\tau}$	$\delta_{\bar{\tau}}$	$\bar{\tau}$	$\delta_{\bar{\tau}}$	$\bar{\tau}$	$\delta_{\bar{\tau}}$	$\bar{\tau}$	$\delta_{\bar{\tau}}$
71,25	0,42	63,9	0,38	49,0	0,48	37,65	0,37	24,8	0,36	18,6	0,52	9,4	0,43	3,45	0,19

Анализ результатов поверки и обработки полученных данных показывает хорошую сходимость результатов измерения МДВ станций КРАМС

по 10 каналам, при этом значение δ_T не превышает $\pm 0,6\%$.

При проверке по каналам измерения ВНГО — в качестве образцовых СИ использовались аттестованные кабельные линии задержки с дискретными значениями времени задержки 0,19; 0,33; 0,69; 1,02; 1,37; 2,01 и 3,16 мкс, что соответствует имитируемым расстояниям 29, 49, 104, 154, 206, 312 и 474 м. Были поверены четыре канала измерения ВНГО по двум станциям КРАМС. Результаты сличений с образцовыми линиями задержки при работе ИП ВНГО с приставкой ДВ-1М по каналам измерения в целом приведены в табл. 4.

Таблица 4

Средние значения H на выходе канала

Номер ИП ВНГО	Имитируемые образцовыми линиями задержки значения H , м					
	49	104	154	206	312	474
КРАМС № 007						
0332	50	110	160	210	320	470
0254	55	85	135	185	305	475
КРАМС № 012						
1111	35	98	145	185	305	465
0250	44	104	144	204	314	485

Аналогично, как и для каналов МДВ, по формулам (1)–(5) были рассчитаны статистические характеристики: Δ_c , δ , $\delta(\Delta)$ и $\Delta_d(H)$. Результаты расчета приведены в табл. 5.

Таблица 5

Номер ИП ВНГО	Статистические характеристики			
	Δ_c , м	δ , м	$\delta(\Delta)$, м	$\Delta_d(H)$, м
КРАМС № 007				
0332	3,5	$\pm 4,0$	± 8	$(3,5 \pm 8)$
0254	-10,0	$\pm 10,0$	$\pm 20,0$	(-10 ± 20)
КРАМС № 012				
1111	-11,0	$\pm 5,0$	$\pm 10,0$	(-11 ± 10)
0250	-1,0	$\pm 7,0$	$\pm 13,0$	$(-1,0 \pm 13)$

Для оценки разброса показаний значений измеренной ВНГО по четырем каналам измерений и по шести поверенным отметкам диапазона по формулам (6) и (7) были рассчитаны значения \bar{H} и $\delta_{\bar{H}}$. Данные для расчета брались из табл. 4, а результаты расчета приведены в табл.6.

Таблица 6

Значения \bar{H} в метрах по образцовым линиям задержки											
46,0		99,3		146,0		196,0		311,0		473,8	
\bar{H}	$\delta_{\bar{H}}$	\bar{H}	$\delta_{\bar{H}}$	\bar{H}	$\delta_{\bar{H}}$	\bar{H}	$\delta_{\bar{H}}$	\bar{H}	$\delta_{\bar{H}}$	\bar{H}	$\delta_{\bar{H}}$
46,0	4,3	99,3	5,3	146,0	5,2	196,0	6,5	311,0	3,7	473,6	4,3

Анализ полученных данных также показал хорошую сходимость результатов измерения ВНГО по четырем каналам измерения, при этом значение $\delta_{\bar{H}}$ не превышает $\pm 6,5$ м.

При определении сохранности метрологических характеристик каналов измерения АД в качестве образцового СИ использовался ртутный барометр типа КР /1/. Сличения проводились одновременно по двум каналам измерения АД. Отсчеты по образцовому СИ (КР) и с выходов канала измерения осуществлялись синхронно в моменты измерения станцией атмосферного давления. В показания КР вводились соответствующие поправки. Для поверяемых каналов измерения АД (для ИП АД) была рассчитана поправка на превышение (разность уровней) установки образцового КР и ИП АД станций КРАМС, которая равна $\Delta P_h = 0,15$ гПа и которая вводилась в показания ИП АД. По результатам сличений были рассчитаны статистические характеристики при выбранной доверительной вероятности $P = 0,95$. Результаты расчета приведены в табл. 7.

Таблица 7

Номер КРАМС	Статистические характеристики погрешности измерения давления		
	Δ_c	δ	2δ
007	-0,46	0,07	0,14
012	-0,22	0,20	0,40

Результаты поверки ЦУ и ДБ станций КРАМС.

В ЦУ станций КРАМС предусмотрена автоматическая коррекция

систематической составляющей погрешности путем автоматического измерения двух образцовых мер, соответствующих началу и концу диапазона измерения метеопараметра и, соответственно, коррекции по этим значениям всех однотипных каналов данной серии измерений. Скорректированный код находится посредством линейной интерполяции погрешностей измерения образцовых мер (эталонов) по диапазону и определяется по формуле (2) :

$$X_c = (\mathcal{E}_2 - \mathcal{E}_1) \frac{X_n - \mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_{2n} - \mathcal{E}_{1n}} + \mathcal{E}_1, \quad (8)$$

где X_n , \mathcal{E}_{1n} и \mathcal{E}_{2n} — результаты измерения входной величины меньшего и большего образцовых сигналов; \mathcal{E}_1 и \mathcal{E}_2 — значения входной величины (числового кода), соответствующие по градуировочной характеристике меньшему и большему образцовым сигналам.

Проверка ЦУ и ДБ КРАМС осуществлялась с помощью специальных тест-программ, вводимых командами с пульта управления станцией. Для ЦУ проводилась проверка эталонов сопротивления и напряжения. Для каналов измерения КРАМС с выходом в виде электрического сопротивления при правильной работе ЦУ должны соблюдаться неравенства:

$$\begin{aligned} [(\mathcal{E}_2 - \mathcal{E}_1) - 4373] &\leq 100 \\ (\mathcal{E}_1 - 800) &\leq 200, \end{aligned} \quad (9)$$

где \mathcal{E}_1 и \mathcal{E}_2 — числовые коды, соответствующие скорректированным значениям первой и второй образцовым мерам.

Значения \mathcal{E}_1 и \mathcal{E}_2 снимались с выхода каналов измерения с ленты РТА. Например при измеренных значениях $\mathcal{E}_1 = 854$ и $\mathcal{E}_2 = 5246$ обработка по (9) показала:

$$\begin{aligned} [(\mathcal{E}_2 - \mathcal{E}_1) - 4373] &= [(5246 - 854) - 4373] = \\ &= [(5246 - (854 + 4373))] = 5246 - 5227 = 19, \text{ т. е.} \end{aligned}$$

$19 < 100$, соответственно по (9) и неравенству $(\mathcal{E}_1 - 800) = (854 - 800) = 54$, т. е. $54 < 200$.

Для каждого из образцовых мер \mathcal{E}_1 и \mathcal{E}_2 брались из 11 измерений. Обработка результатов проверки показала, что образцовые меры сопротивления не превышают нормированного тест-программой кода 100 и 200.

Аналогичным образом была произведена проверка ЦУ для случая образцовых мер напряжения (для каналов измерения с выходом в виде

напряжения). При правильной работе ЦУ в этом случае должны соблюдаться неравенства:

$$[(\mathcal{E}_2 - \mathcal{E}_1) - 3520] \leq 300,$$

$$(\mathcal{E}_1 - 800) \leq 200. \quad (10)$$

Значения \mathcal{E}_1 и \mathcal{E}_2 снимались с табло инверсного кода, находящегося на лицевой панели пульта управления ЦУ. Например, при измеренных (снятых с табло пульта) значениях $\mathcal{E}_1 = 848$ и $\mathcal{E}_2 = 4495$ получим при обработке:

$$[(\mathcal{E}_2 - \mathcal{E}_1) - 3520] = [(4495 - 848) - 3520] = 3647 - 3520 = 127,$$

т. е. $127 < 300$, аналогично, по второму неравенству (10):

$$(\mathcal{E}_1 - 800) = 848 - 800 = 48, \text{ т. е. } 48 < 200.$$

Также была произведена серия измерений значений \mathcal{E}_1 и \mathcal{E}_2 , а обработка результатов поверки показала, что образцовые меры напряжения не превышают нормированного тест-программой кода 200 и 300.

Поверка образцовых мер ДБ станций КРАМС осуществлялась аналогично по измеренным образцовым мерам \mathcal{E}_1 и \mathcal{E}_2 на соответствие требований выполнения неравенств (10). Результаты поверки показали, что образцовые меры ДБ также не превышают нормированного тест-программой кода 200 и 300.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ф а т е е в Н. П. Передача размеров единиц физических величин и научно-технические мероприятия по разработке и внедрению локальных поверочных схем гидрометслужбы для метеорологических измерений. — Труды ГГО вып. 414, 1978, с. 9—19.
2. П р и б о р ы и установки для метеорологических измерений на аэродромах. — Л., Гидрометеиздат, 1981, с. 185—186.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДИКИ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ПОВЕРКИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ВЕТРА НА МЕСТЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Измерения характеристик ветра необходимы для изучения атмосферных процессов, а также для решения прикладных задач народного хозяйства.

В естественных условиях воздушный поток (ветер) вследствие неровности рельефа местности, а также сил трения, вязкости и инерции частиц среды всегда имеет турбулентный характер, что и определяет специфичность эксплуатации приборов.

При воздействии на различные объекты, в том числе и на СИ характеристики ветра, влияние ветра может проявляться следующим образом:

— ветер воздействует на объекты с некоторой (в среднем) равномерной силой (т. е. оказывает определенное динамическое давление) в течение некоторого промежутка времени;

— ветер воздействует на объекты с некоторой переменной силой (т. е. оказывает переменное давление), вызывающей колебания, вибрацию, тряску объекта в течение всего периода эксплуатации объектов.

Сила равномерного ветрового давления, действующая на единицу поверхности, пропорциональна кинетической энергии ветра:

$$F \leq C \frac{\rho}{2} \bar{v}^2 \text{ Дж/м}^3, \quad (1)$$

где \bar{v} — средняя скорость ветра за выбранный интервал осреднения; C — аэродинамический коэффициент сопротивления, зависящий от формы объекта; ρ — плотность воздуха.

Резкие и мощные порывы ветра, воздействуя на СИ скорости ветра, выводят их из состояния покоя ветровым толчком (динамическим ударом), после чего при определенных скоростях воздушного потока возникают разрушающие колебания на резонансной частоте, усиливающие износ приборов, и, как следствие, увеличивающие погрешности измерения.

При измерении скорости и направления ветра можно выделить следующие характерные источники погрешностей:

— погрешности за счет воздействия на СИ окружающей среды;

— погрешности, связанные с измеряемым параметром (скоростью ветра), т. е. мультипликативная составляющая погрешности;

— погрешности, вызванные нелинейными выходными статическими характеристиками СИ;

— погрешности, обусловленные методикой измерений параметров ветра;

— погрешности, вызванные погрешностью определения градуировочной характеристики СИ при поверке, т. е. погрешностью оценки закона распределения систематической погрешности по диапазону измерения.

Характерной особенностью погрешности измерения скорости ветра является наличие не только независимых (аддитивных) погрешностей, но и связанных с измеряемым параметром (скоростью ветра) мультипликативных погрешностей. Часто эти связи представляют в виде линейной функциональной зависимости со случайным коэффициентом пропорциональности — так называемая мультипликативная связь. Теоретически линейных зависимостей в реальных СИ не существует, так как необратимые процессы приработки и износа, а также старения элементов конструкции СИ, определяющие изменение погрешности во времени, при различных скоростях воздушного потока, имеют различные интенсивности. Кроме этого, на резонансных частотах процессы приработки и особенно износа и старения элементов конструкции СИ развиваются особенно быстро. Следовательно, в любой момент времени при эксплуатации и даже в период поверки СИ наблюдается нелинейный вид закона распределения погрешности измерений в зависимости от скорости воздушного потока. Так, проведенный в работе /1/, расчет на ЭВМ закона распределения погрешности по диапазону скоростей при выпуске из производства анеморумбометров типа М-63М-1 показал, что он строго говоря, может быть описан полиномом пятой степени вида:

$$\Delta v = 0,0381021 - 0,112684v + 0,012552v^2 - 0,000537v^3 + 0,000011v^4 - 0,000000v^5. \quad (2)$$

Аналогичный закон распределения был получен и для других типов СИ скорости ветра.

Из полученных в /1/ выражений вида (2) для рабочих СИ погрешность измерений в зависимости от скорости воздушного потока представляет собой нелинейную зависимость /2/ со случайным коэффициентом пропорциональности

$$\Delta v = (v_0 + C_i v + C_j v^2), \quad (3)$$

где v_0 — порог реагирования СИ; C_i, C_j — случайный коэффициент мультипликативной составляющей погрешности для i -го СИ; v — скорость воздушного потока.

Из (3) следует, что при поверке наиболее важными операциями должны быть операции по определению v_0 и $C_i C_j$. Последний в силу нелинейной зависимости /3/ может быть определен в диапазоне малых скоростей (до 5 м/с) по 2–3 отметкам, например, с помощью термоанемометра при $v \sim v_0$ и $v \approx 5$ м/с и одной из точек на концах диапазона

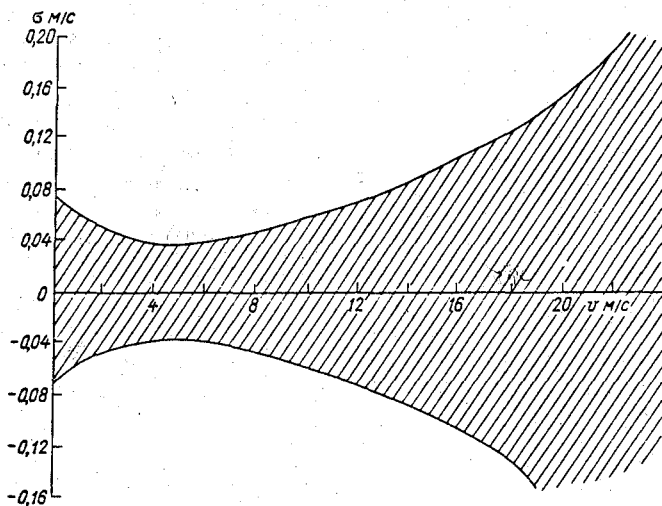


Рис. 1. Распределение случайной погрешности по диапазону измерений для анеморумбометров типа М-63, М-63-М.

скоростей. При $v = 5$ м/с наблюдается обычно минимум дисперсии случайной составляющей погрешности. Зависимость среднеквадратической погрешности σ от скорости воздушного потока v для 10 приборов типа М-63М-1 приведена на рис. 1. Причинами возникновения мультипликативных погрешностей являются как случайный разброс статического коэффициента преобразования, так и колебания внешних факторов среды (давления, плотности воздуха и т. п.).

При поверке СИ скорости ветра определяются нормируемые метрологические характеристики (НМХ) и их соответствие заданным пределам или пределу допускаемой погрешности. В частности, при поверке определяются:

- допускаемая инструментальная погрешность и закон ее распределения по диапазону измерения $\Delta_{ин}$;
- допускаемая методическая погрешность измерений — $\Delta_{м}$;
- допускаемая динамическая погрешность измерений — $\Delta_{дин}$.

Все погрешности $\Delta_{ин}$, $\Delta_{м}$ и $\Delta_{дин}$ могут иметь как систематическую, так и случайную составляющие. Систематическая составляющая, поддающаяся конкретной оценке, подлежит исключению путем введения соответствующей поправки и, следовательно, может не рассматри-

ваться, как составляющая предельно допустимой погрешности. Неопределенностями этих поправок, оцененных либо расчетным, либо экспериментальным путем, являются неисключенные остатки систематической погрешности, которые можно отнести к категории случайных погрешностей. Если суммарная допускаемая погрешность Δ_d нормирована для типа СИ правильно, то ее следует рассматривать как характеристику случайных погрешностей измерений, соответственно определенную с требуемой доверительной вероятностью, например, $P = 0,99$; что соответствует при нормальном законе распределения случайных составляющих погрешностей доверительному интервалу 2α . В этом случае и составляющие $\Delta_{ин}$, Δ_m и $\Delta_{дин}$ должны обладать той же доверительной вероятностью. Так как все эти составляющие взаимно независимы, то справедливо суммарную погрешность можно представить в виде

$$\Delta_d = \sqrt{\Delta_{ин}^2 + \Delta_m^2 + \Delta_{дин}^2} \quad (4)$$

Важно отметить, что СИ должны применяться с заданной вероятностью безотказной работы в течение определенного интервала времени, или иначе в течение нормированного МПИ и, следовательно, при оценке предела допускаемой погрешности необходимо учитывать осредненное значение закона распределения погрешности измерений для этого МПИ. Последний получается в результате осреднения "текущего" закона распределения погрешности измерений по промежутку времени (t_1, t_2) равному МПИ, т. е.:

$$g_{cp}(\Delta i) = S_{t_1}^{t_2} g(\Delta_j, t_{МПИ}) dt, \quad (5)$$

где $g(\Delta_j, t_{МПИ})$ и $g_{cp}(\Delta i)$ — соответственно текущая и средняя плотности вероятности процесса дрейфа во времени погрешности СИ.

Для обоснования наиболее целесообразных методов поверки СИ скорости ветра рассмотрим причины возникновения погрешностей измерения, связанных с их конструкциями. Эти источники погрешностей можно разделить на следующие:

1. Погрешности за счет неточности изготовления ветроприемников (чашек или винтов), что вызывает разброс выходных характеристик;
2. Погрешности, вносимые измерительным преобразователем, а также элементами дистанционных передач;
3. Погрешности за счет завышения значений средней скорости ветра γ_{cp} пульсирующим воздушным потоком, воспринимаемым ветроприемником (чашкой или винтом);
4. Погрешности за счет моментов трения и нагрузки на осях (погрешность порога реагирования v_0);
5. Погрешность, обусловленная методом осреднения.

Первые четыре составляющие можно классифицировать как систематические, которые подлежат исключению и которые изменяются

в процессе эксплуатации в зависимости от средней скорости воздушного потока для данной климатической зоны, где это СИ работает. Последняя составляющая относится к методической погрешности.

В настоящее время известны методики поверки СИ скорости ветра как с применением аэродинамических труб (АТ), так и без них. Первая из них основана на определении разности показаний поверяемого и образцового СИ на определенных скоростях. Разность показаний v_{cp} не должна превышать нормированного предела допускаемой погрешности Δ_d вида:

$$\Delta_d = \pm (0,5 + 0,05v_{cp}), \quad (6)$$

или в общем виде:

$$\Delta_d \leq \pm (v_0 + R \cdot v_{cp}), \quad (7)$$

где v_{cp} — средняя за отсчет измеряемая скорость; k — коэффициент мультипликативной составляющей погрешности, постоянной для данного типа СИ; v_0 — порог реагирования для данного типа СИ.

Из анализа выражений (6) и (7) видно, что эти формулы дают несколько завышенную оценку статической погрешности СИ и физически не обоснованны. В частности, представляется ошибочным отнесение аддитивной погрешности, обусловленной порогом реагирования СИ, к случайным погрешностям. Физически порог реагирования СИ есть величина положительная и, следовательно, погрешность Δ_d обусловленная v_0 (Δv_0) также есть величина положительная. Аналогично, коэффициент преобразования C_i i -го СИ может быть только положительным. Отсюда, все составляющие двучленной формулы (7) положительные величины и отнесение их к случайным погрешностям, имеющих как положительное, так и отрицательное значение физически невозможно. Выражения (6) и (7) полностью не учитывают случайной погрешности измерений и ее закона распределения по диапазону скоростей. Это позволяет сделать вывод о том, что пределы допускаемых погрешностей для всех типов СИ скорости ветра, отнесенных по формулам вида (7), определены недостаточно точно.

Вполне очевидно, что v_0 и C_i являются при эксплуатации СИ временными функциями, т. е. зависят от процессов приработки, старения и износа, поэтому при поверке именно они и подлежат определению, что не всегда производится. Отличие реальных параметров нестационарного воздушного потока на месте эксплуатации СИ от стационарного (ламинарного) воздушного потока в АТ вызывает появление дополнительных погрешностей, которые в 1,5–2 раза превышают погрешности осреднения.

Исходя из этого, предел допускаемой погрешности для СИ скорости ветра целесообразно нормировать, с учетом изменения нормируемых

метрологических характеристик в процессе эксплуатации, в виде:

$$\Delta(v) = v_0(t) + R(t)v + k_g \sigma(v, t), \quad (8)$$

где $v_0(t)$ — функция изменения во времени порога реагирования; $B(t)$ — функция изменения во времени коэффициента преобразования (коэффициента мультипликативной составляющей погрешности); k_g — коэффициент доверительной вероятности ($k_g = 2,0 \dots 3,0$); $\sigma(v, t)$ — функция изменения во времени случайной погрешности измерения, зависящей от измеряемой скорости ветра также.

Кроме этого, необходимо иметь в виду и то, что функции $v_0(t)$, $R(t)$, $\sigma(v, t)$ зависят также от v_{cp} при которой эксплуатируется СИ, от агрессивности других внешних факторов, оказывающих менее значительное воздействие на СИ.

Из анализа полученных экспериментальных данных, приведенных в /1, 2, 5/ видно, что наиболее нестабильными метрологическими параметрами, подлежащими проверке, являются:

- моменты трения в осях ветроприемников;
- пороги реагирования;
- коэффициенты преобразования;
- центричность осей ветроприемников, т. е. разбаланс чашек и винтов.

При эксплуатации СИ скорости ветра происходит износ и изменение шероховатости поверхностей ветроприемников (чашек или винтов), что приводит к увеличению систематической составляющей погрешности измерения скорости ветра. Для проверки этого положения и для исследования сохранности в процессе эксплуатации аэродинамических качеств винтов, для СИ типа М-63, М-63М-1, ИП ветра АМС КРАМС были выбраны 10 винтов с различным сроком их изготовления (от 1 года до 10 лет) и произведена их продувка в АТ. Перед экспериментами в АТ были проверены углы атаки лопастей винта α . Результаты исследований показали, что максимальное отклонение α от нормированного не превышает 1° , а предел допускаемой погрешности не превышает $\Delta v \leq (0,5 + 0,02v)$ м/с. Это свидетельствует о достаточной стабильности аэродинамических качеств винтов.

Для определения количественных показателей стабильности параметров ветроприемников по УГКС, заводам-изготовителям был проведен сбор статистических данных о наработке на метрологический отказ, вызванный изменением качеств ветроприемников. В табл. 1 приведены данные о наработке на метрологический отказ по группе из 62 СИ типа М-63М, М-63М-1, ИП ветра АМС КРАМС, М-47 и М-49. К сожалению, полученных данных недостаточно для расчета законов распределения наработки на метрологические отказы по каждому из типов СИ, так как количество регулярно поверяемых СИ данных типов сравнительно невелико. Однако в первом приближении можно оценить среднее

Таблица 1

Объем выборки по n = 62			
Наработка на метрологический отказ	3, 5, 3, 6, 4, 4, 3, 3, 5, 4, 2, 11, 6, 4, 8		
	5, 7, 5, 8, 8, 3, 3, 6, 3, 9, 6, 5, 12, 10, 0		
	1, 3, 4, 1, 1, 3, 3, 4, 4, 3, 1, 6, 8, 2, 4		
	2, 7, 3, 2, 7, 6, 4, 3, 3, 1, 6, 8, 1, 4, 6		
	5, 3		
M[Q]	4,6 г.	σ	2,4 г.

время наработки на отказ, которое составляет 4,6 г. и что важно для обоснования методики поверки указанных типов СИ на месте эксплуатации и периодичности их поверки по углу атаки лопастей.

Расчет среднего квадратического отклонения наработки до метрологического отказа σ осуществляется по формуле:

$$S = \frac{\sigma}{\sqrt{62}} = \frac{2,4}{7,9} = 0,30,$$

откуда доверительный интервал при вероятности $P = 0,99$ соответствует $3,7 < MO < 5,5$,

т. е. доверительный интервал (в годах) для оценки среднего времени наработки до метрологического отказа, вызванного нестабильностью ветроприемников.

Оценку сохранности метрологических характеристик винта можно проводить путем определения среднего угла отклонения для 4-х лопастей от нормированного номинального значения угла атаки, при этом должно соблюдаться соотношение:

$$\Delta\varphi = \Delta\bar{\varphi} - \varphi_{\text{ном}} \leq \pm 40. \quad (9)$$

Оптимальный угол атаки $\varphi_{\text{опт}} = 37^\circ 30'$.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод о том, что существующая методика поверки СИ скорости ветра в АТ в основном необходима при выпуске СИ из производства. Эта методика не позволяет исключить систематические погрешности измерения и определить реальные погрешности измерения при эксплуатации СИ в естественных условиях.

Методика поверки СИ скорости ветра без применения АТ /5, 6/ основана на зависимости градуировочной характеристики от геометрических параметров винта и моментов трения в осях винта. Изменение во времени этих параметров приводит к основной массе метрологических отказов. Исходя из этого, при поверке определяются моменты трения на оси винта и отклонение угла установки лопастей винта от номинального допускаемого значения (предела). Достоинством подобной методики является то, что она не зависит от условий поверки, т. е. от нестационарности реального воздушного потока. Допуски на моменты трения в осях могут быть установлены достаточно точно, а зависимость погрешности от аэродинамических свойств ветроприемников в пределах существующего МПИ (1 год) очень слабая, что показали результаты эксплуатации СИ скорости ветра в естественных условиях. Основным недостатком этой методики является невозможность определения R , так как в этом случае необходима комплексная оценка как аэродинамических свойств ветроприемников, так и моментов трения, а главное это функции преобразования прибора.

На основании проведенных исследований предполагается дополнить известную методику поверки СИ скорости ветра без применения АТ следующими операциями, обеспечивающими комплексность методики:

1. Определение v_0 в естественных условиях путем сличения его, например, с образцовым термоанемометром на месте эксплуатации;

2. Определение v_0 в естественных условиях в диапазоне малых скоростей (0,5 ... 10 м/с) путем сличения поверяемого СИ с образцовым термоанемометром в 2-х крайних отметках указанного диапазона скоростей ($v_1 = v_0$ и $v_2 = 5 ... 10$ м/с);

3. Определение поправок шкалы производить по градуировочному графику, построенному по двум отметкам диапазона измерений при условии линейности функции преобразования прибора.

По результатам указанных операций поверки делается оценка Δ_d в двух отметках диапазона измерения в виде:

$$\Delta = \Delta_{обр} + v_0 + cv \pm 3\sigma, \quad (10)$$

где $\Delta_{обр}$ — предел допускаемой погрешности образцового СИ скорости ветра; v_0 — порог реагирования поверяемого СИ скорости ветра; c — коэффициент мультипликативной составляющей погрешности, оцениваемый экспериментально по градуировочному графику, построенному по двум отметкам диапазона измерения ($v_1 = v_0$ и $v_2 = 5 ... 10$ м/с); σ — среднее квадратическое отклонение результатов измерений.

Значение σ оценивается по формуле вида:

$$\sigma = \frac{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}}{2}, \quad (11)$$

где

$$\sigma_1 = \sqrt{\frac{\sum_{l=1}^n (v_{\text{ср}_H} - v_1)^2}{N-1}}, \quad (12)$$

$$\sigma_2 = \sqrt{\frac{\sum_{l=1}^n (v_{\text{ср}_K} - v_1)^2}{N-1}}. \quad (13)$$

В выражениях (12) и (13) $v_{\text{ср}_H}$ — средняя скорость на начальной отметке диапазона измерения; $v_{\text{ср}_K}$ — средняя скорость на конечной отметке диапазона.

Причем, мультипликативную составляющую погрешности в этом случае можно исключить путем введения поправки, что снизит погрешность Δ_d примерно на 10–20 %.

На основании вышеизложенного можно сформулировать следующие выводы:

1. Предлагаемая методика периодической поверки обеспечивает выявление практически всех видов метрологических отказов, указанных выше, а также обеспечивает оценку стабильности метрологических характеристик СИ скорости ветра в условиях их эксплуатации.

2. Сочетание поверки СИ скорости ветра в естественных условиях в диапазоне малых скоростей с поэлементной аттестацией СИ на месте эксплуатации позволяют значительно повысить эффективность традиционных методов поверки и решить вопрос о метрологическом обеспечении СИ скорости ветра без применения АТ и поверки во всем диапазоне измерений.

3. Если функция преобразования близка к линейной, то возможна и целесообразна поверка в диапазоне малых скоростей.

4. Более упрощенный вариант комплексной поверки может включать в себя только операцию определения и операцию контроля моментов трения и нагрузки на оси винта (чашки), а также геометрических параметров ветроприемников.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Окороков В. Ю. Исследование метрологической надежности средств измерений скорости воздушного потока. — Л., Гидрометеоиздат, Труды ГГО вып. 473, 1983.
2. Фатеев Н. П., Рогалев Ю. В., Кожевников Б. Л. Состояние измерений параметров ветра и анализ их метрологического обеспечения. — Л., Гидрометеоиздат, Труды ГГО, вып. 465, 1982.

3. Жуковский Е. Е., Киселева Т. Л., Мандельштам С. М. Статистический анализ случайных процессов. — Л., Гидрометеиздат, 1976. 388 с.
4. Сушинский Б. Л., Фатеев Н. П. Исследование по обоснованию методики контроля градуировочных характеристик измерительных преобразователей ветра типа М-63М-1 в условиях эксплуатации. — Л., Гидрометеиздат, Труды ГГО, вып. 392, с. 58—71.
5. Шестопалов Л. А., Кранцберг А. С. Унифицированный датчик ветра. — М., Труды НИИ ГМП, вып. 26, 1972, с. 3—12.

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДОПУСТИМОГО ЗНАЧЕНИЯ СРЕДНЕЙ СКОРОСТИ ВЕТРА ПРИ ПОСАДКЕ САМОЛЕТОВ

Повышение эффективности метеорологического обеспечения авиации посредством оптимизации измерений и улучшения качества прогноза в общем виде может быть определено как приращение доверительной вероятности наличия благоприятных или неблагоприятных метеорологических условий для взлета и посадки самолетов.

Разрешение на взлет или посадку самолета через интервал времени Δt_n может быть обосновано только в том случае, когда доверительная вероятность $P(\Delta t_n)$ превышения установленного (допустимого) метеоминимума $P_{\text{доп}}$ будет подчиняться условию: $P(\Delta t_n) \geq P_{\text{доп}}$, т. е. минимально-допустимой вероятности превышения метеоминимума [1].

Рассмотрим возможность оценки доверительной вероятности превышения метеоминимума по скорости ветра в районе взлетно-посадочной полосы (ВПП) при оперативном метеобеспечении авиации непосредственно по результатам измерений с учетом погрешностей измерения и инерционного прогноза (формальной экстраполяции) на время до 3 ч.

Доверительную вероятность превышения установленных минимумов по скорости ветра $P_V(\Delta t_n)$ найдем по формуле:

$$\begin{aligned}
 P_V(\Delta t_n) &= P_{V \text{ бок}} \cdot P_{V \text{ прод}} = \vec{P} [+v_{\text{бок доп 1}} \leq \\
 &\leq \vec{v}_{\text{бок}}(\Delta t_n) \leq v_{\text{бок доп 2}}] P [+\vec{v}_{\text{прод доп 1}} \leq \\
 &\leq \vec{v}_{\text{прод}}(\Delta t_n) \leq \vec{v}_{\text{прод доп 2}} + \approx \\
 &\approx \Phi \left[\frac{|\vec{v}_{\text{доп}} - M_V(t_0)|}{\sigma_{V \text{ общ}}} \right] = \Phi(z_1), \quad (1)
 \end{aligned}$$

где $\vec{v}_{\text{бок доп 1}}$, $\vec{v}_{\text{бок доп 2}}$, $\vec{v}_{\text{прод доп 1}}$, $\vec{v}_{\text{прод доп 2}}$ — соответственно боковые и продольные (по отношению к ВПП) предельно допустимые значения коллинеарных векторов скорости ветра; $\vec{v}_{\text{доп}}$ — один из установленных минимумов скорости ветра при котором достигается минимизация скалярной величины $|\vec{v}_{\text{доп}} - \vec{v}t|$; $M_V(t_0)$ — оценка математического ожидания скорости ветра, полученная на интервале осреднения t_0 ; $\Phi(z_1)$ — интегральная функция нормального распределения; $\sigma_{V \text{ общ}}$ — суммарная средняя квадратическая погрешность определения мгновенной скорости ветра через время Δt_n .

Напишем выражение для суммарной средней квадратической погрешности $\sigma_{V_1 \text{ общ}}$:

$$\begin{aligned} \sigma_{V_1 \text{ общ}}^2 &= \sigma_{V_1 \text{ общ}}^2(\tau_0, t_0, \Delta t_n) = \\ &= \sigma_{V_1 \text{ изм}}^2(\tau_0) + \sigma_{V_n}^2(\tau_0, t_0, \Delta t_n), \end{aligned} \quad (2)$$

где $\sigma_{V_1 \text{ изм}}^2(\tau_0)$ — средний квадрат погрешности измерения мгновенной скорости ветра, формируемой на интервале дискретизации (осреднения) τ ; $\sigma_{V_n}^2(\tau_0, t_0, \Delta t_n)$ — средний квадрат погрешности экстраполяции мгновенной скорости ветра. В соответствии с /2, 3/ для $\sigma_{V_n}^2(\tau_0, t_0, \Delta t_n)$ получим:

$$\sigma_{V_n}^2(\tau_0, t_0, \Delta t_n) = \sigma_{V_n}^2 = b_V(t_0, \Delta t_n) + \sigma^2(\tau_0, t_0), \quad (3)$$

где $b_V(t_0, \Delta t_n)$ — структурная функция средней скорости ветра $\bar{v}(t_0)$, формируемой на интервале осреднения; $\sigma^2(\tau_0, t_0)$ — средний квадрат отклонений мгновенной скорости ветра в интервале t_0 .

Представим второй член в выражении (3) в виде:

$$\sigma^2(\tau_0, t_0) = K_V^2 \bar{v}(t_0) \ln \frac{t_0}{\tau_0}, \quad (4)$$

где K_V — безразмерный коэффициент, значение которого по экспериментальным данным, приведенным в /2/, для неустойчивой безразличной и устойчивой стратификации атмосферы, соответственно, равны 0,1, 0,8, 0,06.

По экспериментальным данным в /2/ получено, что при $t_0 = t_{\text{опт}}$, соответствующем минимуму σ_{V_n} , выражение (3) может быть представлено в виде:

$$\sigma_{V_n}^2 = \sigma_V^2(\tau_0, t_{\text{опт}}) \cdot [F(\tau_0, t_{\text{опт}}, \Delta t_n + 1)] = F'_V \cdot \sigma_V^2(\tau_0, t_{\text{опт}}), \quad (5)$$

где структурный коэффициент $F_V(\tau_0 = 3 \text{ с}, t_{\text{опт}}, \Delta t_n)$ равен 1,0; $F_V(\tau = 10 \text{ с}, t_{\text{опт}}, \Delta t_n)$ равен 0,47 и не зависит от уровня турбулентности. При этом, для значений $\tau_0 = 3 \dots 10 \text{ с}$, $t_{\text{опт}} = 2 \text{ мин}$ (при экстраполяции результатов измерений на время t от 1¹ мин. до 3 ч).

Если по результатам измерений определить $\sigma^2(\tau_0, t_0)$, то тогда по выражениям (5), (2) и (1) можно найти значение вероятности $P(\Delta t_n)$.

Оценку влияния погрешностей измерения и экстраполяции скорости ветра на вероятность $P_V(\Delta t_n)$ выполним по формулам (1), (2), (4) и (5). После подстановки (4) и (5) в (2) получим:

$$\sigma_{V_1 \text{ общ}}^2 = \sigma_{V_1 \text{ изм}}^2(\tau_0) + F'_V K_V^2 \bar{v}(t_{\text{опт}}) \ln \frac{t_{\text{опт}}}{\tau_0}. \quad (6)$$

Но- мер	$\Delta t_{\text{п}}$, мин	τ_{D} , с	$t_{\text{опт}}$, мин	q_{V} , м/с	$V(t_{\text{опт}})$, м/с												
					10	11	12	13	14	15	16	18					
1		10	10	1,0 + 0,07V	0,999	0,990	0,977	0,942	0,881	0,797	0,705	0,500					
2	11 ... 180	10	10	0,5 + 0,05V	0,999	0,994	0,989	0,962	0,910	0,826	0,722	0,500					
3		3	10	1,0 + 0,07V	0,995	0,981	0,962	0,900	0,833	0,767	0,666	0,500					
4		10	2	1,0 + 0,07V	0,999	0,998	0,988	0,966	0,916	0,834	0,736	0,500					
5	1 ... 10	10	2	0,5 + 0,05V	1,000	1,000	0,997	0,985	0,950	0,873	0,766	0,500					
6		3	2	1,0 + 0,07V	0,998	0,989	0,967	0,925	0,860	0,779	0,688	0,500					

Результаты расчета доверительной вероятности $P_V(\Delta t_p)$ непревышения скорости ветра $v_{\text{доп}} = 18$ м/с по выражениям (1) и (6), для случая безразличной стратификации атмосферы, приведены в таблице.

Анализ результатов, приведенных в таблице показывает, что уменьшение средней квадратической погрешности измерений (в 2 раза) приводит к увеличению доверительной вероятности для установленного значения $P_{\Delta_{\text{оп}}} = 95\%$ примерно на 2%. Это позволяет при безразличной стратификации атмосферы (средний уровень турбулентности) принимать решение о посадке самолета через 1–10 мин при средней скорости ветра достигающей $\bar{v} = 14$ м/с, а не $\bar{v} = 13$ м/с (4 и 5 строки таблицы). Применение рекомендованного ИКАО интервала осреднения скорости ветра $t_0 = 2$ мин, при экстраполяции результатов измерений на время более 10 мин приводит к завышению доверительной вероятности благоприятных для посадки самолета условий примерно на 5% при средней скорости ветра равной $\bar{v} = 15$ м/с и на 2% при $\bar{v} = 13$ м/с (сопоставляются данные в 1 и 4, 2 и 5, 3 и 6 строчках таблицы), что снижает безопасность полетов.

Формирование результатов мгновенных измерений скорости ветра на оптимальном (для взлета и посадки самолета) интервале дискретизации $t_{\text{опт}} = 10$ с приводит к увеличению доверительной вероятности на 2% и $v_{\text{доп}}$ на 1 м/с и к уменьшению погрешностей измерений мгновенной скорости ветра.

Исходя из вышеизложенного можно прийти к выводу о том, что оптимизация интервалов осреднения, использование количественных оценок наличия благоприятных условий полета с учетом уровня турбулентности атмосферы, позволяет исключить субъективные решения при метеообеспечении авиации, а также существенно повысить регулярность и безопасность полетов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белгородский С. Л. Автоматизация управления посадкой самолета. — М., Изд-во Транспорт, 1972. 352 с.
2. Боханов В. Е. Исследование методов повышения качества метеорологической информации при обеспечении взлета и посадки самолета. Автореферат диссертации. — Л., ГГО 1976. 16 с.
3. Боханов В. Е. Интервалы осреднения при формировании "мгновенных" значений метеорологических величин для обслуживания посадки самолета. — Труды ГГО, 1979, вып. 433, с. 38–43.

К ВОПРОСУ ОБ АТТЕСТАЦИИ ОБРАЗЦОВЫХ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ТРУБ

В соответствии с требованиями ведомственной поверочной схемы Госкомгидромета для средств измерения (СИ) скорости воздушного потока /1/, применяемые для проверки анемометров образцовые аэродинамические трубы (АТ) должны подвергаться периодической аттестации (переаттестации) непосредственно на месте эксплуатации АТ. Аттестация производится на соответствие требованиям регламентирующих технических материалов (РТМ), разработанных ГГО им. А. И. Воейкова совместно с НПО ВНИИМ им. Д. И. Менделеева. РТМ включает целый комплекс требований, предъявляемых к характеристикам АТ, а также методы их определения при первичной аттестации. Следует отметить, что выполнение требований РТМ представляет собой довольно значительный объем работ, затрат времени, а также значительного количества производимых при аттестации измерений.

Целью настоящей статьи является обоснование по сокращению объема работ при вторичной аттестации АТ, базирующееся на основе анализа изменения во времени метрологических характеристик, полученных опытным путем при предыдущих аттестациях ряда АТ. Работы по аттестации АТ регулярно проводятся начиная с 1975 г.

При анализе требований РТМ последние можно разделить на требования к характеристикам воздушного потока и на требования к метрологическим характеристикам образцовых СИ, входящих в состав АТ.

Требования к характеристикам воздушного потока, которые включают в себя неравномерность потока по сечению, нестабильность во времени, интенсивность турбулентных пульсаций, скос потока относительно оси трубы и ряд других, относятся к конструкции и качеству изготовления АТ. Требования к метрологическим характеристикам применяемых в составе АТ образцовым СИ включают в себя определение коэффициента измерительных отверстий сопла (определение коэффициента сопла K_c) при измерении скоростей воздушного потока от 5 м/с и более, градуировочной зависимости счетчика-импульсатора оборотов винта АТ /2/ при измерении скоростей воздушного потока от 0,2 до 5,0 м/с.

Наиболее трудоемкими по объему выполняемых измерений являются операции по определению неравномерности поля скоростей (определение "зоны равных скоростей") и определению интенсивности турбулентных пульсаций воздушного потока. Эти характеристики определяются для трех сечений рабочей зоны и для 5–7 значений скоростей воздушного потока создаваемых в АТ. Причем в каждом из сечений производятся измерения в среднем на 50–80 точках, а по трем сечениям рабочей зоны и по 7 значениям скоростей это составляет от

1400 до 1680 измерений. Аналогичное количество измерений производится и при определении интенсивности турбулентных пульсаций (практически в этих же точках).

Аэродинамические трубы устанавливаются стационарно на местах их эксплуатации и в течение срока эксплуатации не перемещаются с места на место, а их конструкция не нарушается. Неравномерность поля скоростей, характеризуемая коэффициентом μ , а также интенсивность турбулентных пульсаций ϵ определяется в диапазоне скоростей воздушного потока от 5 м/с и более в трех сечениях рабочей зоны АТ, включая сечение на срезе выходного сопла и сечениях, отстоящих от среза сопла на 200 и 400 мм. Коэффициент μ представляет собой, по сути дела, относительную погрешность отклонения скоростей в точках зоны равных скоростей от скорости на оси воздушного потока. Зона равных скоростей определяется при аттестации путем выделения части сечения воздушного потока в точках которого значение коэффициента μ отклоняется не более, чем на 3—4 %, а сам коэффициент рассчитывается по формуле:

$$\mu = \left(1 - \frac{\bar{v}_i}{\bar{v}_0}\right) 100 \%, \quad (1)$$

где \bar{v}_i — средняя измеренная скорость воздушного потока при аттестации АТ в i -й точке сечения в м/с; \bar{v}_0 — средняя измеренная скорость воздушного потока при аттестации АТ в центре сечения (на оси потока).

Неравномерность воздушного потока в сечении, рассчитываемая по формуле (1), определяется по данным результатов синхронных измерений скорости в центре сечения и в каждой из i -х точек этого сечения, причем при измерениях используются две пневмометрические трубки Пито в комплекте с двумя микроманометрами. Принимая во внимание реальные условия эксплуатации АТ, когда производится массовая поверка СИ скорости ветра и не всегда возможно производить синхронные измерения скорости воздушного потока по образцовым СИ АТ и группе поверяемых анемометров, то можно применить более упрощенную операцию. При этом не теряется качество в определении оценки неравномерности воздушного потока, а значение коэффициента μ рассчитывается в этом случае по формуле:

$$\mu = \left(1 - \frac{v_i}{v_c}\right) 100 \%. \quad (2)$$

где v_i — скорость воздушного потока в i -й точке сечения в м/с; \bar{v}_c — средняя скорость воздушного потока в целом по сечению зоны равных скоростей в м/с.

Измерения производятся одной пневмометрической трубкой Пито в комплекте с одним микроманометром в течение времени t не более 30 мин во всех точках зоны равных скоростей. Это положение хорошо согласуется с данными анализа значений коэффициентов μ , определенными для ряда АТ при их аттестации и при переаттестации в течение ряда лет. Анализ более 80 диаграмм распределения значений μ по сечениям для ряда труб в течение 8 лет показал, что хотя эти значения могут колебаться в широких пределах от 0,5 до 3–3,5 %, но во всех случаях в зоне равных скоростей μ не превысила значения, нормированного по РТМ, т. е. $\mu \leq 4$ %. Источники, влияющие на значение коэффициента (выход за пределы нормированного допуска), в основном будут определяться нарушением конструкции АТ, деформации ее корпуса, а также после проведения крупного ремонта. Так как практически все аттестуемые АТ не подвергаются механическим нарушениям конструкции, то и равномерность поля скоростей остается в пределах нормированного допуска ($\mu \leq 4$ %). Результаты переаттестации АТ показали, что практически значения коэффициентов μ остаются постоянными (с небольшими вариациями для конкретной АТ) во времени. Это позволяет при повторных аттестациях (переаттестациях) АТ резко ограничить количество исследуемых точек в сечении, а также выбирать только одно сечение, а именно, рабочее сечение (сечение в котором располагается ветроприемник поверяемого СИ). Достаточно брать лишь 5–6 точек в сечении на границах зоны равных скоростей и контрольную точку в центре сечения (на оси воздушного потока).

Анализ материалов аттестаций АТ при определении ϵ показал аналогичные результаты, что также позволяет ограничить количество точек и измерений в сечениях и брать их такое же количество, как и при определении μ .

Исследования равномерности воздушного потока и представление результатов измерений могут производиться самими организациями, представляющими АТ на аттестацию и переаттестацию. Аттестация применяемых образцовых СИ (пневмометрические трубки Пито, микроманометры) производится органами метрологической службы или с ее участием.

Обсудим далее возможность сокращения объема измерений при определении коэффициента сопла АТ — K_c . Коэффициент сопла K_c определяется путем сличений показаний СИ по перепаду давлений, входящего в состав образцовой АТ, с показаниями образцовой напорной трубки первого разряда. Перепад давлений измеряется на входе и выходе сопла трубы, для чего в трубе имеются специальные измерительные отверстия (коллекторные отверстия), расположенные в двух сечениях сопла (разных по площади поперечных сечений), и соединяемые шлангами с микроманометром. Чаще всего используются микроманометры ММН-240 с наклонной трубкой.

Теоретически, при определении скорости воздушного потока, уста-

навливаемого в АТ, используется функциональная зависимость вида:

$$v_{AT(\tau)} = F(P), \quad (3)$$

где P — разность давлений в сечениях сопла АТ, измеряемая микроманометром.

Принимая, что P является динамическим напором, рассчитывается значение скорости в АТ по формуле:

$$v_{AT(\tau)} = \sqrt{\frac{2g\Delta P}{\rho}}, \quad (4)$$

где g — ускорение свободного падения, которое принимается равным $9,8 \text{ н/м}^2$; $P = pk$ — разность давлений, равная произведению числа давлений столба жидкости на коэффициент наклона трубки микроманометра k в кгс/м^2 ; ρ — плотность воздуха, зависящая от температуры и давления воздуха в момент измерений в кг/м^3 . Для стандартных условий при $t = 15^\circ \text{C}$ и $P = 1013,25 \text{ гПа}$ значение $\rho = 1,225 \text{ кг/м}^3$.

В реальных условиях измерений значение скорости воздушного потока в АТ рассчитывают по формуле:

$$v_{AT(\tau)} = v_{AT(\tau)} K_c, \quad (5)$$

где K_c — коэффициент измерительных (коллекторных) отверстий сопла АТ, определяемый при ее аттестации (переаттестации).

В свою очередь, коэффициент K есть отношение

$$K_c = \frac{v_{обр}}{v_{AT(p)}}, \quad (6)$$

где $v_{обр}$ — скорость воздушного потока, измеренная образцовой напорной трубой первого разряда. При определении K_c производят одновременные измерения $v_{обр}$ и $v_{атм}$. К образцовой напорной трубке в этом случае подключается микроманометр высокого класса точности, чаще всего это микроманометры типа МКВ, ММ-250. При расчете скорости воздушного потока в АТ применяют формулы (3) и (4) в которых ΔP измеряют в мм водяного столба, а вместо K подставляют значение коэффициента образцовой напорной трубки.

Проанализируем материалы аттестаций ряда АТ при определении коэффициента сопла K_c . В табл. 1 представлены значения коэффициентов K_c и их изменение во времени при первичной аттестации и переаттестациях АТ.

Анализируя данные таблицы видно, что коэффициенты для конкретной АТ со временем практически не изменяются. Причем для ряда АТ

Таблица 1

Принадлежность АТ	1975	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983
НИИП	—	—	—	—	0,95	—	—	0,95
ЭПМ ГГО	—	0,98	—	0,94	—	—	1,0	—
ГГО	0,90	—	0,914	0,91	—	—	0,9881	—
Трест УМ-2	—	0,76	—	0,77	—	—	0,815	—
Сафоновский завод ГМП	—	0,99	—	—	—	0,99	—	—

при их переаттестации была применена сокращенная программа измерений при определении коэффициента K_c . По РТМ требуется проводить измерения на различных скоростях (обычно при пяти и более значениях скоростей), а на каждой скорости производить не менее 20 измерений. При сравнении результатов определения K по полной и сокращенной программе оказалось, что значения коэффициентов K_c практически не изменяются. Следовательно допустимо при переаттестации АТ и определении коэффициента K_c брать по 10 измерений и достаточно на трех значениях скоростей воздушного потока, создаваемого в рабочей зоне АТ.

Следует отметить также, что погрешность определения коэффициента сопла δK для всех АТ не превысила значения, нормированного по РТМ, т. е. $\delta K_c \leq 4\%$. Источником, который может вызвать резкое изменение значений коэффициента K_c , является засорение коллекторных отверстий на входе и выходе сопла АТ, поэтому периодически, не реже одного раза в год, необходимо прочищать коллекторные отверстия.

Остановимся далее на вопросах аттестации АТ в диапазоне малых скоростей до 5,0 м/с. В этом диапазоне в качестве СИ используется счетчик-импульсатор оборотов винта /2/, преобразующий эти обороты в последовательность электрических импульсов, количество которых за 1 с измеряется электронным частотомером серийного производства. Количество электрических импульсов за один оборот вала винта соответствует количеству прорезей кодового диска, установленного на этом валу (не менее 100 прорезей). При аттестации (переаттестации) АТ обычно определяется градуировочная характеристика вида $N = F(v)$, где v — скорость воздушного потока в м/с, N — число импульсов за 1 с, причем в качестве образцового СИ применяется электроанемометр. Результаты градуировки выражаются в виде одного или нескольких линейных уравнений вида:

$$N = Av + B. \quad (7)$$

В уравнении (7) коэффициенты А и В рассчитываются методом наименьших квадратов, по результатам синхронных измерений и по следующим формулам:

$$A = \frac{\sum_{i=1}^n N_i \cdot \sum_{i=1}^n v_i - \sum_{i=1}^n N_i \cdot v_i \cdot n}{(\sum_{i=1}^n v_i)^2 - n (\sum_{i=1}^n v_i)^2},$$

$$B = \frac{\sum_{i=1}^n N_i - A \cdot \sum_{i=1}^n v_i}{n}, \quad (8)$$

где n — количество парных измерений значений v_i и N_i .

Количество линейных уравнений определяется характером зависимости $N = F(v)$. В диапазоне малых скоростей эта зависимость может быть не строго линейной, а при градуировке (поверке) СИ скорости ветра необходимо погрешность поверки свести к минимуму, то необходимо производить кусочно-линейную аппроксимацию нелинейного отрезка градуировочной зависимости $N = F(v)$ линейными уравнениями вида (7). Иногда такую аппроксимацию необходимо проводить и в случае влияния загромождения рабочего сечения АТ поверяемыми анемометрами. Изложенную выше методику аттестации АТ в диапазоне малых скоростей необходимо включить в РТМ.

Практически, применение счетчика-импульсатора может быть распространено и во всем измеряемом диапазоне скоростей, задаваемом в АТ, т. е. возможно определять градуировочную зависимость $N = F(v)$ для всего диапазона скоростей. Однако здесь следует иметь в виду то, что применение коллекторных отверстий при скоростях $v > 5$ м/с дает более надежные результаты.

Это связано с тем, что при длительной эксплуатации АТ возможно изменение зазора между окружностью, описываемой винтом и корпусом АТ, а кроме этого меняется угол атаки лопастей винта. Влияние указанных причин на зависимость $N = F(v)$ более всего может проявляться при скоростях воздушного потока более 5 м/с. Смещение градуировочной зависимости $N = F(v)$ во времени должно проверяться один раз в 5 лет и в случае отклонения этой зависимости от первоначальной градуировки необходимо осуществлять градуировку счетчика-импульсатора заново или для диапазона скоростей свыше 5 м/с пользоваться коллекторными отверстиями сопла АТ.

ВЫВОДЫ

1. На основании анализа статистических материалов переаттестации АТ возможно сокращение объема измерений при определении неравномерности поля скоростей, интенсивности турбулентных пульсаций и

определение коэффициента сопла K_c .

2. Допустимо градуировать АТ с применением счетчика-импульсатора во всем диапазоне скоростей воздушного потока, задаваемого в АТ.

3. Методику аттестации АТ в диапазоне малых скоростей воздушного потока (до 5 м/с) необходимо включить в РТМ по аттестации АТ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ф а т е е в Н. П. Поверочные схемы для метеорологических измерений. — Труды ГГО, 1973, вып. 313, с. 145–155.
2. Б л а н т е р Д. Я., Р о г а л е в Ю. В. Результаты метрологической аттестации образцовых аэродинамических труб. — Труды ГГО, 1981, вып. 432, с. 63–72.
3. К а с с а н д р о в а О. Н., Л е б е д е в В. В. Обработка результатов наблюдений. — М., Изд-во Наука, 1970. 104 с.

ПОВЕРКА ИЗМЕРИТЕЛЯ ВЫСОТЫ НИЖНЕЙ ГРАНИЦЫ ОБЛАКОВ С ПОМОЩЬЮ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ ЗАДЕРЖКИ

Одним из важнейших видов метеоинформации, необходимой для осуществления безопасного взлета и посадки самолетов, является высота нижней границы облаков (ВНГО). Измерения ВНГО в аэропортах выполняются светодальномерами типа ИВО или РВО, причем, как правило, эти приборы применяют в комплекте с приставкой ДВ, которая обеспечивает их дистанционную работу и применение в составе аэродромных автоматических метеостанций типа КРАМС. Качество поступающей со светодальномеров информации и надежность работы приборов этого типа обеспечивается их регулярным обслуживанием и периодическими поверками. Поверка приборов для измерения ВНГО производилась по методике, изложенной в /3/ и в настоящее время переработана. Поскольку применяются несколько типов светодальномеров и возможно появление их новых модификаций, было признано целесообразным разработать единую методику поверки этих приборов, позволяющую унифицировать основные операции поверки и обеспечить контроль сохранности их метрологических характеристик. В настоящей статье излагается усовершенствованная методика поверки измерителей ВНГО на и приводятся результаты ее апробирования на практике в аэропортах.

Как известно /1/, принцип действия приборов ИВО и РВО основан на измерении времени, затрачиваемого световым импульсом на прохождение расстояния от источника до нижней границы облаков и обратно до светоприемника. ВНГО (Н) определяют по формуле $H = c \cdot \tau / 2$, где c — скорость света, равная $3 \cdot 10^8$ м/с, τ — интервал времени прохождения светоп импульсом расстояния до облаков и обратно.

При поступлении импульса запуска на источник света одновременно включаются устройства измерения временных интервалов — развертка электронно-лучевой трубки блока ИВО-РВО и одноразовый мультивибратор ДВ. Выключение мультивибратора происходит при поступлении на него импульса от светоприемника. Определение временного интервала на экране электронно-лучевой трубки производят визуально путем выведения изображения импульса приемника к метке визира трубки. После выполнения этой операции стрелка потенциометра выведения оказывается на отметке шкалы, по которой прямо ведется отсчет ВНГО.

Из вышеописанного следует, что основной операцией при поверке устройства типа ИВО-РВО должно быть либо определение дальности до светоотражающей поверхности специальной мишени, установленной на известном расстоянии от приемника и источника, либо сопостав-

ление показаний света дальномера с расстояниями ВНГО, имитируемыми специальными временными линиями задержки. В инструкции по методике поверки ИВО, разработанной ГГО к 1970 г., и в технической сопроводительной документации на ИВО был использован первый из названных методов. Этот метод имеет ряд недостатков. Главный состоит в том, что дистанция установки щита-мишени в лучшем случае не превышает 400 м из-за сильной помехи от поверхности земли и окружающих предметов. Практически это расстояние в два-три раза меньше. В результате с помощью указанного метода невозможно определить погрешность дальномера в полном диапазоне измерений до 2000 м. По этой причине метод со щитом используется как дополнительный, контрольный для подтверждения правильности градуировки прибора, выполняемой с помощью встроенного генератора калибровочных меток на экране электронно-лучевой трубки. При масштабах, принятых для построения градуировочного графика (1 мм на 10 м ВНГО и на 1° поворота движка потенциометра выведения), с помощью щита, отнесенного на расстояние $(100 \pm 0,5)$ м, можно обеспечить контроль частоты генератора калибровочных меток, а следовательно, и всей градуировки ИВО с погрешностью не менее $\pm 5\%$.

Из-за ограниченности дистанции метод со щитом используется при поверке приставки ДВ и измерительных каналов ВНГО станции КРАМС также как вспомогательный, позволяющий определить погрешность только в начале диапазона измерения.

Другим важным недостатком этого метода является необходимость использования щитов достаточно больших размеров (4 × 4) м. Установка таких щитов вблизи взлетно-посадочной полосы опасна для воздушных судов. Кроме того, эта трудоемкая операция при большом снежном покрове и других неблагоприятных внешних условиях вообще может быть неосуществима.

Второй метод, основанный на применении линий задержки электрического импульса, используется для юстировки приставки ДВ и в целом канала измерения ВНГО КРАМС. С этой целью для имитации временных интервалов, соответствующих различным значениям ВНГО, в приставке ДВ встроен калибратор в виде серийно выпускаемых линий задержки типа ЛЗТ-4.0-1200.

Однако этот калибратор не может быть использован в качестве образцового средства измерения по двум причинам. Во-первых, при существующей схеме /1/ измерительных каналов приставки ДВ и КРАМС с помощью калибратора контролируется только электрическая часть, а работоспособность оптической части не проверяется, что снижает надежность градуировки и поверки изделия в целом. Во-вторых, в соответствии с ТУ на линии задержки, применяемые в калибраторе, время задержки, гарантируемое с погрешностью не менее $\pm 10\%$. Эта погрешность не может быть уменьшена из-за растянутости и искажений фронта зондирующего импульса, пропускаемого через

линию задержки при аттестации. Отсутствие крутого фронта электрического импульса приводит к заметному разбросу уровней электрического сигнала при одной и той же фазе импульса на входе и при выходе на ЛЗТ. Большая погрешность аттестации стандартных линий задержки исключает применение калибратора при поверке на отметках шкалы более 100 м, так как запас по точности между рабочими и образцовыми средствами измерений при поверке должен быть не менее 1:3 /3/.

Таким образом, к моменту разработки единой унифицированной методики поверки ИВО не существовало приемлемого с метрологической точки зрения способа, который бы мог быть положен в ее основу. Из рассмотренных вариантов более перспективным выглядит второй способ (на линиях задержки), так как он не требует установки громоздких щитов-мишеней и пригоден для создания встроенных устройств контроля.

Предварительный анализ и эксперименты показали, что описанные недостатки использования линий задержек устранимы. Для этого необходимо осуществить поверку светодальномеров типа ИВО или РВО на задержке реальных сигналов: либо импульса запуска источника, либо светового зондирующего сигнала, либо сигнала, поступающего с приемника. Задержка световых импульсов с метрологической точки зрения наиболее предпочтительна, но на современном этапе трудно осуществима технически (оптические ЛЗ). Реализация задержки импульса запуска связана либо с конструктивными переделками блока визирования, либо с использованием громоздких кабельных вставок в высоковольтной линии связи с источником. Поэтому было решено операцию задержки проводить для сигналов светоприемника с применением кабельной вставки в линии его связи с визуальным блоком.

Таким образом, была сформулирована схема поверки, которая представлена на рис. 1.

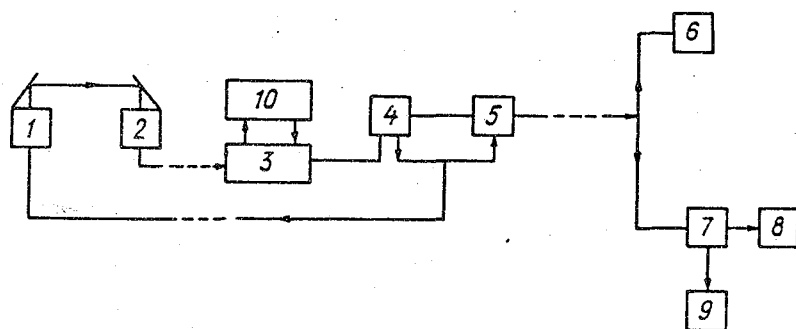


Рис. 1.

Импульсы запуска поступают на источник световых импульсов 1 от блока развертки 4. Излученные светоимпульсы отражаются от поверхности зеркал, установленных на защитных стеклах источника 1 и приемника 2 и попадают на фотоэлемент приемника. С выхода приемника 2 сигнал направляется в линию связи и поступает на блок развертки 4, на входе этого блока в линию связи включена кабельная вставка 3, с помощью которой подключается линия задержки 10. Кабельная вставка представляет собой экранированную коробку, на входе которой установлена вилка разъема, аналогичная вилке на входе блока 4, а выход выполнен в виде отрезка кабеля однотипного с кабелем линии связи, который заканчивается розеткой, как и линия связи. Контакты разъемов кабельной вставки соединены один к одному монтажными проводами с сечением, не меньшим чем сечение жил кабеля линии связи. На боковой стенке кабельной вставки закреплены блочные розетки двух радиочастотных соединителей типа СР-50, на которые с двух сторон выведены концы разрыва жилы, проводящей полезный сигнал. При нормальной работе светодальномера разрыв перемкнут снаружи кабельной вставки замыкателем. Замыкатель и внутренний монтаж разрыва в коробке вставки выполнен кабелем типа РК-60-2, т. е. кабелем, однотипным с тем, который заложен в линию связи.

Полезный сигнал, пройдя кабельную вставку 3, отобразится на экране электронно-лучевой трубки блока визирования и, попав в приставку ДВ 5, остановит работу измерителя интервала времени между импульсом запуска и полезным сигналом приемника. Этот интервал времени преобразуется приставкой ДВ 5 в напряжение постоянного тока, которое подается на стрелочный прибор дистанционного пульта управления 6 и на вход станции КРАМС 7, где значение высоты облаков высвечивается на табло 9 и печатается на телетайпе 8.

При проверке замыкатель отключается от кабельной вставки и на его место поочередно подключаются кабельные линии задержки 10. Линии задержки выполняются также из отрезков кабеля РК-50-2. На конце каждой линии впаяны вилки радиочастотных соединителей СР-50. Благодаря этому, линии могут последовательно соединяться тройниками того же типа. Хорошее качество соединений имеет большое значение для предотвращения помех, ухудшающих результаты проверки.

Преимущество новой схемы проверки состоит в том, что измерительный канал здесь проверяется полностью и практически ошибки исключены.

Важным преимуществом самих кабельных линий задержки перед линиями типа ЛЗТ является возможность их аттестации на стандартной радиоизмерительной аппаратуре с достаточно высокой точностью. В табл. 1 для различных имитируемых при проверке значений ВНГО (Н) приведены соответствующие этим высотам временные задержки сигнала, пределы допускаемых погрешностей измерений ИВО-РВО в нс и в

Таблица 1

Н м	Т нс	ΔT нс	ΔT %	Δ нс	Δ %
30	200	53	26	13	6,5
50	333	66	20	16	5
110	733	106	14,5	26	4
210	1400	165	12	41	3
320	2100	214	10	54	2,6
480	3200	291	9	73	2,3

процентах от измеряемого временного интервала, достигнутые погрешности аттестации кабельных линий задержки (КЛЗ).

Из таблицы видно, что необходимый запас точности между ИВО-РВО и КПЗ может быть легко достигнут. Методика аттестации КЛЗ была разработана специалистами НПО ВНИИМ им. Д. И. Менделеева и нами успешно опробована.

Для доказательства адекватности сигнала, задержанного в КЛЗ, и сигнала от щита мишени был проделан эксперимент со светодальномером типа ИВО-1М, развернутым на полевой базе в п. Воейково. В комплекте с ним работала приставка ДВ-1М. Светодальномер получал питание от сети переменного тока через стабилизатор напряжения, входящий в комплект приставки. Блок визирования и приставка находились в помещении, источник и приемник были установлены на открытой площадке в поле на расстоянии 8,5 м друг от друга и 35 м помещения. Приемник и источник были положены на бок и на дистанции 25 и 50 м были установлены белые щиты. Дистанции были отмерены рулеткой длиной 100 м (кл. 2) с погрешностью $\pm 0,05$ м. Расстояние до первого щита-мишени, а за тем до второго было измерено по электронно-лучевой трубке блока визирования и одновременно по стрелочным указателям дистанционных пультов управления. После этого в линию связи приемника и блока визирования кабельной вставкой были введены КЛЗ. По полученным результатам сумма расстояния до щита-мишени и имитируемой КЛЗ высоты расходилась с полученными значениями по обоим выходам светодальномера в пределах допустимых погрешностей. Это дало основание к отождествлению поверки по щитам и поверке с помощью КЛЗ.

Проект новой методики поверки ИВО или РВО с применением КЛЗ был опробован при аттестации канала измерения ВНГО станции КРАМС. Выходными устройствами ИВО-1М в комплекте с приставкой ДВ являлись стрелочный указатель типа М906, телетайп и цифровое табло станции КРАМС (табл. 2). Измеренное расстояние между передатчиком и приемником составляло $l = 9,8$ м, число наблюдений — $n = 11$.

Для определения систематической погрешности вычислялись откло-

Таблица 2

Номер	H	H + l/2	H		Отклонение	
			указатель	телетайп	указатель	телетайп
1	30	35	40	40	-5	-5
2	49	54	60	65	-6	-11
3	101	106	100	110	6	-4
4	207	212	200	200	12	12
5	320	325	340	315	-15	10
6	481	486	500	490	-14	-4
7	320	325	320	340	5	-15
8	207	212	210	220	2	-8
9	101	106	120	100	-14	6
10	49	54	45	45	9	9
11	30	35	30	35	5	0

нения между значениями имитируемой высоты НГО для каждой КЛЗ и соответствующими отметками НГО по стрелочному указателю и по ленте телетайпа. Систематические погрешности, вычисленные как среднее по ряду отклонений, не превышают

$$\bar{\Delta}_{\text{ук}} = -1,4 \text{ м}, \quad \bar{\Delta}_{\text{т}} = -1,0 \text{ м}.$$

Среднеквадратическое отклонение определялось по формуле

$$\sigma = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (a_i - \bar{\Delta})^2}{n - 1}},$$

при $n = 11$, $\sigma_{\text{ук}} = \pm 10 \text{ м}$, $\sigma_{\text{т}} = \pm 9 \text{ м}$.

Для определения случайной погрешности зададимся доверительной вероятностью $P = 0,9$ и по таблице коэффициентов Стьюдента [2] для данного $(n - 1)$ находим множитель t_{1-a} . В этом случае случайная погрешность

$$\Delta_{\text{с}} = t_{1-a} \sigma.$$

В нашем примере

$$\Delta_{\text{с. ук}} = 1,8\sigma_{\text{ук}} = \pm 18 \text{ м}, \quad \Delta_{\text{с. т}} = 1,8\sigma_{\text{т}} = \pm 16 \text{ м}.$$

Суммарная погрешность

$$\Delta_{\text{ук}} = (-1,4 \pm 18) \text{ м}, \quad \Delta_{\text{т}} = (-1,0 \pm 16) \text{ м}.$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Приборы и установки для метеорологических измерений на аэродромах / Под ред. Л. П. Афиногорова, Е. В. Романова. — Л., Гидрометеиздат, 1981, с. 19–50, 271–282.
2. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. — М., Наука, 1974. 832 с.
3. Фатеев Н. П. Проверка метеорологических приборов. — Л., Гидрометеиздат, 1975, с. 224–264.
4. Справочник по гидрометеорологическим приборам и установкам. — Л., Гидрометеиздат, 1976. 431 с.

ГРАДУИРОВКА ПОЛЯРИЗАЦИИ ИЗМЕРИТЕЛЯ ВИДИМОСТИ М-53

Поляризационный измеритель видимости М-53 широко используется для определения метеорологической дальности видимости на основной сети гидрометеостанций. Качество информации о метеорологической дальности видимости обеспечивается периодическими поверками шкалы измерителя. До последнего времени не существовало методики поверки М-53, отвечающей требованиям ГОСТ 8.042-72 по содержанию и построению методик поверки.

Цель настоящей статьи — описать способ градуировки, который мог бы быть положен в основу поверки измерителей видимости типа М-53.

Принцип действия прибора основан на следующем. Свет от наблюдаемого изображения проходит через поляроид, который может вращаться вокруг оптической оси и двоякопреломляющую призму. Эта призма дает оптическое раздвоение наблюдаемого изображения. Вращением поляроида достигается уравнивание яркости изображений, и по значению угла поворота поляроида определяется значение метеорологической дальности видимости с помощью специальных таблиц.

Известен способ градуировки поляризационных измерителей дальности видимости, состоящей из определения положения начального и конечного деления шкалы путем ослабления яркости одного из изображений до его полного исчезновения. Устройство для реализации этого способа состоит из источника света (лампы накаливания небольшой мощности), расположенного за отверстием в черном экране, и держателя, в котором закреплен измеритель видимости напротив отверстия экрана /3/. Нулевая отметка шкалы лимба измерителя соответствует полному гашению изображения нити накала лампы на фоне экрана, а сотая — полному гашению верхнего изображения.

Недостатком описанного способа градуировки является использование глаза наблюдателя в качестве индикатора гашения одного из изображений. Это является одним из источников погрешностей градуировки, в следствие чего ухудшается точность самих измерений дальности видимости.

Для устранения субъективного источника погрешностей градуировки свет от источника, попадающий в бленду измерителя видимости, предварительно поляризуют дополнительным поляроидом, закрепленным в образцовом угломерном устройстве, который дискретно поворачивают. Угол поворота отслеживают по шкале лимба измерителя видимости путем установки плоскости поляризации поляроида угломерного устройства.

Достижение такого взаимного положения плоскостей поляризации определяют по минимуму сигнала на фотоиндикаторе, установленного на выходе измерителя видимости.

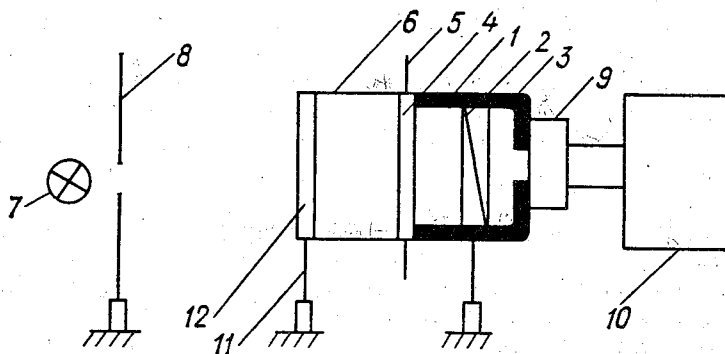


Рис. 1.

На рис. 1 приведена схема устройства реализующего вышеописанный способ, где поляризационный измеритель видимости 1 с двоякопреломляющей линзой 2, наглазником 3, поляроидом 4, лимбом 5 и входной блендой 6 установлен на держателе. Перед блендой закреплен дополнительный поляроид в угломерном образцовом устройстве (11, 12), а также экран с диафрагмой 8 и лампа накаливания 7. Сзади наглазника измерителя расположен приемный элемент 9 фотоиндикатора 10.

Работает устройство следующим образом. При включении лампы накаливания 7 свет от нее проходит через диафрагму 8 и поляроид 11 угломерного образцового устройства 12. Затем уже поляризованный свет проходит через бленду 6 и попадает на поляроид измерителя 4. Если плоскость поляризации света совпадает с плоскостью поляризации поляроида 4 (или составляет угол, меньший 90°), свет (или его часть) проходит через поляроид на призму 2 и наглазник 3, и далее попадает в приемный элемент 9 фотоиндикатора 10.

Перед началом градуировки лимб 5 измерителя ставят в исходное положение на начальное или конечное значение шкалы. Поляроид 12 вращают до тех пор, пока плоскость его поляризации окажется перпендикулярной плоскости поляризации поляроида 4. Исходное положение достигается при таком взаимном положении поляроидов, при котором свет через них практически не проходит и сигнал на фотоиндикаторе 10 становится минимальным.

Затем поляроид 12 сдвигают на определенный угол, значение которого контролируют по образцовому угломерному устройству. При этом свет начинает проникать через систему поляроидов на фотоиндикатор. Далее начинают вращать поляроид измерителя 4, отслеживая угол, заданный поворотом угломерного устройства, до восстановления перпендикулярности его плоскости поляризации относительно

плоскости поляризации поляроида 12. При этом сигнал на фотоиндикаторе будет минимальным.

Эту операцию проводят для нескольких выбранных отметок шкалы угломерного устройства и, определяя показания по лимбу измерителя видимости, строят градуировочную характеристику.

Вышеописанное устройство для градуировки было смонтировано. В качестве образцового угломерного устройства было использовано угломерное устройство с основной погрешностью $\pm 2^\circ$, т. е. превышало по точности угломерное устройство измерителя видимости в два раза. В качестве приемного элемента фотоиндикатора был использован резистор СФ-2-2, спектральная характеристика которого близка к спектральной характеристике глаза. Фотоиндикатором, подсоединенным к фоторезистору, был выбран стандартизованный мост переменного тока типа Р-577. Его чувствительности оказалось достаточно для фиксации сдвига плоскостей поляризации от положения взаимной перпендикулярности на угол $\pm 2,2^\circ$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. С п р а в о ч н и к по гидрометеорологическим приборам и установкам. — Л., Гидрометеиздат, 1976. 432 с.
2. П р и б о р ы и установки для метеорологических измерений на аэродромах. — Л., Гидрометеиздат, 1981. 295 с.
3. Т е х н и ч е с к о е описание измерителя видимости поляризационного М-53А по ТУ52 — 15 — 50 — 65. — М., Изд-во стандартов, 1981.

ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ПРИБОРЫ ИСПАРЯЮЩИХСЯ ПРИМЕСЕЙ ВОЗДУХА

В настоящее время метрологи Госкомгидромета решают задачу оптимизации межповерочных интервалов для повышения эффективности использования парка метеорологических приборов и снижения затрат на его содержание. Важным этапом решения этой задачи является заблаговременная оценка агрессивности условий эксплуатации. В зависимости от уровня агрессивности атмосферы может регулироваться степень климатической защиты приборов, устанавливаться межповерочные интервалы разной продолжительности.

В публикациях /1, 5, 6/ были предприняты попытки термодинамических (энергетических) оценок агрессивности атмосферы по отношению к средствам измерений и другим изделиям. В более поздних статьях /7, 8, 9/ описаны результаты оценок влияния свойств атмосферы на межповерочные интервалы с использованием аппарата термодинамики необратимых процессов. Применение термодиссипативного метода (метода обобщенной энтропии) позволило на базе единой модели "колебательного контура" определить вклад радиационных и ветровых воздействий в агрессивность атмосферы.

Цель данной статьи — с помощью этого же метода оценить составляющую агрессивности атмосферы, связанную с нахождением в воздухе испаряющихся (возгоняющихся) или конденсирующихся частиц.

К подобной ситуации относятся случаи эксплуатации метеоприборов в зонах действия естественных и искусственных источников загрязнения, в местах, подвергающихся химической обработке.

В соответствии с положением термодиссипативного метода энергия, теряемая при обмене приборов и изделий со средой и рассматриваемая как причина необратимых изменений и старения в них, может быть определена из выражения

$$\dot{\theta} = k \frac{|dW|}{T d\tau dN} = \left| \frac{P^H - P}{P} \right| \frac{|dW|}{T d\tau dN}, \quad (1)$$

где $\dot{\theta}$ — скорость потери энергии или скорость образования рассеиваемого термического заряда диссипации, k — коэффициент необратимости, определяющий долю теряемой энергии, dW — бесконечно малое изменение энергии в количестве вещества изделия (dN) за время обмена ($d\tau$), T — температура процесса энергообмена, P^H , P — энергетический потенциал нормального воздуха и потенциал воздушной среды, причем $\Delta P = (P^H - P)$ — разность потенциалов, побуждающих энергообмен.

Для обеспечения сопоставимости степени необратимости, протекающие процессы энергообмена нормируются моделью колебательного контура на количество вещества, равное одному молю ($\Delta N = 1$ моль), и на время обмена $\Delta \tau = 1$ с. В этом случае выражение (1) принимает вид:

$$\theta = \frac{k}{T} \frac{|\Delta W|}{\Delta \tau \Delta N} = \left| \frac{P^H - P}{P} \right| \frac{|\Delta W|}{\Delta \tau \Delta N}. \quad (2)$$

В модели колебательного контура в течение полупериода обмена в одном моле — моле исследуемого воздуха — происходит испарение (возгонка) вещества частиц, а в другом моле — моле нормальной смеси — протекает процесс конденсации (сублимации) вещества частиц. По закону Гесса энергетический эффект обратимой реакции, протекающей в системе, не зависит от промежуточных стадий и может быть определен через энтальпии /4/:

$$dW = dH_{\phi} + dH = TdS_{\phi} + (TdS + Vdp + \sum \mu_i dn_i), \quad (3)$$

где H_{ϕ} — энтальпия (тепловой эффект) фазового перехода вещества частицы, H — энтальпия (тепло), затрачиваемая на нагревание образовавшегося после испарения облака пара до температуры среды (T) и на рассеивание облака до нормального парциального давления, S — энтропия, V, p — объем и давление, μ_i, n_i — химический потенциал и количество молей i -й компоненты смеси, S_{ϕ} — энтропия фазового перехода.

При условии $T, p = \text{const}$ по /4/ $dG_i = \mu_i dn_i$, где dG_i — энергия Гиббса i -й компоненты.

Полагая для первых слагаемых потенциал $P = T$, а для последнего $P = \mu_i$ выражение (3) в конечных разностях можно представить в виде:

$$\theta = \left| \frac{T_{\phi} - T}{T} \right| \frac{N}{T} \frac{|\Delta H_{\phi}|}{\Delta \tau \Delta N} + \left| \frac{T_{\phi} - T}{T} \right| \frac{N \Delta S}{\Delta \tau \Delta N} + \sum \left| \frac{(\mu_i)^H - \mu_i}{\mu_i} \right| \frac{N}{T} \frac{|\Delta G_i|}{\Delta \tau \Delta N}, \quad (4)$$

где T_{ϕ} — температура равновесного фазового перехода, $(\mu_i)^H$ — химический потенциал i -й компоненты в нормальном воздухе, N — доля вещества частиц в исследуемом моле воздуха.

Ограничим рассмотрение двухкомпонентной смесью и введем индексы "в" — воздух, "п" — примесь пара частиц, тогда из (4) имеем

$$\begin{aligned}
 \vartheta = & \left| \frac{T_{\phi} - T}{T} \right| \left| \frac{N_n}{T} \frac{|\Delta H_{\phi}|}{\Delta \tau \Delta N} \right| + \left| \frac{T_{\phi} - T}{T} \right| \left| \frac{N_n \Delta S}{\Delta \tau \Delta N} \right| + \\
 & + \left| \frac{(\mu_n)^H - \mu_n}{\mu_n} \right| \left| \frac{N_B}{T} \frac{|\Delta G_n|}{\Delta \tau \Delta N} \right| + \\
 & + \left| \frac{(\mu_B)^H - \mu_B}{\mu_B} \right| \left| \frac{N_B}{T} \frac{|\Delta G_B|}{\Delta \tau \Delta N} \right|. \quad (5)
 \end{aligned}$$

Если воздух и пар химически не взаимодействуют и при этом находятся в условиях с постоянной температурой (T), при смешении не изменяют свои парциальные давления (p_n, p_B), то в соответствии с [4] запишем

$$N_n = p_n/p; \quad N_B = p_B/p; \quad \Delta G_n = RT \ln(p_n/p); \quad \Delta G_B = RT \ln(p_B/p);$$

$$(\mu_n)^H - \mu_n = RT \ln(p_n^H/p_n); \quad (\mu_B)^H - \mu_B = RT \ln(p_B^H/p_B);$$

$$\mu_n = \ln[p_n^H p_n / (p_{n*})^2]; \quad \mu_B = \ln[p_B^H p_B / (p_{B*})^2] \text{ и далее}$$

$$\Delta S = \int_{T_{\phi}}^T (C_p) \frac{dT}{T} = C_p \ln \frac{T}{T_{\phi}}.$$

С учетом вышеизложенного и выполнения очевидных преобразований из выражения (5) окончательно получим

$$\begin{aligned}
 \vartheta = & \left| \frac{T_{\phi} - T}{T} \right| \left| \frac{N_n}{T} \frac{|\Delta H_{\phi}|}{\Delta \tau \Delta N} \right| + \left| \frac{T_{\phi} - T}{T} \right| \left| \frac{N_n C_p}{\Delta \tau \Delta N} \right| \left| \ln \frac{T}{T_{\phi}} \right| + \\
 & + \frac{RT}{\Delta \tau \Delta N} \left| \frac{\ln \frac{p_n^H}{p_n} \left(\frac{p_n}{p} \ln \frac{p_n}{p} \right)}{\ln \frac{p_n^H p_n}{(p_{n*})^2}} \right| + \\
 & + \frac{RT}{\Delta \tau \Delta N} \left| \frac{\ln \frac{p_B^H}{p_B} \left(\frac{p_B}{p} \ln \frac{p_B}{p} \right)}{\ln \frac{p_n^H p_B}{(p_{B*})^2}} \right|. \quad (6)
 \end{aligned}$$

где p — атмосферное давление, равное $p = p_v + p_n$, p_v^H , p_n^H — парциальные давления компонент в нормальной воздушной смеси, p_{v*} , p_{n*} — значения парциальных давлений, когда обмен энергией становится полностью необратим, т. е. $k = 1$, C_p — теплоемкость газа-примеси в интервале температур T и T_ϕ , R — универсальная газовая постоянная, равная $8,314 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$.

Для приближенных расчетов значения величин ΔH_ϕ и C_p могут быть взяты из справочников, например /10/, где они даны для температуры 25°C (298 K). При более точных расчетах поправки к этим значениям вычисляют по известным формулам /4/. Значения T_ϕ , p_n^H , p_v^H также приведены либо в справочниках /10/, либо в стандартах /2/. Значение мольной доли определяют по формулам

$$N_n = n_n/n; \quad N_v = 1 - N_n,$$

где n_n — число молей вещества примеси, n — общее число молей воздушной смеси. Значения парциального давления примеси после ее испарения находят из выражения

$$p_n = k'mRT/(V'M),$$

где m — вес примеси, испарившейся в объеме V , M — молекулярный вес примеси, k' — переводной коэффициент для выражения парциального давления в гектопаскалях, равный $0,01$.

Значения $p_{пх}$, $p_{вх} = p - p_{пх}$ определяются предельно допустимыми концентрациями, приводимыми, как правило, в нормативно-технических документах, например в /3/.

Применим формулу (6) для оценки агрессивности атмосферы, вызванную засевом тумана (облака) частицами твердой углекислоты (CO_2). Такой засев применяется для рассеивания этих образований. Температуру воздуха примем $T = 298 \text{ K}$, температуру испаряющихся частиц округлим до $T_\phi = 195 \text{ K}$, атмосферное давление установим 1000 гПа , изменение энтальпии при фазовом переходе приравняем $H_\phi = 25\,250 \text{ Дж}/(\text{моль})$, а теплоемкость углекислоты при постоянном давлении ограничим $C_p = 37 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$. Нормальное парциальное давление CO_2 по 2 составляет $p_n^H = 0,3 \text{ гПа}$ при условных критических значениях $p_{пх} = 0,001 \text{ гПа}$ и $p_{вх} = 1000 \text{ гПа}$. Концентрацию засева установим $1 \text{ г}/\text{м}^3$, что соответствует $N_n = 0,0005$ и парциальному давлению после испарения $p_n = 0,5 \text{ гПа}$.

При подстановке перечисленных значений в формулу (6) получим первое слагаемое равным $16,0 \text{ мВт}/(\text{моль} \cdot \text{К})$, второе $3,0 \text{ мВт}/(\text{моль} \cdot \text{К})$, третье и четвертое — исчезающе малыми.

Предельно возможный эффект от воздействия воздушной смеси с парящими примесями может быть выражен через суммарное количество термического заряда диссипации произведенного в этих условиях за

определенное время

$$\Delta \vartheta = \sum \dot{\vartheta} \tau, \quad (7)$$

где $\dot{\vartheta}$ — значение скорости производства термического заряда диссипации в течении полцикла длительностью в одну секунду, τ — количество полциклов за избранный период.

Если за период воздействия выбрать один час, то при температуре 298 К нагрузка на измерительные преобразователи и другие изделия, работающие в среде засева, будет равна 68 Дж/ (моль · К), а при температуре 273 К — составит 54 Дж/ (моль · К).

ВЫВОД: термодиссипативный (энтропийный) метод позволяет оценивать агрессивность среды по отношению к приборам и изделиям, работающим в смеси воздуха с испаряющимися (возгоняющимися) частицами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Г о й х м а н Б. Д., С м е х у н о в а Т. П. Эквивалентной температуре неизотермических процессов. — Физико-химическая механика материалов, 1977, № 1, с. 92—97.
2. Г О С Т 4401-73. Стандартная атмосфера. Параметры. — М., Изд-во стандартов, 1974. 118 с.
3. Г О С Т 15150-69. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды. — М., Изд-во стандартов, 1978. 40 с.
4. Е р е м и н Е. Н. Основы химической термодинамики. — М., Высшая школа, 1978. 391 с.
5. К о ж е в н и к о в Б. Л. Оценка агрессивности атмосферных условий эксплуатации метеорологических средств измерений. — Труды ГГО, 1981, вып. 452, с. 21—27.
6. К о ж е в н и к о в Б. Л. Расчет термодинамической составляющей критерия агрессивности атмосферы. — Труды ГГО 1981, вып. 452, с. 28—36.
7. К о ж е в н и к о в Б. Л. Влияние агрессивности атмосферы на межповерочные интервалы. — Труды ГГО 1982, вып. 465, с. 50—54.
8. К о ж е в н и к о в Б. Л. Влияние радиационных воздействий на старение метеорологических приборов. — Труды ГГО 1982, вып. 465, с. 55—59.
9. К о ж е в н и к о в Б. Л. Влияние ветровых воздействий на износ метеорологических приборов. — Труды ГГО 1982, вып. 465, с. 60—64.
10. К р а т к и й справочник физико-химических величин /Под ред. К. П. Мищенко и А. А. Равделя. — Л., Химия, 1974. 200 с.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ГИГРОСКОПИЧНЫХ ПРИМЕСЕЙ ВОЗДУХА НА СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

Из литературы известно /5/, что в воздухе всегда присутствуют частицы примесей на которых происходит прежде всего конденсация водяного пара. Различают нерастворимые (но смачиваемые) и растворимые ядра конденсации. К первым относятся частицы почвы, горных пород, дыма, органических веществ, микроорганизмы и т. д. Другим видом ядер конденсации служат частицы растворимых в воде веществ, например, солей или кислоты.

Растворимые ядра конденсации поступают в результате сжигания топлива, образуются из морских брызг и пены. Среднее число ядер в кубическом сантиметре в городах достигает 15 000, в сельской местности 10 000, причем количество растворимых ядер может достигать 50—60 %. Особенно много среди этих частиц хлоридов, которые в соответствии с /2, 5/ создают потоки, достигающие в прибрежных районах от 30 до 300 мг/ (м² · сут), в приморско-промышленных зонах от 0,3 до 30 мг/ (м² · сут).

Осевшие частицы при увлажнении становятся химически агрессивными, приводят к коррозионным поражениям металлов и материалов, способствуют разрушению лаков и красок, снижают поверхностное сопротивление изоляторов, затрудняют работу газоанализаторов и других метеорологических приборов.

Цель данной статьи оценить влияние гигроскопичных частиц на агрессивность атмосферы методом неравновесной термодинамики.

В статье /4/ уже даны сходные оценки воздействия на приборы испаряющихся примесей. С помощью той же схемы могут быть сделаны оценки агрессивности воздуха с примесью гигроскопичных частиц. В реальных условиях атмосферы конденсация водяного пара на ядрах конденсации и водорастворимых частицах пыли начинается при достижении относительной влажностью воздуха 70 % и более. Как правило, это бывает следствием уменьшения температуры воздуха и в более редких случаях повышения парциального давления водяного пара. Если процесс конденсации достаточно продолжителен, то на месте твердой частицы образуется капля, которая является раствором соли. Размеры капли, пришедшей в равновесие со средой, зависят от многих факторов /5/.

При обратном процессе наблюдается испарение капли, которое в конечном счете приводит снова к образованию твердых частиц и практически полной нейтрализации химической активности воздушной среды.

Согласно положениям энтропийного метода смещение фазовых переходов в область меньших (чем 100 %) значений относительной

влажности ведет к необратимым потерям энергии, которые и обуславливают агрессивные свойства атмосферы. Эти потери определяют для парящих примесей, согласно /4/ по формуле

$$\begin{aligned} \dot{q} = & \left| \frac{T_{\phi} - T}{T} \right| \left| \frac{N_n}{T} \frac{|\Delta H_{\phi}|}{\Delta \tau \Delta N} \right| + \left| \frac{T_{\phi} - T}{T} \right| \left| \frac{N_n c_p}{\Delta \tau \Delta N} \right| \left| \ln \frac{T}{T_{\phi}} \right| + \\ & + \frac{RT}{\Delta \tau \Delta N} \left| \frac{\ln \frac{p_n^H}{p_n} \left(\frac{p_n}{p} \ln \frac{p_n}{p} \right)}{\ln \frac{p_n^H p_n}{(p_{n*})^2}} \right| + \\ & + \frac{RT}{\Delta \tau \Delta N} \left| \frac{\ln \frac{p_v^H}{p_v} \left(\frac{p_v}{p} \ln \frac{p_v}{p} \right)}{\ln \frac{p_v^H p_v}{(p_{v*})^2}} \right|, \end{aligned} \quad (1)$$

где T — температура фазового равновесия воздушной смеси в кельвинах, T_{ϕ} — температура фазового перехода чистого воздуха, т. е. температура его точки росы, ΔH_{ϕ} — энергия затрачиваемая на фазовый переход, оцениваемая через изменение энтальпии, которое может быть определено по скрытой теплоте испарения (сублимации) при данной температуре T /6/, N_n , N_v — мольные доли примеси и воздуха, причем $N_n + N_v = 1$, c_p — теплоемкость водяного пара при постоянном давлении, равная примерно 33,6 Дж/(моль · К), p , p_n^H — атмосферное давление и парциальное давление водяного пара в воздухе, p_n — давление водяного пара после испарения (возгонки), равное сумме избыточного давления p'_n и парциального давления p_n^H пара, причем значение p'_n находят по формуле $p'_n = k'mRT/(V'M)$, где m — вес примеси, M — ее молекулярный вес, V' — объем, куда испарилась примесь, k' — переводной коэффициент, равный 0,01, p_{n*} , p_{v*} — критические давления, принимаемые равными условно 0,001 и 1000 гПа соответственно, R — универсальная газовая постоянная, равная 8,314 Дж/(моль · К).

Воспользуемся формулой (1) и определим агрессивность атмосферы в морской и приморско-промышленной зоне /2/. В соответствии с /1/ концентрация хлоридов в первой зоне лежит в пределах от 2 до 20 мг/м³, а во второй — от 0,02 до 2 мг/м³, таким образом, для первой зоны среднюю годовую концентрацию примем равной 11 мг/м³, а для второй — 1 мг/м³.

При положительной температуре воздуха и относительной его влажности 80 % кристаллы хлоридов превращаются в насыщенные капли раствора. По /7/ для такого превращения на 1 г кристаллов требуется втрое больше воды. В результате при установлении изотермического равновесия между твердой фазой хлоридов, насыщенного ими водного раствора и парциальным давлением водяного пара в одном кубическом метре воздуха оказывается сконденсированным в морской атмосфере до 33 мг воды, а в приморско-промышленной — 3 мг. Это составляет 0,0018 и 0,0002 моля воды, рассредоточенных в 1 м^3 воздуха, т. е. в 43 его молях; отсюда N_p равно соответственно для первой зоны $4,2 \cdot 10^{-5}$, а для второй зоны $4,2 \cdot 10^{-6}$.

Принимая во внимание материалы таблиц /6/, значение ΔH_{ϕ} можно принять равной 44 500 Дж/моль.

Избыточное давление водяного пара, образовавшегося при испарении капель раствора не превышает 0,04 гПа, поэтому третьи и четвертое слагаемые в формуле (1) пренебрежимо малы и учитываться в работе (расчете) не будут.

В качестве исходных параметров атмосферы используем климатические данные для приморских городов Мурманска, Владивостока, Риги, Батуми. Первый город представляет собой пункт с экстремальными параметрами умеренно холодного климатического района /3/. По той же классификации три других города являются представительными пунктами умеренно холодного влажного района, умеренно теплого влажного и теплой влажной климатической зоны соответственно. Среднее значение за год среднесуточной температуры для этих районов и зоны составляет 4,5; 4,5; 6,0; 14,5 °С. В чистом воздухе в условиях насыщения возможен обратимый фазовый переход между жидкой водой и ее паром, т. е. указанные значения являются значениями (T_{ϕ}). Конденсация же на частицах хлоридов и установлении фазового равновесия происходит при 80 % относительной влажности, что соответствует значениям (T), равным для тех же районов 1,3; 2,8; 11,1 °С. Если отнести условия Батуми к морской зоне, а условия трех других городов — к приморско-промышленной и подставить соответствующие значения параметров в формулу (1), то интенсивность потерь в виде энергии диссипации составит в первом случае 79 мкВт/(моль · К), а в остальных не более 8 мкВт/(моль · К). Причем второе слагаемое в формуле (1) оказалось менее 0,02 мкВт/(моль · К) и в расчет не принималось.

Предельно возможный эффект от конденсации и испарения воды гигроскопичных частицах примесей в воздухе определялся по суммарному количеству энергии диссипации, произведенному за год, из выражения

$$\Delta \vartheta = \sum (\vartheta) \tau, \quad (2)$$

где \dot{Q} — интенсивность (скорость) производства энергии диссипации за полуцикл в течение секунды, τ — количество полуциклов за год.

При подсчетах длительность полуциклов за год определялась по числу дней с относительной влажностью в 13 ч более 80 % по каждому климатическому району. Из материалов /3/ известны следующие значения числа дней для выбранных районов (в принятой последовательности) 120, 108, 134, 80. Выразив их в секундах и приняв полученные результаты за количество полуциклов, из формулы (2) имеем суммарное количество энергии диссипации за год для Мурманска равным 81,9 Дж/(моль · К), для Владивостока — 73,7 Дж/(моль · К), для Риги — 91,5 Дж/(моль · К), для Батуми — 546,0 Дж/(моль · К). Из приведенного ряда обращает на себя внимание многократное превышение агрессивности условий в Батуми по сравнению с остальными городами.

В целом можно сказать, что вклад гигроскопичных примесей в общую агрессивность атмосферы незначителен, так как воздействия ряда других метеорологических факторов (отклонений температуры, давления, воздействия радиации) достигает за год мегаджоулей на моль кельвин.

Вывод: диссипативный метод работоспособен при оценках вклада фазовых переходов воды на гигроскопичных примесях в воздухе при определении агрессивности атмосферы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Г О С Т 9.039-74. Единая система защиты от коррозии и старения. Коррозионная агрессивность атмосферы. — М., Изд-во стандартов, 1976. 20 с.
2. Г О С Т 15150-69. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды. — М., Изд-во стандартов, 1978. 40 с.
3. Г О С Т 16350-70. Климат СССР. Районирование и характеристики климатических параметров для промышленных изделий. — М., Изд-во стандартов, 1978. 40 с.
4. К о ж е в н и к о в Б. Л. Воздействия на приборы испаряющихся примесей воздуха. — См. наст. сб.
5. М а т в е е в Л. Т. Основы общей метеорологии. Физика атмосферы. — Л, Гидрометеиздат, 1965. 876 с.
6. М е ж д у н а р о д н ы е метеорологические таблицы. Серия I—II подготовленные С. Лётестю и рабочей группой ВМО. Перевод Л. Н. Аксюка под ред. А. Х. Хргиана. — ВМО — № 188 Секретариат ВМО Женева, Швейцария. 255 с.
7. К р а т к и й справочник физико-химических величин /Под ред. К. П. Мищенко и А. А. Радвеля). — Л, Химия, 1974. 200 с.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ОПТИМАЛЬНЫХ МЕЖПОВЕРОЧНЫХ ИНТЕРВАЛОВ ДЛЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

Настоящая методика распространяется на находящиеся в эксплуатации и подлежащие ведомственной поверке средства измерений (СИ) метеорологического назначения. В ней содержатся указания по выбору исходных данных и методы расчета межповерочных интервалов (МПИ) на ЭВМ типа ЕС-1022.

Методика предназначена для работников метрологической службы Госкомгидромета.

Для расчета МПИ был собран обширный статистический материал об изменении погрешности СИ в процессе эксплуатации и причинах возникновения отказов по каждому типу СИ за длительный период времени (5—10 лет). Объемы исследуемых выборок по каждому типу СИ составляли в среднем около 100 приборов. При оценке надежности приборов при выпуске их из производства были использованы результаты испытаний на надежность, проведенных на заводах-изготовителях.

По полученным данным было проведено статистическое моделирование на ЭВМ процессов эксплуатации СИ и определены оптимальные значения МПИ.

Исходными данными для расчета МПИ являются:

1. Даты проведения, результаты проверок или аттестаций СИ и срок их эксплуатации за период времени не менее чем удвоенное значение существовавшего ранее МПИ; доли СИ, поверяемых и ремонтируемых в единицу времени, результаты заводских или государственных испытаний на надежность или долговременную стабильность;

2. Результаты проверок, аттестаций или испытаний должны содержать статистические данные о случайном нестационарном процессе изменения во времени систематической и случайной погрешностях СИ или данные о распределении метрологических и неметрологических (явных) отказов во времени, полученные по репрезентативной выборке СИ;

3. Результаты испытаний на надежность или долговременную стабильность СИ должны содержать статистические характеристики дрейфа погрешности СИ не менее, чем в двух временных сечениях случайного нестационарного процесса изменения во времени погрешности СИ в виде:

- текущего (во времени) значения математического ожидания (МО) погрешности $m(t)$ выборки СИ (не менее 60 СИ);
- текущего значения среднего квадратического отклонения (СКО) $\sigma(t)$ от текущего $m(t)$;

4. Данные о значениях систематической и случайной составляющих погрешности СИ при наработке на определенное планом испытаний

количество часов.

Расчет МПИ осуществлялся на ЭВМ типа ЕС-1022 с помощью разработанного для этой цели пакета прикладных программ: численный прогноз и оптимальное управление метрологической надежностью средств измерений (шифр 2572322 00010-01 в ОФАП Госкомгидромета, Обнинск). Расчет и управление расчетом при различных исходных данных осуществлялся головной управляющей программой пакета, в которую исходные данные вводятся на перфокартах. Расчет оптимального МПИ осуществлялся по схеме рис. 1.

Для случая, когда исходные данные представлены потоком метрологических отказов за период времени не менее удвоенного значения ранее существовавшего МПИ, расчет МПИ осуществляется по правой ветви схемы рис. 1.

Если экспериментальные данные представлены результатами испытаний на надежность, долговременную стабильность или данными о результатах проверок (аттестаций) СИ и их датами проведения, расчет МПИ осуществляется по левой ветви решения схемы на рис. 1.

Расчет оптимальных МПИ осуществляется по средней ветви блок-схемы рис. 1.

В качестве исходных данных для определения МПИ используют значения:

ϵ_1 — предел допускаемого значения показателя метрологической надежности (годности) (предела допускаемого значения доли СИ, находящихся в эксплуатации в момент времени t , в метрологическом отказе, по отношению к общему количеству эксплуатируемых СИ в момент времени t);

ϵ_2 — предел допускаемого значения показателя метрологической негодности (предел допускаемого значения доли СИ, находящихся в эксплуатации в момент времени t , в метрологическом отказе, по отношению к общему количеству эксплуатируемых СИ в момент времени t);

p — допускаемая вероятность безотказной работы СИ;

α — допускаемая вероятность выхода процесса дрейфа погрешности СИ за предел допускаемой погрешности;

ϵ_3 — предел допускаемого значения доли СИ, находящихся в проверке в момент времени t , по отношению к общему количеству эксплуатируемых СИ в момент времени t ;

ϵ_4 — предел допускаемого значения доли СИ, находящихся в ремонте в момент времени t , по отношению к общему количеству эксплуатируемых СИ в момент времени t ;

c — стоимость метрологического обслуживания СИ должна быть минимально возможной при заданных показателях: $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \epsilon_4$ (рассчитывается в процессе решения задачи).

Показатели $\epsilon_1, \epsilon_2, p, \alpha$ — обеспечивают расчет, поиск и выбор оптимального МПИ на основе требуемой метрологической надежности СИ

в течение всего ресурса СИ.

Показатели ϵ_3, ϵ_4 — обеспечивают реальность соблюдения на практике расчетного значения МПИ, при существующих возможностях системы метрологического обеспечения, т. е. реальность управления метрологической надежностью.

Выбор показателей эффективности функционирования $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \epsilon_4, p, \alpha$ производит специалист ведомственной метрологической службы и утверждает главный метролог головной или базовой по метрологии организации ведомства на основании оптимизационных расчетов экономического эффекта от внедрения оптимальных МПИ и требуемого уровня метрологической надежности СИ.

Данные для выбора показателей $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \epsilon_4, p, \alpha$ приведены в табл. 1.

Таблица 1

Показатели метрологической надежности и эффективности функционирования СИ

Условия применения СИ	$\epsilon_1 \%$	$P_{\text{доп}}$	$\epsilon_2 \%$	$\alpha = 1 - P_{\text{доп}}$	$\epsilon_3 \%$	$\epsilon_4 \%$	Примечание
Образцовые СИ — для проверки рабочих СИ и специальных измерений	95,0— 99,0	0,95— 0,99	5,0— 0,5	0,050— 0,005	5—30	5—20	$\epsilon_1 \% \approx P_{\text{доп}} \%$ $\epsilon_2 \% \approx \alpha \%$
Рабочие СИ для измерения метрологических параметров	80,0— 95,0	0,80— 0,95	20,0— 5,0	0,200— 0,050	5—30	5—10	В предельном случае доля СИ в поверке и ремонте $\epsilon_3 + \epsilon_4 \leq 50 \%$ от общего количества СИ
Рабочие СИ для обеспечения авиации и специальных измерений	90,0— 99,0	0,95— 0,99	5,0— 0,5	0,050— 0,005	5—30	5—20	ϵ_3 и ϵ_4 могут отличаться от рекомендуемых в зависимости от реальных возможностей поверочных и ремонтных организаций

Принятые значения ϵ_1 , $P_{\text{доп}}$ не должны быть ниже вероятности безотказной работы заданной в ТУ. Для СИ эксплуатируемых в системе Госкомгидромета целесообразно задание метрологической надежности на уровне 0,95 ($\epsilon_1 = 95,0$; $P_{\text{доп}} = 0,95$; $\epsilon_2 = 50$, $\alpha = 0,05$) при доверительной вероятности $P = 0,95$.

Методика расчета МПИ включает в себя три различных независимых метода, которые функционируют совместно или раздельно в зависимости от вида исходной информации, ее качества, репрезентативности и стабильности. Левая ветвь решения (см. рис. 1 для стабильных СИ) реализует метод расчета МПИ по моделям дрейфа погрешности во времени. Правая ветвь решения реализует адаптивный метод расчета МПИ по потоку метрологических отказов СИ во времени (для нестабильных СИ). Средняя ветвь решения реализует универсальный метод расчета и поиска оптимальных МПИ в пространстве состояний СИ (оптимальное управление надежностью СИ по пространству состояний), на основе статистического моделирования процесса их эксплуатации. Расчет оптимальных МПИ реализует только средняя ветвь решения, правая и левая ветви решения реализуют расчет МПИ близких к оптимальному.

В случае отсутствия или недостатка априорной информации о параметрах метрологической надежности СИ и изменение их во времени необходимо для расчета МПИ проведение испытаний СИ на долговременную стабильность.

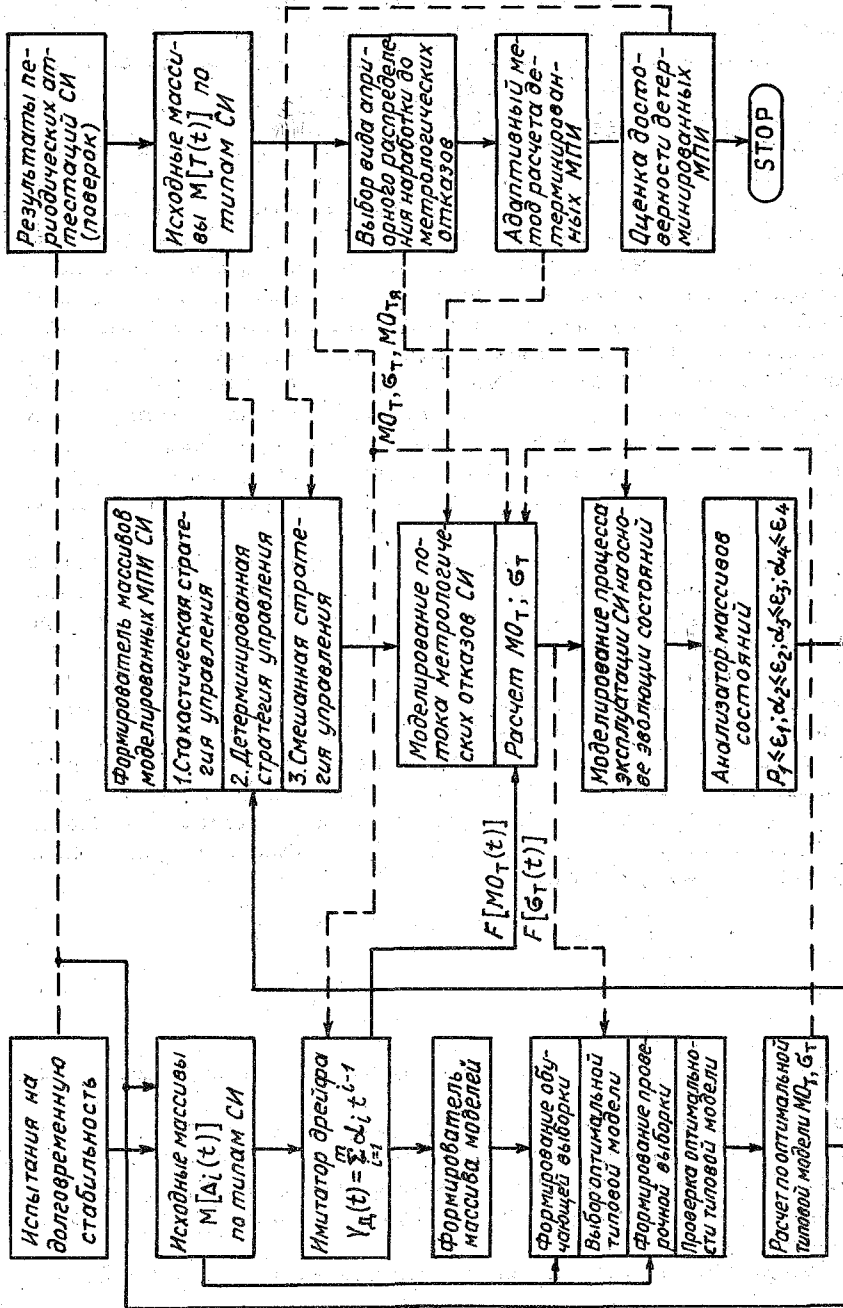
Расчет МПИ по правой ветви решения осуществляется адаптивным методом, который основан на выделении по случайному нестационарному потоку метрологических отказов квазистационарных периодов эксплуатации СИ, в границах каждого из которых соблюдается пуассоновский поток метрологических отказов с постоянной интенсивностью, что позволяет по заданной вероятности безотказной работы СИ рассчитать МПИ в границах каждого из квазистационарных периодов по известному выражению:

$$T_{\text{МПИ}_i} = \tau_i \frac{\ln P}{\ln P^*},$$

где $P^* = 1 - \frac{n_{\text{МО}}(t)}{N(\tau_i)}$ — статистическая вероятность безотказной рабо-

ты за i -й квазистационарный период эксплуатации СИ; τ_i — i -й квазистационарный период эксплуатации СИ; $n_{\text{МО}}(\tau_i)$ — количество метрологически отказавших СИ за i -й квазистационарный период; $N(\tau_i)$ — общее количество непрерывно эксплуатирующихся СИ за i -й квазистационарный период.

Выделение квазистационарных периодов эксплуатации СИ по слу-



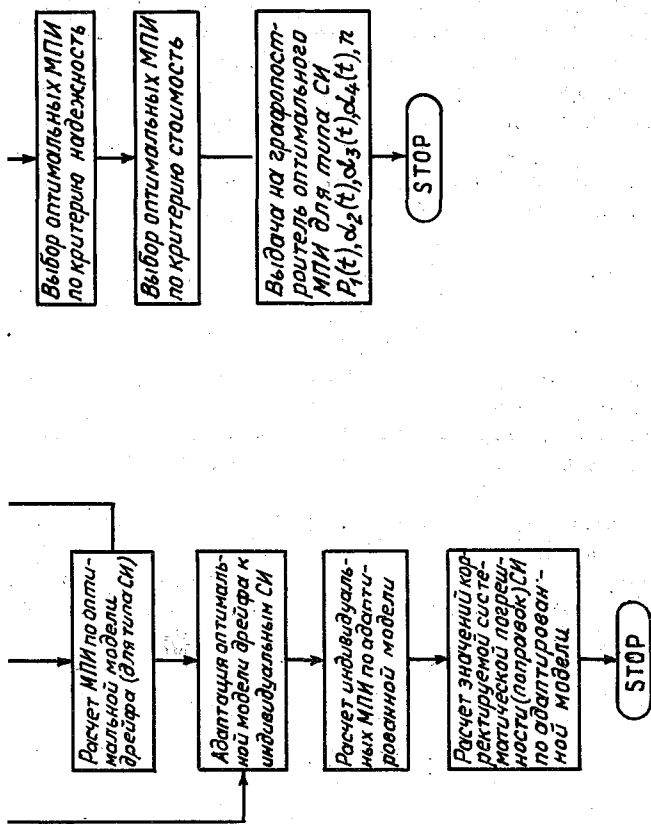


Рис. 1. Блок-схема комплексного метода исследования метеорологической надежности средств измерений.

чайному нестационарному потоку метрологических отказов производится с помощью критерия согласия Колмогорова. Выделение квазистационарных участков эксплуатации СИ сводится к выявлению резких изменений интенсивности потока метрологических отказов. Для этого поток метрологических отказов во времени (по репрезентативной выборке СИ) представляется в виде временного ряда:

$$F(t) = \frac{n_{\text{мо}}(t)}{N(t)},$$

где $n_{\text{мо}}(t)$ — количество метрологически отказавших СИ в момент времени t ; $N(t)$ — общее количество СИ, находящихся в эксплуатации в момент времени t .

Далее исходный ряд разбивается на неравные квазистационарные участки, в пределах каждого из которых нестационарный процесс изменения метрологической надежности во времени можно считать статистически однородным. Для каждого из квазистационарных периодов рассчитывается количество метрологически отказавших СИ и общее количество СИ, находящихся в непрерывной эксплуатации в течение периода, по которому по формуле рассчитывается последовательность переменных МПИ, причем, если суммарное значение переменных МПИ превышает длительность ресурса эксплуатации СИ, то значение последнего отбрасывается. Постоянный МПИ рассчитывается осреднением всех переменных МПИ:

$$T_n = \frac{\sum_{i=1}^N T_i}{N},$$

где T_i — i -й переменный МПИ; N — общее количество переменных МПИ; T_n — постоянный МПИ.

Выделение квазистационарных периодов эксплуатации СИ проводится по известному алгоритму (см. рис. 1) в следующей последовательности:

- хронологический ряд изменения метрологической надежности, представленный по исходным данным, нумеруется от 1 до N ;
- порядковые номера присваиваются всем членам ряда, независимо от того, что за какой-то момент времени (месяц, год) исходные данные отсутствуют;
- весь диапазон значений ряда разбивается на равные градации;
- число градаций (K) определяется в зависимости от длины ряда по формуле:

$$K = \sqrt{N_p - n_p},$$

где N_p — период наблюдений исходных данных с заданной дискретностью (месяцы, годы); n_p — число пропусков ряда исходных данных (месяц, год);

— по исходному ряду данных вычисляется разность между максимальным и минимальным значениями членов ряда и делится на число градаций K , т. е. определяется величина каждой градации

$$I = \frac{F_{\max}(t) - F_{\min}(t)}{K}$$

— при расчете I число знаков после запятой должно быть на единицу больше, чем в данных исходного ряда, чтобы не было двойственности попадания того или иного номера числа ряда на границу двух градаций;

— прибавлением к минимальному значению ряда, представляющую собой нижнюю границу первой градации, величины I получается верхняя граница первой градации, которая одновременно является нижней границей следующей, т. е. второй градации;

— в результате последовательного прибавления I будут получены нижние и верхние границы всех градаций. Верхняя граница последней градации совпадает с максимальным значением ряда;

— далее каждый член исходного ряда последовательно заносится в одну из K градаций в зависимости от своего значения. Фиксируются в каждой градации порядковые номера членов исходного ряда;

— в каждой градации проводится сравнение попарно двух соседних номеров, при этом первый попавший в градацию номер с нулем (0), а последний (N_{pk}) — с N_p ;

— если разность между двумя соседними номерами в данной градации превышает некоторое критическое значение ($d_{\text{крит}}$), то эти члены с заданной вероятностью принадлежат разным квазистационарным периодам. Значение $d_{\text{крит}}$ для каждой градации определяется по формуле:

$$d_{\text{крит}} = \frac{\lambda_{\text{крит}} N_{pk}}{\sqrt{n_k}}$$

где $\lambda_{\text{крит}}$ — статистика Колмогорова; N_{pk} — последний номер члена ряда, попавший в данную градацию; n_k — число попаданий в данную градацию.

— критерий согласия Колмогорова $\lambda_{\text{крит}}$ выбирается в зависимости от заданной доверительной вероятности, соответствующей надежности расчетных значений МПИ. В табл. 2 приводятся $\lambda_{\text{крит}}$ для различных уровней значимости. Обычно P выбирается равной 0,95.

— из всех градаций выбираются пары соседних номеров, разность

Значения критериев Колмогорова при различной доверительной вероятности

$\lambda_{\text{крит}}$	$P(\lambda_{\text{крит}})$	$\lambda_{\text{крит}}$	$P(\lambda_{\text{крит}})$	$\lambda_{\text{крит}}$	$P(\lambda_{\text{крит}})$	$\lambda_{\text{крит}}$	$P(\lambda_{\text{крит}})$
0,30	1,0000	0,70	0,711	1,20	0,112	2,00	0,0007
0,33	0,9999						
0,35	0,9997	0,75	0,627	1,30	0,068	2,10	0,0003
				1,36	0,050		
0,40	0,997	0,80	0,544	1,40	0,040	2,20	0,0001
0,44	0,990						
0,45	0,987	0,85	0,465	1,50	0,022	2,30	0,0001
0,50	0,964	0,90	0,393	1,60	0,012	2,40	0,0000
0,52	0,950						
0,55	0,923	0,95	0,328	1,70	0,0062	2,50	0,0000
0,60	0,864	1,00	0,270	1,80	0,0032		
0,65	0,792	1,10	0,178	1,90	0,0015		

между которыми превышает $d_{\text{крит}}$ (соответствующей градации) и располагаются на числовой оси от 1 до N; при этом отмечается меткой (+) первый из стоящих в паре номеров, а второй — меткой (—);

— для выявления квазистационарных периодов эксплуатации осуществляется последовательный поиск по всем номерам членов ряда, отмеченных меткой (—) (расположенных последовательно на числовой оси в соответствии со своим номером) и выбираются только те из них, перед которыми находится хотя бы одна метка (+);

— порядковый номер, соответствующий метке (—), первой такой пары является первым моментом (месяцем, годом) нарушения однородности ряда;

— следующая по порядку метка (—), имеющая перед собой метку (+), определяет второе нарушение однородности ряда и т. д. Сам момент (месяц, год) нарушения однородности ряда в этот квазистационарный период не входит, а является началом следующего квазистационарного периода;

— по окончании выделения квазистационарных периодов эксплуатации по каждому из них подсчитывается количество метрологически отказавших СИ и общее количество СИ, находящихся в непрерывной эксплуатации в течение данного периода, и по известным выражениям производится расчет МПИ;

— полученное значение постоянного МПИ или последовательность переменных МПИ используют в качестве начальной точки поиска оптимального значения МПИ на втором этапе (цикле) решения задачи по средней ветви решения;

— выходная информация по расчету МПИ на ЭВМ по правой ветви решения содержит следующие данные:

- доверительная вероятность расчета МПИ,
- последовательность МПИ,
- математическое ожидание МПИ,
- среднее квадратическое отклонение МПИ.

Для высокостабильных СИ, метрологические отказы которых выявляются по результатам проверок редко (за период времени равный удвоенному значению ранее существовавшего МПИ менее 60 отказов для выборки не менее, чем 60 СИ) расчет МПИ проводится по левой ветви решения (см. рис. 1) по моделям дрейфа погрешности СИ во времени.

По исходным данным о датах проведения проверок, аттестаций или результатов испытаний на надежность (долговременную стабильность) и значениям систематической погрешности СИ, зафиксированных при их проведении, формируется временная траектория процесса дрейфа $Y(t)$ систематической погрешности СИ во времени. Для этого заполняют специальную табл. 3 (матрицу исходных данных).

Таблица 3

Исходные данные для расчета МПИ

Временные сечения процесса дрейфа	Возрастающая последовательность периодов времени, за которые произошли изменения систематической погрешности (поправок) СИ с дискретностью временного шага $T_0 = 1$ (день, месяц, год)		
Абсолютные значения изменений систематической погрешности (поправок) СИ по периодам	X_1	X'_1	X''_1
	X_2	X''_2	X''_2
	.	.	.
	.	.	.
	X_k	X'_k	X''_k

По полученной матрице исходных данных (табл. 3) рассчитывается модель дрейфа погрешности $Y_d(t)$ по партии СИ оптимальной сложности:

$$Y_d(t) = \sum_{i=0}^m a_i t^i,$$

где t — время, $a_i(m)$ — коэффициенты модели, определяются матричной формулой:

$$a(m) = (t^T \cdot t)^{-1} \cdot t^T \cdot Y,$$

$$a(m) = \begin{pmatrix} a_0(m) \\ \dots \\ a_i(m) \\ \dots \\ a_m(m) \end{pmatrix}, \quad t = \begin{pmatrix} 1t_1t_1^2 \dots t_1^m \\ \dots \\ 1t_it_i^2 \dots t_i^m \\ \dots \\ 1t_Nt_N^2 \dots t_N^m \end{pmatrix}$$

Модель дрейфа погрешности СИ должна обеспечивать прогнозирование систематической погрешности СИ с заданной погрешностью (ДР) меньше или равной пределу допускаемой случайной погрешности и удовлетворять оптимизации вида:

$$\min_{m=1, L} \sigma[\bar{z}_i, m],$$

при

$$\frac{S_{m+1} - S_m}{\sigma^2(\delta Y_d(t))} < \chi^2(1; 0,95),$$

где

$$S_m = a^T(m) \cdot t^T \cdot Y,$$

и ограничениям:

$$\begin{cases} W_i(t) \geq 0, \\ \sigma_i(\delta Y_d(t)) < DP, \\ 0 < W_1(t_0) < D_n. \end{cases}$$

где $i = \bar{1, L}$, $0 < t_0 < \tau_{пп}$,

$\sigma_i(\delta Y_d(t))$ — среднее квадратическое отклонение ошибки определения значения $Y_d(t)$ в i -тый момент прогноза по модели дрейфа, m — степень полинома; L — количество моментов прогноза систематической погрешности; \bar{z}_i — вектор моментов прогноза систематической погрешности; t_0 — период времени, в течение которого погрешность СИ может меняться в пределах допуска на перепроверку (для метеорологических СИ $\tau_{пп} = 12$ мес); $W_i(t)$ — значение прогноза абсолютной систематической погрешности СИ в i -й момент времени; $\chi^2(1; 0,95)$ — 95 %-ный квантиль распределения.

При выборе оптимальной модели дрейфа производится последовательное вычисление сумм квадратов:

$$S_m = a^T(m) t^T Y,$$

значений $\sigma_i(\delta Y_d(t))$, $W_i(t)$, $W_1(t_0)$, по всем заданным z_i для $m = 0, 1, 2, \dots$, и проверка условий (11, 12, 13). Как только условия (11, 12, 13) выполняются, расчеты по выбору оптимальных моделей дрейфа прекращаются и выбирается порядок полинома. Полученная модель обладает минимальной ошибкой определения (условие 11), оптимальной сложностью (условие 12), достоверностью начального и конечного участка траектории дрейфа (условие 13).

По найденной оптимальной модели дрейфа систематической погрешности СИ рассчитываются статистические параметры процесса дрейфа погрешности во времени для типа СИ:

$$M_Y(t) = M_Y(t_0) + \Delta M_Y(t, t_0),$$

$$\sigma_Y(t) = \sigma_Y(t_0) + \Delta \sigma_Y(t, t_0),$$

где $M_Y(t_0)$ — значение математического ожидания систематической погрешности СИ в начальный момент их эксплуатации (t_0), $\sigma_Y(t_0)$ — значение среднего квадратического отклонения систематической погрешности СИ в начальный момент эксплуатации (t_0), $\Delta M_Y(t, t_0)$ — изменение математического ожидания дрейфа систематической погрешности СИ за период $(t - t_0)$ без проверок и ремонтов СИ; $\Delta \sigma_Y(t, t_0)$ — изменение среднего квадратического отклонения дрейфа систематической погрешности СИ за период $(t - t_0)$ без проверок и ремонтов СИ.

— по статистическим параметрам процесса дрейфа $M_Y(t)$ и $\sigma_Y(t)$ рассчитываемым по модели дрейфа из второго неравенства Чебышева, рассчитываются приближенные значения МПИ:

$$P \left\{ | Y(t) - M_Y(t) \geq K_{gp}(t) \sigma_Y(t) \right\} \leq \frac{1}{K_{gp}^2(t)},$$

$$K_{gp}(t) = \frac{| M_Y(t) - a_{gp} |}{\sigma_Y(t)},$$

где a_{gp} — верхняя граница допуска на изменение погрешности СИ во времени.

Выражение дает приближенную оценку вероятности выхода процесса дрейфа $Y_d(t)$ за границу интервала $[a_n, a_b]$

$$Q(t) = \begin{cases} \frac{1}{K_{gp}^2(t)} & \text{при } K_{gp}(t) > 1 \\ 1 & \text{при } K_{gp}(t) < 1. \end{cases}$$

Формула уточняется на участке $K_{гр}(t) < 1$ с помощью первого неравенства Чебышева

$$P[1 + Y(t) > 1 - a_H] \leq \frac{1 + M_Y(t)}{1 - a_H},$$

$$P[1 + Y(t) > 1 + a_B] \leq \frac{1 + M_Y(t)}{1 + a_B}.$$

Уточненная формула для расчета $Q(t)$ имеет вид:

$$\frac{1}{K_{гр}^2(t)} \quad \text{при } K_{гр} \geq 1,$$

$$Q(t) = \begin{cases} 1 - \frac{1}{f_B(t)} - \frac{1}{f_H(t)} & \text{при } K_{гр}(t) < 1, f_B \geq 1 \\ 1 - \left(1 - \frac{1}{f_H(t)}\right) & \text{при } K_{гр}(t) < 1, f_B < 1, f_H \geq 1 \\ 1 & \text{при } K_{гр}(t) < 1, f_H < 1, \end{cases}$$

где

$$f_B(t) = \frac{1 + a_B}{1 + M_Y(t)},$$

$$f_H(t) = \frac{1 - a_H}{1 + M_Y(t)}.$$

Используя формулу, значения межповерочных интервалов находят-ся из уравнения

$$Q(t) - a = 0.$$

При количестве данных о распределении $Y(t)$ не менее 100, более точную оценку $Q(t)$ находят из аналитического выражения аппроксимирующей кривой распределения плотности вероятности $F(a_H \leq Y_d(t) \leq a_B)$, полученную известным методом Пирсона

$$Q(t) = 1 - F(a_H \leq Y(t) \leq a_B).$$

Алгоритм расчета аппроксимирующей кривой плотности вероятности распределения величины $y(t)$ следующий.

По опытным данным распределения величины $y(t)$ строится исходная гистограмма. По исходной гистограмме исследуемой случайной величины находят центральные моменты:

$$M_n = \frac{\sum x_j^{(n)} n_j}{\sum n_j}.$$

Основные моменты:

$$r_h = \frac{M_h}{\sigma^h}.$$

По вычисленным основным моментам определяется критерий Пирсона:

$$k = -\frac{r_3^2 (S+2)^2}{16(S+1)},$$

$$\text{где } S = \frac{6(\Gamma_4 - r_3^2 - 1)}{3r_3^2 - 2\Gamma_4 + 6}$$

и по значениям k (табл. 4) находится тип аппроксимирующей кривой. Параметры найденной кривой находятся по следующим формулам. I тип:

$$t = y \sqrt{(S+1)(1-k)},$$

$$l = \frac{\sigma t}{2},$$

$$\left. \begin{matrix} q_1 \\ q_2 \end{matrix} \right\} = \frac{1}{2} \left\{ (S-2) \mp S(S+2) \frac{r_3}{t} \right\},$$

$$l_1 = \frac{q_1 l}{S-2}, \quad l_2 = \frac{q_2 l}{S-2},$$

$$y_0 = \frac{n}{1} \frac{q_1^{q_1} q_2^{q_2}}{(S-2)^{S-2}} \frac{\Gamma(S)}{\Gamma(q_1+1) \Gamma(q_2+1)}.$$

Выбор типа кривой по критерию Пирсона

Критерий	Тип кривой	Уравнение кривой
$\kappa < 0$	I	$y = y_0 \left(1 + \frac{x}{l_1}\right)^{q_1} \left(1 - \frac{x}{l_2}\right)^{q_2}$
$\kappa = 0, \Gamma_3 = 0, \Gamma_4 < 3$	II	$y = y_0 \left(1 + \frac{x^2}{l^2}\right)^q$
$\kappa = \pm \infty$	III	$y = y_0 \left(1 + \frac{x}{l}\right)^{pe} \frac{x}{l}$
$0 < \kappa < 1$	IV	$y = y_0 \left(1 + \frac{x^2}{l^2}\right)^{-q_1} \frac{x}{l} \arctg \frac{x}{l}$
$\kappa = 1$	V	$y = y_0 x^{-p} e^{-p/x}$
$1 < \kappa < \infty$	VI	$y = y_0 x^{-q_1} (x - l)^{q_2}$
$\kappa = 0, \Gamma_3 = 0, \Gamma_4 > 3$	VII	$y = y_0 \left(1 + \frac{x^2}{l^2}\right)^{-q_1}$
$\kappa = 0, \Gamma_3 = 0, \Gamma_4 = 0$	N (нормальный)	$y = y_0 e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}$

II тип:

$$q_1 = \frac{5r_4 - 9}{2(3 - r_4)},$$

$$l = \sigma \sqrt{\frac{2r_4}{3 - r_4}},$$

$$y_0 = \frac{n}{2^{2q+1}} \frac{\Gamma(2q+2)}{\Gamma^2(q+1)}.$$

III тип:

$$P = \frac{4}{r_3^2} - 1,$$

$$l = \sigma \left(\frac{2}{r_3} - \frac{r_3}{2} \right),$$

$$y_0 = \frac{n}{l} \frac{P+1}{l^P P(P+1)}.$$

IV тип:

$$r = \frac{6(r_4 - r_3^2 - 1)}{2r_4 - 3r_3^2 - 6},$$

$$q = \frac{r+2}{2},$$

$$v = - \frac{r(r-2)r_3}{16(r-1) - r_3^2(r-2)},$$

$$l = \frac{\sigma}{4} \sqrt{16(r-1) - r_3^2(r-2)^2},$$

$$y_0 = \frac{n}{l} \frac{1}{F(r, v)},$$

где

$$F(r, \nu) = e^{-\nu \frac{\pi}{2}} \int_0^{\pi} e^{\nu x} \sin dx.$$

V тип:

$$P = 4 + \frac{8 + 4 \sqrt{4 + r_3^2}}{r_3^2},$$

$$\nu = \sigma(P - 2) \sqrt{P - 3},$$

$$y_{\sigma} = \frac{n \nu^{P-1}}{\Gamma(P-1)}.$$

VI тип:

$$q_{1,2} = \frac{1}{2} [S(S+2) \pm (S-2)],$$

$$l = \frac{\sigma t}{2},$$

$$y_0 = \frac{n e^{q_1 - q_2 - 1} \Gamma(q_1)}{\Gamma(q_1 - q_2 - 1)}.$$

VII тип:

$$q = \frac{5r_4 - q}{2(r_4 - 3)},$$

$$l = \sigma \sqrt{\frac{2r_4}{r_4 - 3}},$$

$$y_0 = \frac{n}{l} \frac{\Gamma(q)}{\Gamma(q-0,5) \Gamma(0,5)}.$$

Тип N (нормальный закон)

$$y_0 = \frac{n}{\sigma \sqrt{2\pi}}.$$

В случае, если априорно известно, что распределение $y_g(t)$ подчиняется нормальному или равномерному закону распределения, то значение $Q(t)$ вычисляется точно без расчета аналитического выражения аппроксимирующей кривой распределения плотности вероятности.

Для нормального распределения:

$$Q(t) = 1 - F_H(a_H \leq y(t) \leq a_B),$$

$$F(a_H \leq y(t) \leq a_B) = \frac{1}{2} \left[\Phi\left(\frac{a_H - M_Y(t)}{\sigma_Y(t)}\right) - \Phi\left(\frac{a_B - M_Y(t)}{\sigma_Y(t)}\right) \right],$$

$$\Phi\left(\frac{y - M_Y(t)}{\sigma_Y(t)}\right) = \Phi(z) = \frac{1}{2\pi} \int_{-z}^z e^{-\frac{x^2}{2}} dx,$$

для равномерного распределения

$$Q(t) = 1 - F_P(a_H \leq y(t) \leq a_B),$$

$$F_P(a_H \leq y(t) \leq a_B) = \frac{\Delta}{2\sqrt{3}\sigma_Y(t)}.$$

Для СИ с регулируемыми в процессе эксплуатации параметрами их элементов и априорной информации о погрешности регулирования j -х элементов СИ — σ_{xj} , абсолютных значений скорости долговременных изменений нерегулируемых $v_j(t)$ и регулируемых $v_j(t)$ параметров, коэффициентов влияния элементов СИ B_j , B_j^+ , расчет математического ожидания и дисперсии распределения $y_g(t)$ осуществляется в следующем виде:

$$M_Y(t) = \sum_j B_j M \left[\int_{t-t_p}^t v_j(\tau) d\tau \right] + \sum_j B_j M_j(t) + \sum_j B_j M(\delta_{xj}),$$

$$D_Y(t) = \sum_j B_j^2 M \left[\int_{t-t_p}^t v_j(\tau) d\tau \right] + \sum_j B_j^2 D_j(t) + \sum_j B_j^+ D(\delta_{xj}),$$

где t_p — момент регулировки. Так как в данном случае $M_j(t)$ и $D_j(t)$ являются полиномами от t , то интегралы в правых частях (59) и (60) вычисляются точно.

Полученное значение МПИ используют в качестве начальной точки поиска оптимального значения МПИ, реализуемого средней ветвью решения (рис. 1) на окончательном этапе решения задачи.

Окончательный расчет оптимального постоянного или переменных МПИ, назначаемых в зависимости от срока эксплуатации СИ, осуществляется методом, основанным на построении реальных моделей функционирования СИ и моделирования процессов их эксплуатации, по

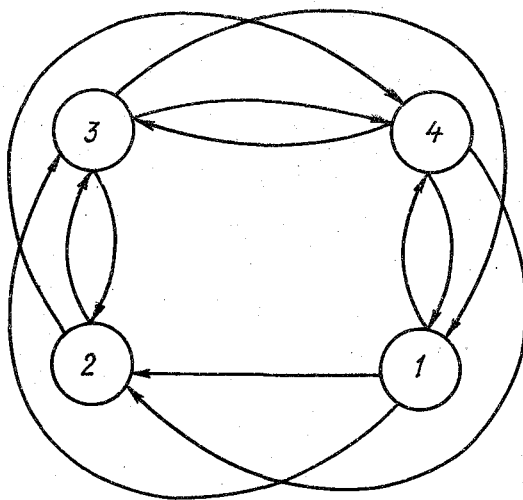


Рис. 2. Реальная модель функционирования средств измерений.

множеству случайных временных траекторий которых рассчитывается оптимальный постоянный МПИ или оптимальная последовательность переменных МПИ.

В соответствии с реальной моделью функционирования восстанавливаемого СИ /6/, представленной на рис. 2 в виде ориентированного вероятностного графа переходов обобщающих состояний, многократно моделируются случайные временные траектории взаимообусловленных обобщающих состояний СИ рис. 2, где 1 — состояние работоспособности — обобщающее состояние, определяющее все множество состояний СИ, удовлетворяющих условиям: нахождению метрологических параметров СИ в пределах допуска и его функционированию; 2 — состояние метрологического отказа — обобщающее состояние, определяющее все множество состояний СИ, удовлетворяющих условиям: выхода метрологических параметров СИ за пределы допуска и его функционированию; 3 — состояние поверки — обобщающее состояние, определяющее все множество состояний СИ, удовлетворяющих условиям: временного прекращения функционирования и воздействия на его состояние с целью изменения погрешности измерений; 4 — состояние ремонта — обобщающее состояние, определяющее все множество

состояний СИ, удовлетворяющих условиям: явного (неметеорологического) отказа СИ и нахождению его в ремонте.

Формальное описание обобщающих состояний СИ (макросостояний) позволяет представить критерий качества управления надежностью СИ в следующем виде:

$$a_S(t, \vec{S}, \vec{X}) = \frac{n_S(t, \vec{S}, \vec{X})}{N(t)},$$

где \vec{S} – вектор обобщающих состояний ($i = 1, 2, 3, 4$), \vec{X} – вектор управления (последовательность) МПИ; t – время.

Критерий метрологической годности

$$a_1(t, \vec{S}, \vec{X}) = \frac{n_1(t, \vec{S}, \vec{X})}{N(t)}$$

характеризует долю СИ $n_1(t, \vec{S}, \vec{X})$ находящихся в работоспособном состоянии в текущий момент времени t по отношению к общему числу СИ $N(t)$, находящихся в текущий момент времени t в эксплуатации.

$$\text{Критерий метрологической негодности } a_2(t, \vec{S}, \vec{X}) = \frac{n_2(t, \vec{S}, \vec{X})}{N(t)}$$

характеризует долю СИ $n_2(t, \vec{S}, \vec{X})$, находящихся в состоянии метрологического отказа в текущий момент времени t , по отношению к общему числу СИ $N(t)$, находящихся в текущий момент времени в эксплуатации.

$$\text{Критерий эффективности поверки } a_3(t, \vec{S}, \vec{X}) = \frac{n_3(t, \vec{S}, \vec{X})}{N(t)}$$

характеризует долю СИ $n_3(t, \vec{S}, \vec{X})$, находящихся в поверке в текущий момент времени t , по отношению к общему количеству СИ $N(t)$, находящихся в эксплуатации в момент времени t .

Критерий эффективности ремонта

$$a_4(t, \vec{S}, \vec{X}) = \frac{n_4(t, \vec{S}, \vec{X})}{N(t)}$$

характеризует долю СИ $n_4(t, \vec{S}, \vec{X})$, находящихся в состоянии ремонта в текущий момент времени t , по отношению к общему количеству СИ $N(t)$, находящихся в эксплуатации в момент времени t . Критерии a_3 и $a_4(t, \vec{S}, \vec{X})$ обеспечивают реальность поддержания на практике МПИ с учетом фактических возможностей существующей системы метрологического обеспечения.

Задаваясь соответствующими критериями на пределы допускаемых

значений $a_1(t, \bar{S}, \bar{X})$, $a_2(t, \bar{S}, \bar{X})$, $a_3(t, \bar{S}, \bar{X})$, $a_4(t, \bar{S}, \bar{X})$ в среднем по всей временной траектории эксплуатации СИ (на период ресурса) $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \epsilon_4$ осуществляется поиск оптимального алгоритма управления (МПИ), обеспечивающего при заданных допустимых значениях критериев минимум стоимости эксплуатации СИ, т. е. минимум проверок при максимально возможной при этом метрологической надежности (годности).

Для выбора оптимального МПИ с заданной доверительной вероятностью (обычно P не менее 0,95), рассчитываются с заданной временной дискретностью $t_0 = 5-6$ мес верхние квантили математических сжиданий показателей $a_S(t, \bar{S}, \bar{X})$, где $S = 1, 2, 3, 4, \dots$.

$$E_1(t) = E[a_1(t, \bar{S}, \bar{X}) - \text{DEL} \times \text{СКО}[a_1(t, \bar{S}, \bar{X})]],$$

$$E_2(t) = E[a_2(t, \bar{S}, \bar{X}) + \text{DEL} \times \text{СКО}[a_2(t, \bar{S}, \bar{X})]],$$

$$E_3(t) = E[a_3(t, \bar{S}, \bar{X}) + \text{DEL} \times \text{СКО}[a_3(t, \bar{S}, \bar{X})]],$$

$$E_4(t) = E[a_4(t, \bar{S}, \bar{X}) + \text{DEL} \times \text{СКО}[a_4(t, \bar{S}, \bar{X})]].$$

где DEL — значение верхней квантили доверительной вероятности $1,0 \leq \text{DEL} \leq 3,0$; при $P = 0,95$, $\text{DEL} = 2,0$, $P = 0,9973$, $\text{DEL} = 3,0$.

E — математическое ожидание $a_S(t, \bar{S}, \bar{X})$ за период времени, равный заданной дискретности вывода на печать (обычно $t_0 = 5, 6$ мес).

СКО — среднее квадратическое отклонение $a_S(t, \bar{S}, \bar{X})$ за период времени, равный заданной дискретности вывода на печать результатов счета ($t_0 = 5-6$ мес). \bar{S} — вектор обобщающих состояний, \bar{X} — вектор исследуемых на оптимальность МПИ (задается по расчетам левой или правой ветвей решения или генерируется по равномерному и нормальному закону программ).

По значениям $E_1(t)$, $E_2(t)$, $E_3(t)$, $E_4(t)$, рассчитанным по всей временной траектории процесса эксплуатации СИ, с заданной требуемой дискретностью ($t_0 = 1-6$ мес) рассчитываются соответствующие им математические ожидания $E_S(t)$ и среднеквадратические отклонения $\sigma_S(t)$ этих показателей:

$$\overline{E_S(t)} = \frac{\sum_{k=1}^K E_{S_k}(t)}{K},$$

$$\sigma_S(t) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^K (\overline{E_S(t)} - E_{S_k}(t))^2}{K-1}},$$

по которым и осуществляется поиск оптимального МПИ. K — количество дискретных значений $E_{S_k}(t)$ за весь ресурс эксплуатации СИ.

Поиск оптимального МПИ осуществляется последовательными шагами.

На первом шаге ищется такой МПИ (вектор моментов управления надежностью), который обеспечивает минимальное количество поверок СИ при заданных ограничениях на критерии выбора МПИ

$$\min_{\vec{X} \in \Omega_x} [c(\vec{X})],$$

при ограничениях на состояния СИ:

$$\vec{E}_S(t) = \begin{cases} \bar{E}_1(t) \geq \epsilon_1 \\ \bar{E}_2(t) \leq \epsilon_2 \\ \bar{E}_3(t) \leq \epsilon_3 \\ \bar{E}_4(t) \leq \epsilon_4 \end{cases}$$

где c — количество поверок (стоимость); Ω_x — пространство векторов управления (МПИ); $S = 1, 2, 3, 4$ — состояние СИ; $\vec{E}_S(t)$ — верхние квантили математических ожиданий (средние по всей траектории на период ресурса СИ) соответствующих показателей надежности и эффективности функционирования СИ; $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \epsilon_4$ — пределы допускаемых значений соответствующих показателей надежности и эффективности функционирования, задаваемые априорно (см. п. 3.1).

На последующих шагах ищется более оптимальный МПИ (относительно МПИ найденного на первом шаге решения), обеспечивающий не только выполнение ограничений первого шага решения, но и обеспечивающий при этом возможно минимальное количество СИ, находящихся в метрологическом отказе и максимальное количество СИ, находящихся в работоспособном состоянии, и минимальные дисперсии показателей надежности и эффективности функционирования СИ по траектории их эксплуатации:

$$\min_{\substack{\vec{X} \in \Omega_x \\ \vec{S} \in \Omega_S}} E[a_2(t, \vec{S}, \vec{X})],$$

$$\min_{\substack{\vec{X} \in \Omega_x \\ \vec{S} \in \Omega_S}} [\sigma_{a_S}^\alpha(t, \vec{S}, \vec{X}) (t, \vec{S}, \vec{X})],$$

$$\max_{\substack{\vec{X} \in \Omega_x \\ \vec{S} \in \Omega_S}} E[a_1(t, \vec{S}, \vec{X})],$$

где $\bar{S} = 1, 2, 3, 4, \dots$; Ω_S — пространство обобщающих состояний СИ, $\sigma_{a_S}(t, \bar{S}, \bar{X})$ — средние квадратические отклонения показателей.

Для выбора оптимального МПИ с доверительной вероятностью $P = 0,95$ задается (генерируется 1000 случайных реализаций вектора, начальное значение которого получено заранее, т. е. по левой или правой ветви решения, или задано равным ранее существовавшему МПИ).

, которые последовательно вводятся в реальную модель функционирования СИ, по которой, по заданным законам времени наработки СИ до перехода в соответствующие обобщающие состояния, осуществляется многократное моделирование временных траекторий переходов обобщающих состояний, по которым для совокупности не менее чем из 100 СИ (для каждой временной траектории) рассчитываются статистические параметры законов распределения показателей метрологической надежности и эффективности функционирования СИ, по которым в соответствии с выражениями (29–32) последовательными шагами осуществляется поиск оптимального МПИ. Максимально допустимый программой объем выборки СИ, для совокупности которых моделируется процесс их эксплуатации, может составлять 500 СИ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев Б. В. Прогнозирование надежности и эффективности радиоэлектронных устройств. — М., Сов. радио, 1970. 332 с.
2. Дружинин В. Г., Степанов С. В., Шихматова В. Л. Теория надежности радиоэлектронных систем. — М., Энергия, 1976. 446 с.
3. Новицкий П. В. Задачи обеспечения метрологической надежности средств измерений. — М., Изм. техника, 1977, № 2, с. 20–23.
4. Шишонко М. А. Основы теории надежности и эксплуатации радиоизмерительной техники. — М., Сов. радио, 1964. 264 с.
5. Тюков Б. В. Некоторые способы оценивания времени изменения метрологических характеристик в заданных пределах. — Л., Энергия, Труды ВНИИМ им. Д. И. Менделеева, 1975, вып. 173 (233), 120 с.
6. Окоренков В. Ю. Комплексный метод исследования метрологической надежности средств измерений. — Л., Труды ГГО, вып. 465, с. 65–97.
7. Окоренков В. Ю. Расчет и прогнозирование метрологической надежности метрологических средств измерений на основе метода имитационно-вероятностного моделирования процесса их эксплуатации. — Л., Гидрометиздат, Труды ГГО, вып. 465, 1982, с. 97–101.
8. Окоренков В. Ю. Статистическое моделирование процесса эксплуатации средств измерений. — Л., Труды ГГО, вып. 465, с. 101–107.
9. Окоренков В. Ю., Фатеев Н. П. Оптимальные стратегии управления метрологической надежностью метрологических средств измерений и их практическое применение. — Л., Труды ГГО, 1982, вып. 465, с. 3–13.

10. О к о р е н к о в В. Ю. Обоснование межповерочных интервалов для образцовых барометров УГКС. — Л., Труды ГГО, вып. 432, 1982, с. 96 —105.
11. О к о р е н к о в В. Ю. Исследование по обоснованию межповерочных интервалов метеорологических приборов. — Л., Гидрометеоиздат, Труды ГГО, вып. 452, 1981, с. 72 —99.
12. РД-50-330-82. Определение межповерочных интервалов рабочих средств измерений. —М., Изд-во стандартов, 1982.
13. М е т о д и к а определения параметров поверочных схем. —М., Изд-во стандартов, 1978.
14. РД 52-04-9-83. Межповерочные интервалы для средств измерений давления, температуры, скорости воздушного потока, характеристик солнечной радиации, эксплуатируемых в системе Госкомгидромета. — Л., 1983.

ПОПРАВочНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ К МЕЖПОВЕРОЧНЫМ ИНТЕРВАЛАМ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

В 1983 г. в системе Госкомгидромета был введен в действие руководящий нормативный документ РД 52.04.9-83 /10/, разработанный Н. П. Фатеевым и В. Ю. Окоренковым, который установил межповерочные интервалы (МПИ) для средств измерений (СИ) температуры воздуха, атмосферного давления, скорости воздушного потока, характеристик солнечного излучения. Этим документом определены МПИ для каждого отдельного типа СИ. В нем впервые для СИ скорости воздушного потока МПИ были дифференцированы в зависимости от нагрузки. МПИ были уменьшены в два-четыре раза для мест эксплуатации, в которых среднегодовые значения скорости ветра превышали 15, 20 м/с. Следует отметить, что в данном случае основной климатический фактор внешней среды, воздействующий на ветроизмерительные приборы, совпал с измеряемой величиной. Влияние других климатических факторов — температуры и влажности воздуха, солнечного излучения, осадков и т. д. — при установлении МПИ как для ветроизмерительных приборов, так и для всех остальных в РД 52.04.9-83 во внимание не принимается.

Однако обширная техническая литература свидетельствует о том, что климатические факторы внешней среды действуют практически постоянно. Эти факторы расшатывают внутреннюю структуру СИ, ухудшают их рабочие характеристики. Причем в одних климатических условиях расход метрологического ресурса оказывается большим, а в других — меньшим за один и тот же период времени. Если бы удалось учесть это обстоятельство, то это позволило бы оптимизировать систему метрологического обслуживания метеорологических СИ, т. е. достичь максимальной надежности работы парка СИ при минимуме затрат на поверку.

Цель данной статьи и состоит в определении поправочных коэффициентов к МПИ, которые бы позволили изменять продолжительность этих интервалов в зависимости от нагрузки, испытываемой метеорологическими СИ из-за влияния атмосферы при их эксплуатации на открытом воздухе.

Отыскание таких коэффициентов является задачей обратной задачи оценки агрессивных свойств атмосферы относительно СИ и вообще изделий. Критерии разделения атмосферных условий для технических целей содержит ГОСТ 15150-69 /1/, где приведены предельные и средние значения климатических факторов условий различной жесткости. В развитие и дополнение к этому документу действует другой стандарт — ГОСТ 16350-80 /2/. Этот стандарт устанавливает климатическое

районирование территории СССР и статистические параметры климатических факторов, которые должны использоваться в технических заданиях на разработку изделий, при выборе режимов испытаний, установлении правил эксплуатации, хранения и транспортировки. Климатическое районирование является детализацией макроклиматического районирования земного шара по ГОСТ 15150-69.

В настоящее время, по-видимому, единственным методом, пригодным для решения задачи по оценке агрессивности атмосферных условий объективным способом, является термодиссипативный метод (метод использования энтропийных эквивалентов климатических факторов). Основные положения метода изложены в работах /4-8/. В его основе лежит представление о климатических воздействиях на СИ или изделие как об отклонениях воздушной среды от ее нормального состояния, параметры которого установлены ГОСТ 8.395-80 или ГОСТ 24631-81 /3, 4/. При отклонениях параметров среды от нормальных значений изделия испытывают воздействия со стороны внешней среды (атмосферы). Между изделием, еще пребывающем в нормальном состоянии, и средой возникает разница термодинамических потенциалов, которая ведет к возбуждению процесса необратимого энергообмена между изделием (СИ) и окружающей средой. Потери этого процесса (например, в виде термического заряда диссипации) могут быть истолкованы как максимально возможные энергопотери внутренней структуры изделия или СИ, являющиеся причиной ухудшения рабочих свойств.

При таком подходе интенсивность потерь выражается скоростью производства энтропии, а разрушения, накопившиеся в структуре за тот или другой интервал времени, — количеством энтропии, произведенной за этот период. Принимая во внимание, что искомые коэффициенты должны быть определены не для конкретного изделия, а именно для климатического фактора, в формулах обе величины использованы в "удельном" виде, т. е. отнесены к одному молю вещества (воздуха, вовлекаемого в энергообмен). В связи с тем, что потери необратимого обмена зависят от скорости протекания процесса, для обеспечения сопоставимости результатов расчета длительность процесса энергообмена ограничена и принята равной одной секунде.

При соблюдении всех этих условий количество произведенной энтропии, связанной с отклонениями температуры воздуха от его нормального значения 25°C , может быть определено из выражения

$$\Delta S_T = \frac{T_H - T_x}{T_H} \frac{c_p \tau}{\Delta \tau} \ln \frac{T_H}{T_x}, \quad (1)$$

где ΔS_T — количество энтропии (разупорядоченности), которое произведено в одном моле воздуха при температурных воздействиях со

стороны внешней среды за некоторое время τ , c_p — молярная теплоемкость воздуха при постоянном давлении, выраженная в джоулях на моль-кельвин; $\Delta\tau$ — временной интервал, равный одной секунде; T_n, T_x — термодинамические потенциалы, возбуждающие обмен, т. е. температуры условного нагревателя и холодильника.

В случаях, когда температуры атмосферных воздействий выше нормального значения $T_x = 298 \text{ К}$ (25°С), а когда ниже, тогда $T_n = 298 \text{ К}$.

Подставляя в выражение (1) предельные значения температуры воздуха (годовой минимум и максимум при вероятности 0,5 и 0,05), приведенные в табл. 6 ГОСТа 16350-80, получим два ряда оценок агрессивности условий климатических районов

- (А) ... 1,00 0,69 0,67 0,73 0,54 0,58 0,42 0,35 0,31 0,27 0,23 0,12
0,23 0,19
- (В) ... 0,25 0,04 0,86 0,09 0,04 0,25 0,21 0,18 0,25 0,11 0,21 0,25
0,56 1,00

Значения в рядах расположены в последовательности, принятой для ГОСТ 16350-80, начиная с холодного I_1 и холодного климатического района I_2 и далее от II_1 до II_{12} . Оценки нормированы предельными значениями воздействующей величины: для ряда (А) $T_x = -57^\circ \text{С}$, а для ряда (В) $T_n = 49^\circ \text{С}$.

В соответствии с устоявшимися представлениями специалистов следующим по агрессивности относительно СИ и других изделий такой климатический фактор, как относительная влажность воздуха /1, 2/. При отклонениях от нормального значения 62,5 % (19,81 гПа) при 25°С между СИ (изделием) и окружающей средой возникает разность химических потенциалов, развивается процесс обмена химической энергией. Максимальное количество разрушений внутренней структуры СИ, к которому может привести этот обмен, может быть найдено из формулы

$$\Delta S_e = \frac{R\tau}{\Delta\tau} \left| \frac{2,99 - \ln e}{44,43 + \ln e} \frac{e}{p} \ln \frac{e}{p} \right| + \frac{R\tau}{\Delta\tau} \left| \frac{6,90 - \ln(p-e)}{-7,13 + \ln(p-e)} \frac{p-e}{p} \ln \frac{p-e}{p} \right|, \quad (2)$$

где ΔS_e — количество энтропии, произведенной в одном моле вещества при отклонении парциального давления водяного пара в воздухе (e) ниже 19,81 гПа за единицу времени $\Delta\tau = 1 \text{ с}$, R — универсальная газовая постоянная, равная 8,314 Дж/(моль К), p — нормальное атмосферное давление (1013,25 гПа), τ — интервал времени протекания процесса обмена данной интенсивности, выраженный в секундах.

Численные значения в формулу (2) были введены исходя их необходимых ограничений, в соответствии с которыми энергообмен принимался полностью необратимым при парциальных давлениях водяного пара $3 \cdot 10^{-9}$ гПа и 1113,25 гПа. По средним годовым значениям относительной влажности воздуха, приведенным в табл. 13 ГОСТа 16350-80, и средним годовым значениям температуры воздуха (табл. 5) были определены средние годовые значения парциального давления водяного пара для климатических районов. Найденные значения были подставлены в формулу (2) при интервале времени, принятым в один год ($\tau = 31\,536\,000$ с), и были получены оценки агрессивности районов по воздействиям водяного пара

(В) ... 0,29 0,39 0,44 0,30 0,38 0,50 0,50 0,51 0,51 0,49 0,51 1,00
0,50 0,48

Оценки нормированы относительно максимального значения, которое было получено для теплого и влажного климата района II₁₀ — представительный пункт Батуми. Как свидетельствует практика, именно в этом районе наблюдается наиболее разрушительное влияние повышенной влажности воздуха на СИ (изделия).

По априорной диаграмме климатических факторов П. И. Коха [9] четвертое место по интенсивности разрушительного действия на СИ (изделия) занимает прямое солнечное излучение. Количество энтропии (разупорядоченности), производимой этим фактором во внутренней структуре, можно определить из выражения

$$\Delta S_{\circ} = \frac{I}{c T_{\text{ср}} n \Delta \tau} \quad (3)$$

где ΔS_{\circ} — количество энтропии, произведенной в одном моле вещества в течение одного года под влиянием прямого солнечного излучения; c — скорость света, выраженная в метрах в секунду, $\Delta \tau$ — время равное одной секунде, n — количество молей воздуха в кубическом метре при средней годовой температуре района ($T_{\text{ср}}$); I — энергетическая экспозиция прямого солнечного излучения, выраженная в мегаджоулях на квадратный метр.

Из табл. 5, 17 ГОСТа 16350-80 в выражение (3) были подставлены соответствующие значения величин и получен следующий ряд оценок агрессивности районов по воздействию прямого солнечного излучения

(Г) ... 0,71 0,47 0,38 0,46 0,35 0,70 0,47 0,73 0,55 0,49 0,70 0,72
1,00 0,92

Оценки нормированы максимальным значением, характерным для жаркого сухого климатического района II₁₁ с представительным пунктом — Ашхабад.

Разрушения, возникающие во внутренней структуре СИ (изделий)

под воздействием климатических факторов, необратимы и со временем накапливаются. Поэтому энтропия как мера разупорядоченности внутренней структуры обладает аддитивностью и оценки агрессивности всех четырех рядов могут быть суммированы

(Д) ... 2,25 1,59 2,35 1,57 1,32 2,01 1,60 1,76 1,61 1,37 1,64 2,09
2,29 2,59

Каждый из климатических факторов вносит свой вклад в общую агрессивность. Так в соответствии с диаграммой П. И. Коха вклад прямого солнечного излучения составляет только 72 % от негативных последствий влияния первого фактора — низких температур воздуха. Если учесть это обстоятельство, тогда ряд (Д) примет вид

(Е) ... 1,95 1,36 2,02 1,37 1,12 1,66 1,32 1,41 1,31 1,09 1,28 1,62
1,81 2,08

Метод энтропийных эквивалентов позволяет учесть влияния остальных климатических факторов диаграммы П. И. Коха. Исключения составляют воздействия направлений ветра и пыльных бурь из-за отсутствия необходимых данных в ГОСТе 16350-80. Если использовать материалы этого стандарта и ввести поправки на вклад каждого из них в общую агрессивность атмосферы, то окончательно получим ряд оценок

(Ж) ... 3,68 3,16 3,63 2,82 3,46 3,45 2,98 3,05 2,93 2,80 2,91 3,37
3,46 3,79

Отсюда следует, что максимальные нагрузки испытывают СИ и другие изделия при эксплуатации на открытом воздухе в очень жарком сухом районе II₁₂, а также в очень холодном I₁ и арктическом приполюсном климатическом районе II₁.

По большей части метеорологические СИ имеют всеклиматическое исполнение конструкции, т. е. их эксплуатация на открытом воздухе может происходить во всех макроклиматических районах на море и на суше. Такое климатическое исполнение по ГОСТу 15150-69 имеет обозначение (В.1). Естественно, что МПИ для таких СИ устанавливаются в расчете на самую большую нагрузку. Такая нагрузка по данным трех последних рядов оценок характерна для района II₁₂. В остальных климатических районах нагрузки, испытываемые СИ со стороны атмосферы, меньше и, следовательно, МПИ для этих СИ могут быть увеличены. Нормируя ряды Д, Е, Ж на максимальные значения оценок района II₁₂ и определяя средние, получим обратные оценкам значения поправочных коэффициентов к МПИ метеорологических СИ

(З) ... 1,1 1,5 1,1 1,5 1,6 1,2 1,5 1,5 1,5 1,7 1,5 1,2 1,1 1,0

Отсюда следует, что учет климатических нагрузок на СИ позволяет увеличить МПИ для многих районов (в среднем в 1,4 раза).

Полученные коэффициенты пригодны для корректировки и других

интервалов, связанных с износом и старением СИ в атмосферных условиях, например — межремонтных интервалов, сроков службы. В случаях избирательной подверженности конструкции влиянию одного или нескольких из рассмотренных факторов поправочные коэффициенты для учета климатических нагрузок могут быть получены из оценок вышеприведенных рядов как обратные ими величины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Г О С Т 15150-69. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды. — М., Изд-во стандартов, 1978. 40 с.
2. Г О С Т 16350-80 Климат СССР. Районирование и статистические параметры климатических факторов для технических целей. — М., Изд-во стандартов, 1981. 140 с.
3. Г О С Т 24631-81. Атмосферы справочные. Параметры. — М., Изд-во стандартов, 1981. 30 с.
4. Г О С Т 8.395-80, ГСИ Нормальные условия измерений при поверке. Общие требования. — М., Изд-во стандартов, 1980. 6 с.
5. К о ж е в н и к о в Б. Л. Влияние агрессивности атмосферы на межповерочные интервалы. — Труды ГГО, вып. 465, 1982, с. 50—54.
6. К о ж е в н и к о в Б. Л. Влияние радиационных воздействий на старение метеорологических приборов. — Труды ГГО, 1982, вып. 465, с. 55—60.
7. К о ж е в н и к о в Б. Л. Влияние ветровых воздействий на износ метеорологических приборов. — Труды ГГО, 1982, вып. 465, с. 60—64.
8. К о ж е в н и к о в Б. Л. Воздействия на приборы испаряющихся примесей воздуха. — См. наст. сб.
9. К о ж е в н и к о в Б. Л. Оценка влияния гигроскопичных примесей воздуха на средства измерений. — См. наст. сб.
10. К о х П. И. Климат и надежность машин. — М., Машиностроение, 1981. 175 с.

О ПРИМЕНЕНИИ ПОНЯТИЯ – КОСВЕННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ В МЕТЕОРОЛОГИИ

Развитие точных методов метеорологических исследований обуславливает необходимость совершенствования и методов метрологического обеспечения измерений в метеорологии. Соответственно – особенно в связи с перспективой широкого применения измерительно-вычислительных комплексов /5/ – возрастает потребность в уточнении ряда исходных понятий метрологии, некорректность практического использования каких-либо сегодня не ограничивается рамками простой неадекватности их конкретной трактовки, но нередко оказывается причиной неприемлемых расхождений в оценке показателей точности метеорологических измерений.

К числу таких понятий относится и понятие "косвенное измерение", определяемое в терминологическом стандарте /1/ как измерение, при котором искомое значение величины находят на основании известной зависимости между этой величиной и величинами, подвергаемыми прямым измерениям.

На недостаточность настоящего определения уже указывалось в /2/, где предпринята попытка выделить и выразить в общих чертах основные особенности понятия "косвенное измерение". Однако для более строгого выявления специфики последнего требуется, очевидно, отдельное исследование, при проведении которого следует опираться на исходные положения метрологии, сформулированные в /3, 6/.

Здесь необходимо отметить, в первую очередь, особенности измерения как родового понятия. Согласно /1/, измерение – нахождение значения физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств. Из этого определения вытекает, что измерение есть процедура, отличительными чертами которой являются:

- познавательный характер, т. е. необходимость восприятия результата человеком;
- экспериментальный характер, т. е. обязательное привлечение технических средств (средств измерений).

Естественно, что измерение завершается получением числовой оценки значения физической величины. Кроме того, измерению присущи определенные ограничения по месту и времени как любому эксперименту.

По способу получения результатов измерения, как известно, разделяют на прямые, косвенные, совокупные и совместные. К прямым относят те, при которых результаты получаются непосредственно по показаниям средств измерений (допускается совместная обработка ряда наблюдений, внесение поправок). При косвенных (совокупных, совместных) измерениях результаты вычисляются по результатам

прямых измерений, т. е. прямые измерения дополняются расчетом по заранее установленному алгоритму (реализации известной зависимости) для получения значения каждой измеряемой величины.

В настоящее время в литературе встречаются разные способы описания измерений, относящиеся к разным уровням общности представлений об измерении.

На наиболее общем (высоком) уровне измерение рассматривается в целом как познавательная процедура, при которой происходит сопоставление множества значений $\{a\}$ величины множеству возможных чисел $\{a\}$ /7/:

$$\{a\} = Q \{a\}, \quad (1)$$

где Q — оператор измерений, переводящий значение величины в числовую оценку. Областью определения оператора Q является множество P значений величины a : $P = \{a\}$, а областью значений — множество чисел R .

На этом уровне описания косвенных измерений измерительная процедура распадается на две части: экспериментальную, заключающуюся в прямом измерении величины a , и вычислительную, состоящую в расчете значений другой величины b по заранее известной зависимости. Вся процедура может быть записана в виде:

$$\{a\} \xrightarrow{Q_1} \{a\} \xrightarrow{Q_2} \{b\}, \quad (2)$$

где общий оператор измерений Q представляется двумя операторами Q_1 и Q_2 . В настоящее время на данном уровне не существует более подробного описания процедуры измерений. Для понятия косвенное измерение существенен сам факт представления преобразования двумя операторами.

Следующий уровень (менее общий) связан с описанием технической реализации измерительной процедуры, структуры используемых технических средств. При измерении средство измерений (СИ) приводится во взаимодействие с объектом исследования, в результате чего на выходе чувствительного элемента (первичного измерительного преобразователя) появляется сигнал x_a , содержащий информацию об измеряемой величине (параметре объекта) a . Для получения числовой оценки a проводятся последовательные преобразования сигнала, совокупность которых может быть обозначена оператором ψ :

$$a = \psi x_a,$$

где ψ является оператором СИ. При a , принадлежащем множеству возможных значений P , областью определения оператора ψ является

множество возможных значений сигнала x_a , а областью значений — множество возможных оценок R .

Очевидно, что между операторами ψ и Ω существует взаимосвязь, однако одному и тому же оператору Ω может соответствовать несколько разных операторов ψ , так как техническое осуществление процедуры измерений может быть разным. Например, температура объекта может измеряться с помощью термоэлектрического термометра сопротивления либо с помощью пирометра, либо с помощью ртутного термометра.

Конкретный оператор ψ может быть представлен рядом последовательных преобразований, среди которых обязательно должно присутствовать аналого-цифровое преобразование (оператор A_0)

$$a = \Phi A_0 A_n \dots A_1 x_a, \quad (3)$$

где A_i — операторы преобразования сигнала, Φ — оператор вычисления оценки a по определенному алгоритму на основе результатов преобразований сигнала. Совокупность операторов $A_1 \dots A_n$ можно заменить одним оператором A ; тогда

$$a = \Phi A_0 A x_a. \quad (4)$$

Каждый оператор в выражении (3) реализуется с помощью соответствующего преобразователя. В том случае, когда a — скаляр, а принадлежит множеству действительных чисел и оператор Φ раскрывается как функционал. Последний определяется как функция некоторого ряда наблюдений за величиной (ряда значений процесса в последовательные моменты времени t_i):

$$\Phi(x) = f[x(t_1), x(t_2), \dots, x(t_n)]. \quad (5)$$

Примерами функционала Φ могут служить:

определение значения процесса $x(t)$ в фиксированный момент времени

$$\Phi(x) = \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t - t_0) x(t) dt = x(t_0),$$

определение максимального значения процесса

$$\Phi(x) = \max_{c \leq t \leq d} x(t) = \lim_{n \rightarrow \infty} \left[\int_c^d |x(t)|^n dt \right]^{1/n},$$

определение среднего значения, значений моментов, спектра

$$\Phi(x) = \int_c^d x(t) \varphi(t) dt.$$

В частом случае функционал $\Phi(x)$ может переходить в функцию от сигнала x_a :

$$\Phi(x) = f(x_a, q),$$

где q — некоторые дополнительные параметры. Формально такие процедуры соответствуют представлению о косвенном измерении.

Следует заметить, что при прямых измерениях не проводятся дополнительные расчеты для получения окончательного результата и оператор Φ отсутствует ($\Phi \equiv 1$). Таким образом, прямое измерение описывается выражением

$$a = A_0 A x_a. \quad (6)$$

Необходимо подчеркнуть особенность оператора A , которая может быть использована для его определения: на практике он реализуем только при градуировке измерительных преобразователей — произведение ($A_0 \times A$) представляет градуировочную характеристику СИ.

Из уравнения (6) следует утверждение о взаимосвязи преобразования сигнала в измерительной цепи СИ и класса измерений: если измерение выполняется с помощью СИ, имеющего сквозную градуировочную характеристику, то при любых преобразованиях сигнала в самом СИ такое измерение следует относить к прямым. Зачастую физическая природа входного сигнала СИ и выходного не совпадают, например, у термометра (теплота — выюота ртутного столба), термопары (теплота — электрическое напряжение) и т. п. Иногда подобные измерения относят к косвенным /7/. Необоснованность такого утверждения достаточно очевидна.

Появление оператора Φ в выражении для преобразования измерительного сигнала связано с необходимостью дополнительных (вычислительных) преобразований результатов прямых измерений, что соответствует представлению о понятии косвенное измерение. Таким образом, выражение (4) в общем случае описывает процедуру косвенного измерения. По-видимому, целесообразно и определение понятия трактовать, как определение измерения, при котором искомое значение величины вычисляется по результатам прямых измерений других величин на осноизвестной зависимости между исследуемой величиной и этими другими величинами.

Описание процедуры измерений (3) может быть сопоставлено с обобщенным операторным описанием измерений (2). Тогда выявляется, что оператор Ω_2 должен описывать некоторую вычислительную процедуру. При этом косвенному измерению как и прямому, должны быть присущи определенные ограничения по месту и во времени.

В качестве примера косвенного измерения может служить измерение концентрации пыли в атмосфере весовым методом /4/. Последний

заключается в выделении из пылегазового потока частиц пыли фильтром и прямом измерении их массы путем взвешивания фильтра до отбора пробы (а мг) и после (b мг). Измеряется также объем V л протягиваемого через фильтр воздуха. Концентрацию С рассчитывают по формуле:

$$C = \frac{b - a}{V} 1000 \text{ (мг/м}^3\text{)}.$$

Эта же величина может быть измерена и прямым способом, например, радиоизотопным методом, при котором используют прибор со шкалой, непосредственно проградуированной в единицах концентрации.

Сделанное уточнение определения понятия позволяет ввести классификацию косвенных измерений по природе и количеству прямо измеряемых величин.

В том случае, когда природа конечной искомой величины и прямо измеряемой величины совпадают (5), имеет место как бы переходная ступень между прямыми и косвенными измерениями. Например, выполняются прямые измерения величины в последовательные интервалы времени или ряда совокупных проявлений величины, а результат измерения вычисляется при обработке ряда результатов этих измерений. По составу операций подобные измерения могут быть отнесены к косвенным, тогда как по содержанию действий они близки к прямым измерениям с многократными наблюдениями. Такие измерения можно назвать условными косвенными измерениями.

Выделяются также группы непосредственно косвенных измерений:

— монокосвенные измерения, при которых выполняется всякий раз прямое измерение одной величины, а результат вычисляется на основании зависимости между этой величиной и исследуемой величиной другой природы. Уравнение преобразований сигнала для таких измерений запишется в виде

$$a = \Phi A_0 x_\beta,$$

где x_β — сигнал, содержащий информацию о β ;

— поликосвенные измерения, при которых прямым измерениям подвергается несколько разнородных величин, а вычисления результата проводятся по известной зависимости искомой величины от этих величин. Уравнение преобразований измерительных сигналов представится выражением:

$$a = \Phi [A_{01} A_1 x_\beta, A_{02} A_2 x_\gamma \dots],$$

где $x_\beta, x_\gamma, A_{01}, A_1, A_{02}, A_2$ — обозначают сигналы и операторы, анало-

гичные вышеописываемым.

В заключение следует отметить одну особенность построения измерительных цепей. В современных приборах при аттестации зачастую не разделяют отдельные преобразования сигнала, а указывают сквозную градуировочную характеристику $a = f(x_\beta)$ или $a = f(x_\beta, x_\gamma, \dots)$. При этом преобразование сигнала может быть описано с помощью обобщенного оператора $\bar{A} = \Phi A$:

$$a = A_0 \Phi A x_\beta = \bar{A}_0 A x_\beta,$$

т. е. представляется уравнением прямого измерения. Если измерительная процедура ограничивается наблюдением с помощью данного средства измерений, то измерения будут относиться к прямым. Здесь вычислительные преобразования не обособляются, являясь составной частью измерительных. Например, измерения мощности в электрической цепи с помощью электродинамических ваттметров.

Уточнение понятия и классификация косвенных измерений позволят внести ясность в решение многих задач метрологического обеспечения метеорологических исследований: при выделении чисто метрологических проблем, при анализе состава технических средств, применяемых при экспериментах и в АСУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 16263-70. "Метрология. Термины и определения". — М., Изд-во Мысль, 1971.
2. Земельман М. А. К вопросу о косвенных измерениях и метрологических методах. — Изд-во Измерительная техника, 1976, № 8.
3. Маликов М. Ф. Основы метрологии. — М., Коммерприбор, 1949.
4. Перегуд Е. А., Горелик Д. О. Инструментальные методы контроля загрязнения атмосферы. — Л., Химия, 1981.
5. Фатеев Н. П. Метрологическое обеспечение в системе Госкомгидромета. — Изд-во Измерительная техника, 1981, № 3.
6. Широков К. П. Об основных понятиях метрологии. — Труды метрологических ин-тов, вып. 130 (190), 1972.
7. Finkelstein L. Fundamental concepts of measurement. — Dresden, Acta Jmeco IV, 1973.

К ВОПРОСУ О ВЫБОРЕ СПОСОБА ПОЛУЧЕНИЯ ПАРОГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ

В решении ряда актуальных задач, стоящих перед системой Госкомгидромета в области метрологического обеспечения (например, по проблеме охраны окружающей среды, в частности — чистоты воздушного бассейна, и т. п. /7/), возрастающее значение приобретают разработка и совершенствование методов и средств измерений загрязнения атмосферы. Соответственно, для осуществления испытаний и правильной эксплуатации употребляемых здесь устройств контроля и аналитических приборов необходимо создавать искусственные парогазовые смеси (ПГС) различных веществ — примесей в виде твердых веществ, жидкостей или газов — в широком диапазоне концентраций.

Для получения ПГС применяются разнообразные способы, отличающиеся как используемым принципом, так и аппаратным оформлением. Вряд ли следует искать какой-либо универсальный тип или конструкцию дозатора: в каждом отдельном случае для приготовления ПГС предпочтителен дозатор определенной конструкции. При выборе же оптимальной конструкции дозатора для создания ПГС с заданными метрологическими характеристиками требуется знание не только физико-химических свойств самого вещества, но и возможностей того или иного способа получения парогазовых смесей.

К настоящему времени в практике приготовления ПГС нашли применение установки и приборы статического и динамического типов. Однако первые удобны лишь для получения смесей довольно значительных (макро- и малых) концентраций и при небольших расходах ПГС /4/, тогда как наиболее сложным и важным на сегодня является создание смесей, прежде всего поверочных, с содержанием микроконцентраций. Последнее возможно за счет реализации исключительно динамического метода /4/, вследствие чего названная аппаратура второго типа получила большее распространение.

Наряду с двумя упомянутыми методами, также достаточно широко используется на практике метод приготовления смесей в баллонах под давлением, обладающий преимуществом перед статическим методом — в существенном увеличении объема создаваемой смеси при относительно малых габаритах соответствующей аппаратуры /4, 13, 14/.

При выборе способа получения ПГС исходят из следующих свойств примеси:

- агрегатного состояния;
- давления P_n или концентрации C_n насыщенных паров;
- заданной концентрации ПГС C_3 .

Среди известных критериев /6/ по которым выбирается способ приготовления ПГС, основным и принимаемым в качестве определяю-

шего признака следует признать отношение заданной концентрации вещества в ПГС и концентрации насыщенных паров этого вещества при фиксированной температуре, выражаемое параметром K — коэффициентом снижения концентрации вещества, причем $K = C_3/C_n$. В зависимости от устанавливаемых значений K целесообразно, по-видимому, проводить и необходимое здесь рассмотрение преобладающих в практике способов получения ПГС.

Очевидно, что при $K = 1 \div 0,01$ концентрация вещества представляет в пределах от насыщенных паров до сотых долей подобной концентрации. Такие концентрации создаются чаще всего для твердых веществ, поскольку для них концентрация насыщенных паров мала, или для жидких малолетучих веществ.

В данном случае обычно применяют способ приготовления ПГС, основанный на сдуве с поверхности вещества его паров с последующим разбавлением их в смесителе газом-разбавителем до заданной концентрации. Дозаторы для реализации этого способа конструктивно оформляются в виде дозатора — "гуська" с барботажем или без барботажа, склянки Дрекселя и других вариантах /2, 4, 9/. Для твердых примесей используют обдув поверхности вещества чистым воздухом, а для предотвращения образования аэрозоля порошкообразных твердых веществ их помещают в мешочек из фильтрующего материала (например, фильтра АФА).

Концентрация паров в газе-носителе рассчитывается по формуле

$$C_3 = \frac{aF}{V} \Delta C,$$

где a — коэффициент массопередачи на единицу концентрации в $\text{кг} \times \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$; F — площадь массообмена в м^2 ; V — скорость подачи газа-носителя в $\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$; ΔC — разность концентраций или концентрационный напор между обменивающимися фазами (поверхность вещества — газ), $\Delta C = C_n - C_3$.

Следует отметить, что наибольшую сложность представляет создание ПГС малолетучих веществ с концентрациями близкими к насыщенным парам ($K \rightarrow 1$). Здесь приходится прибегать к разворачиванию поверхности вещества, обдуваемой воздухом, для чего используют разнообразные специальные приемы и приспособления /2, 10/.

Иным способом получения ПГС с концентрациями веществ близкими к насыщенным парам является способ с употреблением в качестве дозатора медицинского шприца, заключающийся в том, что в поток газа-носителя шприцем с постоянной скоростью вносится жидкость, которая в указанном потоке полностью испаряется. Данный способ оказывается практически единственным динамическим способом приготовления ПГС многокомпонентных веществ, таких, например, как бензин, дизельное топливо и т. п.

Концентрация ПГС, создаваемой на выходе из испарителя при дозировании жидкости шприцем, зависит от расхода последней Q и скорости подачи газа-носителя V , т. е. $C_3 = Q/V$ или при выражении расхода жидкости через произведение объема дозируемой жидкости на ее плотность

$$C_3 = \frac{\pi R^2 l \rho}{V},$$

где R — радиус шприца в м; l — скорость перемещения поршня шприца в м · с⁻¹; ρ — плотность дозируемой жидкости в г · м⁻³.

Для получения более низких концентраций веществ ($K = 0,01$ и менее) в дозатор-испаритель заливается раствор дозируемого вещества в инертном малолетучем растворителе. При этом концентрация паров вещества над раствором определяется в соответствии с законом Рауля, произведением $C_H N$ (N — мольная доля вещества в инертном растворителе, раскрываемая как отношение числа молей дозируемого вещества n_1 к суммарному числу молей названного вещества и растворителя $n_1 + n_2$).

С учетом ранее введенных обозначений параметров расчетное уравнение для настоящего способа получения ПГС имеет вид

$$C_3 = \frac{aP}{V} \left(C_H \frac{n_1}{n_1 + n_2} - C_3 \right).$$

По своему конструктивному оформлению данный способ аналогичен предыдущему, описанному в начале обзора.

Для создания еще более низких концентраций веществ в ПГС ($K = 0,001$ и менее) используются диффузионные способы, основанные на диффузии вещества через капилляр /11/, или пористую мембрану, которую здесь можно рассматривать как систему капилляров /3, 5/, или проницаемый полимерный материал /8, 12/.

Существует множество модификаций капиллярных дозаторов. Наиболее совершенными являются дозаторы, в которых обеспечивается постоянство диффузионного пути по мере испарения жидкости из капилляра (дозаторы Агухтина О. А., Вольберга Н. Ш. и др.) /1, 2/.

Зависимость между заданной концентрацией вещества и параметрами дозатора капиллярного типа представляется выражением, выведенным на основе закона Фика и уравнения Менделеева-Клапейрона:

$$C_3 = \frac{\pi d^2 D P_H M}{4hVRT},$$

где h — длина капилляра в м; d — диаметр капилляра в м; D — коэффициент диффузии в $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$; V — объемная скорость газа-носителя в $\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$; P_n — давление насыщенного пара в мПа; R — универсальная газовая постоянная, равная $8,31441 \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1} \cdot \text{моль}^{-1}$; T — температура в К; M — молекулярный вес в г.

Необходимо отметить, что из капиллярных дозаторов большее распространение получил дозатор Апухтина, использование которого позволяет осуществлять контроль ПГС методом не только химическим, но и физическим (по убыли испаряющегося вещества в измерительном капилляре). Расчет здесь производится по формуле

$$C = \frac{\pi d_1^2 a \rho}{4V},$$

где C — концентрация дозируемого вещества в $\text{г} \cdot \text{м}^{-3}$; D_1 — диаметр измерительного капилляра в м; a — скорость перемещения мениска в измерительном капилляре в $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$; ρ — плотность дозируемой жидкости в $\text{г} \cdot \text{м}^{-3}$.

Процесс диффузии через полимерную мембрану также описывается законом Фика /4/. Количество проникающего сквозь полимер вещества в данном случае зависит от природы полимера и дозируемого вещества, а, кроме того, от геометрических параметров проницаемого материала (пленки) — ее толщины и площади.

Концентрация ПГС, создаваемой с помощью полимерного дозатора, определяется из уравнения

$$C_3 = \frac{\gamma F}{\delta V},$$

где γ — коэффициент проницаемости, характеризующий природу системы "полимер — вещество" (устанавливается экспериментальным путем) в $\text{г} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$; F — площадь пленки в м^2 ; δ — толщина пленки в м; V — объемная скорость газа-носителя в $\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$.

Дозаторы с использованием полимеров нашли широкое применение из-за надежности в работе и простоты конструкции. Среди множества конструктивных вариантов таких дозаторов следует отметить "дозатор — трубку", где дозирующим элементом является полимерная трубка, заполненная примесью и загерметизированная с обоих торцов. Снаряженная указанным образом трубка обдувается потоком газа-носителя.

Концентрация примеси в потоке рассчитывается здесь по формуле

$$C_3 = \gamma \frac{\pi d L}{\delta V},$$

где L и d — длина и диаметр полимерной трубки в м; δ — толщина стенки полимерной трубки в м.

Необходимо добавить, что при применении "дозатора — трубки" для приготовления ПГС легколетучих веществ количество поступающего в поток вещества может контролироваться как химическим, так и физическим методом (по убыли веса дозатора).

Способ создания ПГС с использованием баллонов под давлением позволяет получать смеси с очень широким диапазоном концентраций.

Наряду с несомненным удобством приготовления ПГС в баллонах, и другими упомянутыми ранее достоинствами, этот способ обладает недостатками, ограничивающими его применение. Так, в баллонах не должно создаваться давление, при котором возможна конденсация дозируемых паров, а следовательно, нарушение состава смеси (что может привести к существенным ошибкам); вещество — примесь должно быть не агрессивным и не взаимодействовать с материалами баллона и вентиля и пр.

Навеска для зарядки баллона G и концентрация паров жидкости в баллоне C_3 после введения газа-носителя связаны соотношением

$$C_3 = \frac{1000 G P_a}{V P_6},$$

где P_a — стандартное атмосферное давление в мПа; P_6 — давление в баллоне в мПа; V — объем баллона в м³.

Проведенный краткий обзор способов получения ПГС дает основание для формулировки следующей рекомендации.

При выборе способа создания ПГС целесообразно сначала определить коэффициент снижения концентрации K , а затем в соответствии с указанными в обзоре характеристиками избрать подходящий для конкретной ситуации способ и по формуле рассчитать параметры дозатора или навески.

В заключение необходимо заметить, что конечные концентрации ПГС получаются на выходе газодинамических установок (ГДУ), функционирующих, как правило, по методу смешения газовых потоков. Очевидно, что качество работы ГДУ во многом определяется совершенством дозатора, его метрологическими характеристиками. Выявление же таковых, как и контроль работы большинства дозаторов, на сегодня базируется на химических методах анализа. Однако последние, в метрологическом аспекте, уступают методам, основанным на физических или физико-химических принципах. Поэтому, естественно, более перспективными являются те из рассмотренных выше устройств (дозатор Алухтина, "дозатор — трубка"), какие позволяют реализовать в целях их метрологического обеспечения и одни, и другие методы анализа.

Соответственно, при выборе метода дозирования, при разработке новых способов дозирования ПГС следует непременно учитывать возможность применения для них физических или физико-химических методов анализа либо использования двух-трех (нескольких) независимых методов анализа. В этом случае, несомненно, дозаторы будут иметь более достоверные метрологические характеристики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А п у х т и н О. А. Авторское свидетельство № 166163, кл. G 01N.
2. В о л ь б е р г Н. Ш. Методы определения вредных веществ в воздухе. —Л: Химия, 1968.
3. Д е р я г и н Б. В., П р о х о р о в П. С., М а л к и н А. Д. — Журнал физической химии, 1950, т. 24, вып. 4. 670 с.
4. К о л л е р о в Д. К. Метрологические основы газоаналитических измерений. —М.: Стандартгиз, 1967.
5. К о л л е р о в Д. К., М г а л о б л и ш в и л и К. Д. Диффузионный дозатор паров жидкости. —Измерительная техника, 1969, № 11, с. 39—41.
6. Р я б о в В. Г. Об уточнении некоторых понятий и терминов в области аналитических измерений. —Л.: II Всесоюзное совещание по теоретической метрологии, тезисы докладов, 1983, с. 190—191.
7. Ф а т е е в Н. П. Метрологическое обеспечение в системе Госкомгидромета. —Измерительная техника, 1981, № 3, с. 5—6.
8. Ч и с т ы е вещества и технические средства эталонирования аналитических приборов. —Л.: Симпозиум, тезисы докладов, 1973, с. 22—24.
9. В а u w e n s В., В i e z u n s k i G. Mesures et contr. ind, 1957, 22, 236, p. 71.
10. C a m b e А., L a b a r d i n А. Revuede l'institut francais du petrole, 1957, v. 12, N 3, p. 330.
11. F o r t u i n J. M. H. Analitica Chimica Acta, 1956, v. 15, p. 21.
12. O' K e l f f e А. E., O r t m a n G. C. Primary standards for trace gas analysis. — Analytical Chemistry, 1966, N 38, p. 760—763.
13. S a l t z m a n В. E. Analyt. Chem., 1965, N 37, p. 1261.
14. S a l t z m a n В. E., W a r t b u r g А. Z. Analyt. Chem., 1961, N 33, p. 1100—1112.

СОДЕРЖАНИЕ

А. В. Аверкин, С. Г. Ефимов, В. А. Кузьмин, Ю. В. Роголев, Н. П. Фатеев. Метрологические исследования рабочего эталона единицы скорости воздушного потока	3
Ю. В. Роголев, Н. П. Фатеев. Методика оценки погрешности средств измерения скорости ветра при их поверке	12
Ю. В. Роголев, Н. П. Фатеев. Методика нормирования погрешностей измерения метеорологических информационно-измерительных систем	18
Ю. В. Роголев, Н. П. Фатеев. Оценка погрешностей поверки автоматических метеостанций	41
Ю. В. Роголев, Б. Л. Кожевников, С. Л. Аствацатуров, И. И. Маньков, Н. П. Фатеев, П. В. Анискин. Результаты поверки автоматических метеостанций КРАМС в аэропортах	50
Ю. В. Роголев, В. Ю. Окороенков, Н. П. Фатеев. Теоретическое и экспериментальное обоснование методики периодической поверки средств измерения скорости ветра на месте эксплуатации	58
В. Е. Боханов, Ю. В. Роголев. Оценка погрешности определения допустимого значения средней скорости ветра при посадке самолетов	68
Ю. В. Роголев, Б. В. Куров. К вопросу об аттестации образцовых аэродинамических труб	72
С. Л. Аствацатуров, Н. П. Фатеев, Б. Л. Кожевников, А. И. Рагулин, В. Д. Олейнер. Поверка измерителя высоты нижней границы облаков с помощью временных линий задержки	79
Б. Л. Кожевников, С. Л. Аствацатуров, Н. П. Скоробогатых. Градуировка поляризационного измерителя видимости М-53	86
Б. Л. Кожевников. Воздействие на приборы испаряющихся примесей воздуха	89
Б. Л. Кожевников. Оценка влияния гигроскопических примесей воздуха на средства измерений	94
В. Ю. Окороенков, Н. П. Фатеев. Методика расчета оптимальных межповерочных интервалов для метеорологических средств измерений	98
Б. Л. Кожевников. Поправочные коэффициенты к межповерочным интервалам метеорологических средств измерений	122
Л. И. Довбета, В. В. Лячнев, Н. П. Фатеев. О применении понятия «косвенные измерения в метеорологии»	128
А. Д. Бондарь, В. А. Кулешов, В. В. Лячнев, Н. П. Фатеев. К вопросу о выборе способа получения парогазовых смесей	134