

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР
ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ
И КОНТРОЛЮ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

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

Выпуск

414

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
И ВОПРОСЫ ПОВЕРКИ
МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ

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

Ленинградский
Гидрометеорологический ин-т
БИБЛИОТЕКА
Л-д 195196 Малоохтинский пр., 98



ЛЕНИНГРАД ГИДРОМЕТЕОИЗДАТ 1978

Статьи сборника посвящены анализу состояния метеорологических измерений, вопросам внедрения локальных поверочных схем и метрологическому исследованию средств измерений. В них рассматриваются также метрологические свойства рабочих и образцовых средств измерений, в частности результаты экспериментальных исследований точностных параметров аспирационных психрометров, приводятся описания некоторых новых приборов и измерительных комплексов.

Сборник предназначен для специалистов, работающих в области обеспечения метеорологических и геофизических измерений, и может быть полезен для лиц, разрабатывающих и эксплуатирующих аппаратуру указанного назначения, аспирантов, преподавателей и студентов вузов, а также преподавателей и учащихся метеорологических техникумов.

The papers of the publication deal with analysis of meteorological measurement state, the problems of introducing local checking diagrams and meteorological study of measuring means and their systems. Some papers treat of the meteorological properties of operative and standard measuring means, in particular the results of experimental studies of aspiration psychrometer accuracy parameters; there are also given descriptions of some new instruments and measuring systems.

The publication is ment for specialists dealing with provision of meteorological and geophysical measurements, it can be useful for specialists developing and operating instruments of the above-indicated purpose, post-graduates, institute workers and students as well as for students and teachers of technical schools.

Н. Н. Фатеев, Б. Л. Кожевников

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

В период 1976—1977 гг. Главной геофизической обсерваторией им. А. И. Воейкова (ГГО) и Госстандартом СССР проводился анализ состояния метеорологических измерений и их метрологического обеспечения в системе Гидрометслужбы. Выполнение этой важной работы было направлено на реализацию решений XXV съезда КПСС по усилению роли стандартизации и метрологии в повышении качества выпускаемой продукции.

В задачу анализа входила подготовка исходных материалов и предложений для решения следующих основных задач метрологического обеспечения, предусмотренных ГОСТ 1.25—76 [3]:

- разработка и осуществление программ метрологического обеспечения по всем видам измерений и направлениям работ, проводимым в Гидрометслужбе;

- установление рациональной номенклатуры измеряемых параметров и оптимальных норм точности измерений;

- создание и внедрение современных методик выполнения измерений, средств измерений, испытаний и поверочной аппаратуры;

- разработка образцовых средств измерений в соответствии с утвержденными эталонами и поверочными схемами;

- внедрение государственных стандартов, разработка отраслевых стандартов, регламентирующих нормы точности измерений, методики выполнения измерений, методы и средства поверки приборов, и составление другой нормативно-технической документации (НТД) метрологического обеспечения разработки, производства и эксплуатации приборов;

- проведение метрологической экспертизы проектов НТД;

- поверка и метрологическая аттестация средств измерений (СИ);

- аттестация методик выполнения измерений;

- ведомственный контроль за производством, состоянием и применением СИ, а также за соблюдением метрологических правил, требований и норм;

- развитие и укрепление ведомственной метрологической службы.

Анализ проводился по всем видам наземных наблюдений, включая наблюдения метеорологические наземные и морские, актинометрические, теплобалансовые и радиолокационные, а также наблюдения за атмосферным электричеством, озоном, атмосферной оптикой и контроль за загрязнением атмосферы. Для проведения анализа использовалась методика, применяемая Госстандартом СССР и обеспечивающая сбор первичной информации для решения указанных задач.

Подготовка исходных материалов на местах выполнялась рабочими группами, состоящими из специалистов УГМС, НИУ ГУГМС и Госстандарта СССР, по 14 установленным формам. Обобщающие справки вместе с исходными материалами по отдельным видам измерений направлялись в базовые организации, где проводился анализ и делались выводы о состоянии каждого вида измерений.

В результате были сформулированы конкретные предложения по улучшению состояния измерений и их метрологического обеспечения, которые вместе с комментариями и составили основу данной статьи.

К анализу было привлечено 60 организаций Гидрометслужбы. Материалы и справки по наземным метеорологическим измерениям были получены от 48 организаций. Уже на предварительных стадиях анализа выяснилась настоятельная необходимость разработки отраслевого стандарта «Метеорология. Наземные средства измерения. Термины и определения», устанавливающего единообразные понятия в метеорологии, метеорологических и геофизических измерениях и обработке результатов измерений. При подготовке проекта такого стандарта следует учесть ГОСТ 16263—70. «ГСИ. Метрология. Термины и определения». Основу проекта могут составлять определения, изложенные в [1]. Анализ показывает, что вся деятельность Гидрометслужбы опирается на систематическую информацию, поступающую от 4000 наземных станций и 7500 постов. Общее число метеорологических элементов и их характеристик, выдаваемых станциями 1-го разряда, достигает 118. Только 45% этой информации определяется с помощью средств измерений (СИ), а при формировании штормовой информации эта цифра не превышает 33%. Остальная информация получается путем визуальных наблюдений. Методы и средства получения основной массы метеорологической информации в последнее время не претерпевали существенных изменений. На сети все еще используются устаревшие СИ и вспомогательное оборудование, качество и надежность которых заставляют желать лучшего. Сводная форма сбора первичных материалов анализа, содержащая сведения о претензиях к качеству, надежности и другим техническим характеристикам наземных СИ, одна из самых обширных. Более одной трети претензий и замечаний относится к приборам для измерения температуры, другую треть составляют замечания по СИ давления и влажности воздуха. Много претензий к ветроизмерительным приборам и автоматическим станциям КРАМС, М-107, М-106М.

Кроме того, управления Гидрометслужбы (УГМС) не обеспечиваются достаточным количеством приборов. По результатам анализа составлены сводные перечни рабочих и образцовых СИ, в которых нуждаются УГМС. К ним относятся термометры ТМ-1, ТМ-2, ТМ-3 (потребность около 4000 шт.), снегомер весовой (около 1000 шт.), термометры ТМ-5, ТМ-6, ТМ-9, ТМ-10 (300—400 шт.), волосной гигрометр МВ-1 (300 шт.) и анеморумбометры (около 450 шт.). Многие УГМС предлагают организовать выпуск и поставить им образцовые малогабаритные аэродинамические трубы, инспекторские манометры абсолютного давления ИМАД-4, шаблоны для проверки флюгера и приемной поверхности осадкомеров.

В связи с этим в проект организационных мероприятий на 1978—1980 гг. были включены предложения по обеспечению НИУ ГУГМС и УГМС недостающими средствами измерений и принятию необходимых мер по повышению качества метеорологических приборов на заводах-изготовителях.

С мест поступило большое количество предложений по переснащению сети новыми средствами измерений. Для повышения качества наземных метеорологических измерений предложено разрабатывать:

- информационно-измерительные системы (ИИС) для метеорологического обеспечения аэропортов;

- блоки измерения метеорологических элементов для контроля качества воздуха в населенных пунктах;

- средства измерения влажности воздуха при положительных и отрицательных температурах;

- полуавтоматические дистанционные средства измерения температуры, атмосферного давления, глубины промерзания почвы, параметров гололедо-изморозевых отложений и твердых осадков;

- средства измерения для косвенного бесконтактного определения интегральных параметров снежного покрова и температуры поверхности снега и почвы;

- средство измерения параметров ветра с векторным осреднением, снабженное сигнализаторами превышения заданных значений и обладающее повышенной устойчивостью к внешним воздействиям.

Эти разработки, учитывая дальнейшие перспективы метеорологической измерительной техники, разумно вести на основе единых правил, норм и требований, чтобы на более позднем этапе можно было включить их в ИИС метеорологических станций. В связи с этим в проект плана мероприятий вместе с предложениями по созданию новых приборов было включено предложение по разработке отраслевого стандарта на систему агрегатных средств метеорологической измерительной техники. Стандарт должен предусматривать функциональную и конструктивную законченность изделий, обеспечить их информационную, энергетическую и конструктивную совместимость, а также унифицировать их выходные параметры в соответствии с требованиями Государственной системы промышленных приборов и средств автоматизации (ГСП).

Одновременно рационально разработать государственный стандарт «Метеорология. Наземные средства измерений. Общие технические требования».

Согласно положениям ГСИ, для обеспечения заданных показателей точности методики выполнения измерений должны быть стандартизованы и аттестованы, т. е. должны быть регламентированы требования к методам и алгоритмам измерений. Это важнейшее мероприятие направлено на повышение качества таких традиционных документов Гидрометслужбы, как наставления гидрометеорологическим станциям и постам. Столь же важным мероприятием является и метрологическая аттестация внутриведомственных нестандартизуемых СИ.

Работы по стандартизации и аттестации методик и средств измерений должны проводиться в соответствии с ГОСТ 8.10—72, ГОСТ 8.11—72, ГОСТ 8.7—77 и другими нормативными документами, регламентирующими точность выполнения измерений. Следует отметить, что в метеорологических измерениях погрешности методик измерений складываются из погрешности СИ (включая динамическую погрешность) и погрешности метода, последняя больше известна как «погрешность неопределенности» [2]. Эта погрешность определяется принятыми масштабами дискретности измерений и изменчивостью природного процесса в пространстве и во времени. Наличие дисперсии неопределенности не позволяет измерять метеорологические величины со средней квадратической погрешностью, меньшей чем погрешность неопределенности. Таким образом, нормирование точности измерений и последующая стандартизация методик измерений оказываются возможными только после проведения специальных научно-исследовательских работ по изучению метеорологических полей и их характеристик, проводимых с учетом особенностей отдельных задач, поставленных перед Гидрометслужбой народным хозяйством. Проведение таких работ, установление норм точности измерений, стандартизация и аттестация методик измерения наиболее важных метеорологических параметров должны быть запланированы на ближайшие 5—10 лет.

Другим не менее важным шагом по метрологическому обеспечению наземных наблюдений является внедрение локальных поверочных схем для таких основных метеорологических параметров, как атмосферное давление, температура и влажность воздуха, скорость ветра и др. Эти работы включают в себя переработку методических указаний по поверке в соответствии с требованиями ГОСТ 8.042—72 и внедрение новых видов образцовых средств измерения. Намечено до 1980 г. внедрить подвижные поверочные лаборатории (ППЛ), СИ для поверки приборов, измеряющих влажность воздуха в диапазоне температуры от -30 до $+40^{\circ}\text{C}$, образцовые аэродинамические трубы, термоанемометры, установки для поверки образцовых термоанемометров в диапазоне от 0,3 до 0,5 м/с, инспекторские грузопоршневые манометры и др.

Изучение состояния нормативно-технической документации позволило наметить план ее переработки, составлен перечень СИ,

на которые необходимо разработать методические указания по поверке или аттестации. К ним относятся автоматические метеорологические станции типа М-106М и КРАМСМ, автоматический радиоизмеритель ветра М-42, анемометры М-92, М-61, анемограф М-27С и некоторые другие устройства.

Ряд существующих методических указаний по поверке необходимо переработать и привести в соответствие с ГОСТ 9.042—72: методические указания на психометры МВ-4М, М-34, гигрометр М-19, термометры ТПВ-50, устройства ИВО-1М и РДВ-3, плювиограф П-2 и осадкомеры О-1, М-70, гелиограф ГУ-1 и интегратор Х-603, судовую станцию ГМ-6, дистанционную установку М-49 (М-47), барометры-анероиды М-67, М-98 и на другие приборы.

Признано необходимым внести изменения в государственные стандарты на ручные анемометры ГОСТ 6376—74 и ГОСТ 7192—74 по разделу «Методы испытаний», а также переработать ГОСТ 4863—55 на ртутные барометры и ГОСТ 6353—52 на аспирационные психометры для приведения их к современному уровню.

С целью обоснования межповерочных интервалов проектом плана предусматривается создание методики и организации исследований эксплуатационных свойств наземных СИ.

Анализ материалов, поступивших с мест, выявил существенные недостатки в организации ремонта СИ. Поэтому были внесены предложения по созданию пунктов ремонта особо сложных СИ и ИИС на базе заводов-изготовителей, по расширению сети ремонтных контрольных подразделений и организации планового снабжения монтажно-ремонтных партий и управлений гидрометслужбы (УГМС) запасными частями, укомплектованию Бюро поверок и монтажно-ремонтных партий УГМС подвижными поверочными лабораториями для обслуживания СИ на месте эксплуатации.

Для повышения эффективности работ по метрологическому обеспечению предусматривается приведение структуры метрологических подразделений Главгидрометслужбы в соответствие с типовыми положениями о ведомственных метрологических службах, утвержденных Госстандартом СССР [4].

Значительное место в проекте программы отводится мероприятиям по метрологическому обеспечению актинометрических, атмосферно-электрических, оптических и теплосбалансовых измерений, которые будут рассмотрены в следующих сборниках. В десятой пятилетке намечено также расширение программы международного сотрудничества в рамках СЭВ и ВМО по сличению эталонов и проведению международных сравнений образцовых средств измерений Гидрометслужбы, предназначенных для определения метеорологической дальности видимости, высоты нижней границы облаков, содержания озона и пр.

Выполнение перечисленных мероприятий будет способствовать существенному улучшению состояния наземных метеорологических измерений и их метрологическому обеспечению.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Наблюдения на гидрометеорологической сети СССР. Определение понятий гидрометеорологических элементов и оценка точности наблюдений. Под ред. О. А. Городецкого. Л., Гидрометеоиздат, 1970, 92 с.
2. О составе точности и пространственно-временном разрешении информации, необходимой для гидрометеорологического обеспечения народного хозяйства и службы гидрометеорологических прогнозов. Под ред. М. А. Петросянца, В. Д. Решетова. Л., Гидрометеоиздат, 1957, 219 с.
3. Метрологическое обеспечение. Основные положения. ГОСТ 1.25—76.— В кн.: Государственная система стандартизации. М., изд-во стандартов, 1977, с. 235—246.
4. Типовые положения о ведомственных метрологических службах РДТП 54—75—РДТП 57—75. М., Изд-во стандартов, 1976, 47 с.

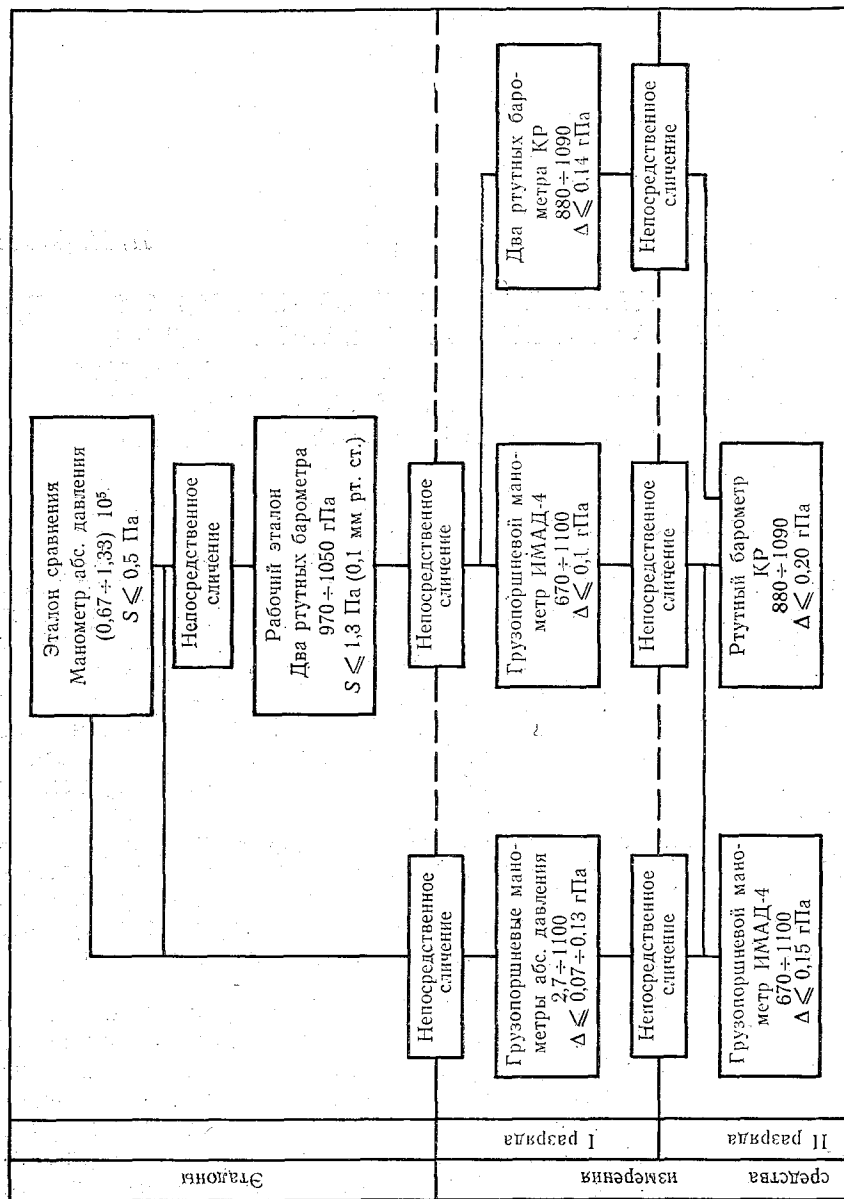
Н. Н. Фатеев

ПЕРЕДАЧА РАЗМЕРОВ ЕДИНИЦ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН И НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ МЕРОПРИЯТИЯ ПО РАЗРАБОТКЕ И ВНЕДРЕНИЮ ЛОКАЛЬНЫХ ПОВЕРОЧНЫХ СХЕМ ГИДРОМЕТСЛУЖБЫ ДЛЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Общесоюзные и локальные поверочные схемы составляют основу метрологического обеспечения измерений. Они устанавливают порядок передачи размеров единиц физических величин от эталонов рабочим средствам измерений с помощью образцовых средств измерений низших разрядов и других средств поверки. Разработка поверочных схем предусмотрена ГОСТ 8.061—73 и должна включаться в программу метрологического обеспечения отрасли. Локальные поверочные схемы разрабатываются при наличии более двух ступеней передачи размера единиц физических величин и должны соответствовать общесоюзным схемам. Одновременно с разработкой поверочной схемы утверждается план мероприятий по ее внедрению. В плане мероприятий предусматривается обеспеченность схемы необходимыми образцовыми средствами, аттестованным поверочным оборудованием, нормативной документацией по поверке, а также рассматривается подготовленность метрологических служб и состояние надзора за средствами измерений.

В настоящее время утверждены и приняты к внедрению в Гидрометслужбе разработанные в ГГО локальные поверочные схемы для средств измерения основных метеорологических величин: атмосферного давления, температуры и скорости ветра. По сравнению с ранее предложенными вариантами [1] они частично изменены и дополнены в соответствии с требованиями внедренных за последние годы технических условий и ГОСТов, а также результатами метрологических исследований и разработок образцовой аппаратуры, проведенными при участии ВНИИМ им. Д. И. Менделеева [2, 5].

Локальная поверочная схема для средств измерения давления (рис. 1) соответствует ГОСТ 8.223—76



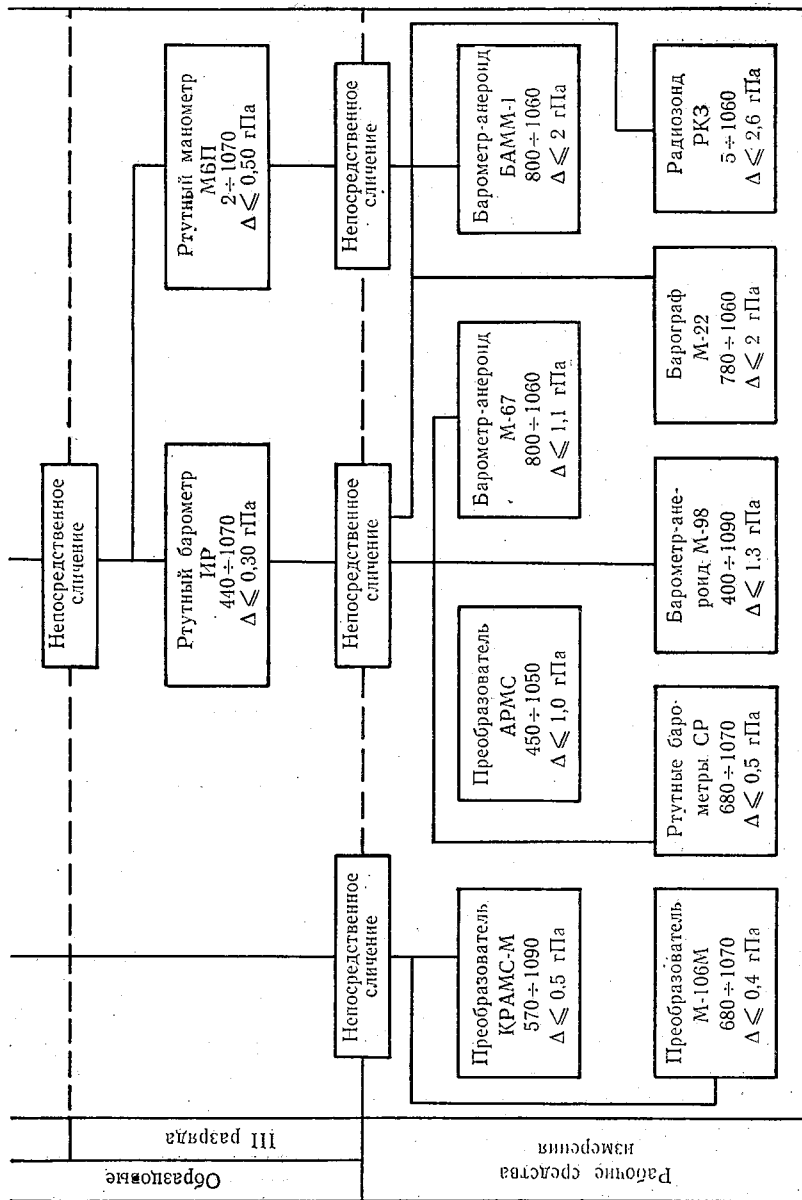


Рис. 1. Локальная поверочная схема для средств измерения атмосферного давления.

«ГСИ. Государственный специальный эталон и общесоюзная поверочная схема для средств измерения абсолютных давлений в диапазоне (от 2,7 до 4000) · 10² Па». Во главе схемы находится рабочий эталон, включающий в себя два специальных ртутных барометра № 3 и 4, которые хранятся в Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова (ГГО). Рабочий эталон, сличается с эталоном сравнения Госстандарта СССР — переносным грузопоршневым манометром абсолютного давления ВНИИМ, имеющим диапазон измерения от 670 до 1300 гПа, погрешность $S \leq 0,5$ Па. Погрешность рабочего эталона (среднее квадратическое отклонение результата измерений) составляет $S \leq 1,3$ Па (0,01 мм рт. ст.), неисключенная систематическая погрешность $\Theta \leq 1,3$ Па. Рабочий эталон применяется для поверки переносных образцовых манометров и барометров I разряда методом непосредственного сличения. В качестве образцовых средств измерений I разряда применяются два ртутных барометра ГГО типа КР, обеспечивающие предел допускаемой абсолютной погрешности $\Delta \leq 0,14$ гПа, инспекторские грузопоршневые манометры Госстандарта ИМАД-4М с погрешностью 0,1 гПа и грузопоршневые манометры абсолютного давления с диапазоном от 2,7 до 1100 гПа и погрешностью $\Delta \leq 0,07 \div 0,13$ гПа (МАД-3М, МПА-15 и др. с соответствующими метрологическими характеристиками), которые хранятся в ГГО, в пунктах ремонта барометров и в кустовых Бюро поверки УГМС.

Образцовые средства измерений (СИ) I разряда применяются для поверки образцовых СИ II и III разрядов и рабочих СИ с диапазоном от 400 до 1090 гПа и пределом допускаемой абсолютной погрешности $\Delta \leq 0,40 \div 1,3$ гПа методом непосредственного сличения в барокамере.

К образцовым средствам измерений II разряда относятся ртутные барометры КР, хранящиеся в Бюро поверки (БП) УГМС и ГМО, имеют предел допускаемой абсолютной погрешности $\Delta \leq 0,2$ гПа; инспекторские грузопоршневые манометры ИМАД-4М с диапазоном измерения от 670 до 1100 гПа и погрешностью $\Delta \leq 0,15$ гПа, применяемые для поверки измерительных преобразователей УАТГМС-ММ и КРАМС на месте эксплуатации с помощью подвижных поверочных метеорологических лабораторий [4], количество которых будет определяться по числу ППМЛ при БП УГМС, выполняющих поверку автоматических метеорологических станций (АМС). До выпуска манометров ИМАД-4М поверка преобразователей АМС производится по образцовым грузопоршневым манометрам I разряда, а на месте эксплуатации АМС — по барометрам КР II разряда. Инспекторские манометры ИМАД-4М II разряда поверяются в органах Госстандарта СССР.

Передача размера единицы давления от рабочего эталона к образцовому барометру УГМС должна осуществляться через инспекторский манометр абсолютного давления ИМАД-4М I разряда, с которым сличается основной барометр УГМС типа КР II разряда. При отсутствии ИМАД-4М основной барометр УГМС II разряда сличается с двумя образцовыми барометрами ГГО типа КР

I разряда. Для повышения надежности хранения единицы давления в УГМС одновременно сличается и рабочий барометр УГМС того же типа. Сличение основного и рабочего барометров в УГМС с двумя образцовыми барометрами ГГО I разряда производится через образцовый барометр-посредник типа КР II разряда, хранящийся в ГГО. Для обеспечения надежности передачи размера единицы давления сличения производятся по следующей схеме:

- проводится одновременное сличение с барометром-посредником основного и рабочего барометров УГМС на месте. При каждом сличении должно быть не менее 10 пар отсчетов;

- одновременно с барометром-посредником в ГГО представляются копии свидетельств о поверке на все барометры, участвовавшие в сравнении, и материалы проведенных сличений перед выездом;

- проводится сличение барометра-посредника УГМС с образцовыми барометрами КР I разряда в Ленинграде (10 пар отсчетов);

- по возвращении в УГМС вновь проводится сличение барометра-посредника с основным и рабочим барометрами КР II разряда (10 пар отсчетов).

Материалы сличения высылаются в ГГО для анализа и оформления свидетельства о поверке. Если в результате поверки расхождение между барометрами ГГО I разряда и основным барометром УГМС II разряда превышает 0,2 гПа, то принимаются меры к устранению дефектов барометров и производятся повторные сличения.

В качестве образцовых средств измерений III разряда БП УГМС применяются инспекторские ртутные барометры типа ИР с погрешностью $\Delta \leq 0,3$ гПа, сличаемые непосредственно с барометрами КР до и после инспекции, и ртутные манометры МБП с диапазоном измерений от 0,2 до 1070 гПа и $\Delta \leq 0,5$ гПа. Манометры МБП хранятся в БП УГМС и сличаются непосредственно с образцовым грузопоршневым манометром I разряда при первичной поверке (после ремонта) и с барометром КР при периодической поверке на месте эксплуатации. При использовании манометров МБП в качестве образцовых средств измерений на аэрологических станциях допускается их периодическая поверка на местах эксплуатации сличением с образцовым барометром III разряда ИР. Образцовые СИ III разряда предназначены для поверки рабочих СИ с диапазоном измерений от 5 до 1060 гПа и пределом допускаемой погрешности Δ от 0,4 до 1,3 и от 2 до 2,6 гПа методом непосредственного сличения или сличения в барокамере.

В качестве рабочих средств измерений в Гидрометслужбе применяются ртутные и деформационные измерительные преобразователи со следующими допускаемыми погрешностями:

СИ	гПа
Автоматические метеорологические станции:	
УАТГМС-4М (М-106)	0,4
КРАМС	0,5
АРМС (М-107)	1,0
Ртутные барометры СР	0,5

Барометры-анероиды:

МД-49-2 (М-67)	1,1
МД-49-А (М-98)	1,3
БАММ-1	2,0
Радиозонды (преобразователь давления)	2,6

Соотношение погрешностей образцовых и рабочих СИ при одном и том же значении давления должно быть не более 1:3 при поверке деформационных СИ и не более 1:1,5 при поверке ртутных СИ давления.

Все СИ поверяются в соответствии с нормативно-технической документацией, утвержденной в установленном порядке.

Для обеспечения локальной поверочной схемы для СИ давления в последние годы были выполнены исследования по нормированию метрологических характеристик ртутных барометров и манометров [3], проведены их госиспытания, переработана нормативная документация по поверке на образцовые и рабочие СИ, начато оснащение БП УГМС новыми образцовыми СИ (МПА-15, МАД-3М и др.), а также ведется подготовка соответствующих специалистов. В ближайшие годы предполагается изготовить и аттестовать партию инспекторских грузопоршневых манометров ИМАД-4М, провести аттестацию поверочного оборудования в БП УГМС и закончить переработку нормативной документации по поверке СИ в соответствии с ГОСТ 8.042—72.

Большие работы выполняются по периодической аттестации образцовых барометров УГМС в соответствии с утвержденными сроками их поверки, а также подготовке кадров поверителей. Ведутся разработки новых измерительных преобразователей давления деформационного типа с улучшенными метрологическими характеристиками. Будут проведены госиспытания преобразователей давления для автоматических станций и другие СИ.

Локальная поверочная схема для средств измерения температуры [1] соответствует общесоюзным поверочным схемам для средств измерения температуры ГОСТ 8.082—73 и ГОСТ 8.083—73.

В качестве исходного образцового средства измерения температуры в системе Гидрометслужбы служит образцовый платиновый термометр сопротивления ПТС-10 I разряда, поверяемый в органах Госстандарта СССР по трем реперным точкам: —182,962, 0 и 100°C. Среднее квадратическое отклонение результатов измерения термометром S в этих точках соответственно равно $\pm 0,020$, $\pm 0,003$, $\pm 0,005^\circ\text{C}$.

Посредством образцового термометра I разряда производится поверка образцовых платиновых термометров II разряда по реперным точкам и поверка образцовых ртутных термометров III разряда в жидкостных термостатах. Образцовые платиновые термометры I разряда хранятся в ГГО и в органах Госстандарта СССР. Образцовые платиновые термометры II разряда применяются для поверки образцовых спиртовых термометров и рабочих

термометров сопротивления с абсолютной погрешностью от $\pm 0,2$ до $\pm 0,8^\circ\text{C}$. Они могут поверяться в ГГО им. А. И. Воейкова или в органах Государственной метрологической службы по двум реперным точкам 0 и 100°C . При этом предел допускаемой погрешности платиновых термометров II разряда в диапазоне от -75 до $+100^\circ\text{C}$ составляет $\Delta \leq 0,03^\circ\text{C}$. Образцовые ртутные и спиртовые термометры III разряда выпускаются по ТУ 35-138—61 и применяются для поверки по шкале рабочих ртутных и спиртовых термометров в диапазоне от -75 до $+80^\circ\text{C}$. Предел допускаемой абсолютной погрешности для образцовых ртутных термометров $\Delta \leq 0,03^\circ\text{C}$ и спиртовых $\Delta \leq 0,08^\circ\text{C}$. Эти термометры могут поверяться в ГГО или в органах Государственной метрологической службы.

При поверке ртутных и спиртовых термометров в точке 0°C и термографов в БП УГМС могут применяться ртутные стеклянные лабораторные термометры III разряда № 1 и 2 группы 4 тип Б ГОСТ 215—73. Эти термометры поверяются в органах Госстандарта. Предел допускаемой погрешности этих термометров в точке 0°C не превышает $0,02^\circ\text{C}$.

В качестве рабочих средств измерений в Гидрометслужбе применяются термометры: ртутные психрометрические к станционному (ТМ-4) и аспирационному (ТМ-6) психрометрам, почвенно-глубинные (ТМ-10), коленчатые (ТМ-5), к ртутным барометрам (ТМ-11), поверхности почвы (ТМ-3), максимальные (ТМ-1), термометр-пращ (ТМ-8), спиртовые минимальные (ТМ-2) и низкоградусные (ТМ-9), термографы М-16, измерительные преобразователи температуры с медными (М-54, АРМС, ДМС) и платиновыми (КРАМС, УАТГМС-4М) термометрами сопротивления. Пределы допускаемой погрешности Δ рабочих средств измерений определяются ГОСТами и техническими условиями. Поверка рабочих средств измерений производится в соответствии с утвержденной нормативно-технической документацией.

Для обеспечения поверочной схемы в метрологических органах Гидрометслужбы имеется специальное оборудование для поверки термографов и стеклянных жидкостных термометров в точке 0°C . На заводе ГМП, выпускающем термометры, и в БП ГГО имеются образцовые жидкостные термометры и установки для поверки термометров по шкале, а также образцовые платиновые термометры и установки типа УТТ для поверки ПТС в точках 0 и 100°C . Переработана и утверждена нормативно-техническая документация по поверке метеорологических термометров и преобразователей температуры автоматических метеорологических станций.

Планируется оснащение кустовых БП УГМС образцовыми платиновыми термометрами ПТС-10, установками УТТ-6В, термометрами ТЛ-4. Намечено разработать техническую документацию и обеспечить централизованное снабжение БП УГМС необходимым простейшим поверочным оборудованием (термованными для поверки термографов, термокриостатами для поверки термометров сопротивления), провести аттестации этого оборудования.

Локальная поверочная схема для средств измерения скорости воздушного потока, переработанная и дополненная по результатам новых разработок, приведена в [5].

В качестве исходного образцового СИ скорости потока воздуха в Гидрометслужбе применяется напорная трубка I разряда, преобразующая скорость потока V в разность между полным и статическим давлением ΔP .

Скорость потока определяется по формуле:

$$V = K_{\text{тр}} \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}},$$

где $K_{\text{тр}}$ — коэффициент напорной трубки, ρ — плотность воздуха.

Для измерения разности давлений ΔP используются образцовые микроманометры класса точности не хуже 0,02 (например, МКВ-250).

Напорная трубка I разряда с образцовым микроманометром указанного класса точности позволяет измерять скорость воздушного потока в диапазоне 5—60 м/с при относительной погрешности выше 2%.

Поверка образцовой напорной трубки I разряда заключается в определении ее коэффициента $K_{\text{тр}}$ и осуществляется методом косвенного измерения скорости потока в гидродинамической трубе высшей точности, которая хранится во ВНИИМ.

Образцовая напорная трубка I разряда хранится в ГГО — базовой организации метрологической службы Главгидрометслужбы — и применяется для градуировки и поверки образцовых СИ II разряда, а также рабочих СИ повышенной точности.

В качестве образцового СИ II разряда скорости потока в диапазоне от 5 до 60 м/с используются образцовые аэродинамические трубы, в которых скорость потока определяется по перепаду давления ΔP_c с помощью специального отверстия в сопле трубы, соединенного с микроманометром.

Для измерения перепада давления ΔP_c используются микроманометры класса не хуже 0,6 (например, ММН-240).

Образцовое СИ II разряда с измерителем скорости по перепаду давления позволяет воспроизводить и измерять скорость воздушного потока в диапазоне 5—60 м/с с абсолютной погрешностью Δ , не превосходящей $\Delta = (0,25 + 0,02 V)$ м/с, и относительной погрешностью $\delta = (7 \div 2,5) \%$.

Поверка образцового СИ II разряда заключается в определении коэффициента сопла K_c и производится косвенным методом с помощью образцовой напорной трубки I разряда.

В качестве образцового СИ скорости воздушного потока в диапазоне от 0,5 до 7 м/с используется образцовый термоанемометр (ТА) с погрешностью δ от 7 до 5%.

Градуировка и поверка образцового термоанемометра II разряда производится методом непосредственного сличения с образцо-

вой напорной трубкой I разряда в образцовый аэродинамической трубе, имеющей два сопла различных диаметров [5]. Отношения скоростей в этих соплах равно 10. Образцовая напорная трубка устанавливается в сопло меньшего диаметра. Скорость в большом сопле, где устанавливается измерительный преобразователь термоанемометра, определяется по скорости, измеряемой напорной трубкой путем умножения ее на коэффициент, получаемый при аттестации трубы.

Для поверки анемометров МС-13 типа А применяется установка ПО-37 (УПАР-01).

В качестве образцового СИ II разряда для поверки СИ III разряда (установки ПО-37) используется группа ручных анемометров, позволяющая измерять скорость воздушного потока в пределах от 1 до 20 м/с с погрешностью от 12 до 2,5%.

Градуировка и поверка образцовых анемометров (типа А) производится методом непосредственного сличения с образцовой напорной трубкой I разряда в образцовой аэродинамической трубе.

Образцовые СИ II разряда хранятся в метрологических подразделениях Гидрометслужбы и на заводах гидрометеорологических приборов.

В качестве образцового СИ III разряда применяется установка для поверки ручных анемометров ПО-37.

Типы и характеристики применяемых средств измерения указаны в поверочной схеме.

Поверка рабочих средств измерения скорости потока (кроме М-93 и М-25) производится в диапазонах от 0,5 до 7 м/с методом сличения с термоанемометром и от 5 до 60 м/с методом косвенных измерений в образцовой аэродинамической трубе II разряда.

Поверка анемометров М-25 и анеморумбометров М-92 производится методом сличения с образцовой напорной трубкой I разряда и с термоанемометром II разряда при установке их в образцовой аэродинамической трубе.

Поверка анемометров типа А может производиться методом прямого измерения на установке ПО-37.

В диапазоне от 2 до 5 м/с до внедрения термоанемометров допускается для поверки рабочих СИ применение СИ I разряда: напорной трубки типа ТРН-6 с микроанемометром типа МКВ класса точности не хуже 0,02.

Поверка первичных измерительных преобразователей М-63М-1 на месте их эксплуатации производится в соответствии с инструкцией по эксплуатации и методическим указаниям по поверке М-63М-1. В них предусматривается периодическая поэлементная поверка с применением комплекта поверочных приспособлений, позволяющих контролировать отклонение угла установки лопастей винта и момента трения на его оси от нормированных значений этих характеристик.

Проверка значения отклонения угла установки лопастей производится контрольным, имеющим номинальный угол $50^{\circ}10'$.

Поверка контршаблона осуществляется образцовыми СИ, заимствованными из общесоюзной схемы для средств измерений плоского угла (ГОСТ 8.016—75) методом сличения с образцовой мерой 4-го разряда.

Определение величины момента трения осуществляется методом прямого измерения гирей массы $6,3 \pm 0,05$ г на радиус шкива 0,8 см. Поверка гири осуществляется, согласно поверочной схеме (ГОСТ 14636—69), методом сличения на равноплечих весах 4-го разряда с образцовыми гирями 4-го разряда массой 0,05—6 г с погрешностью от ± 1 до ± 9 мг.

Анемографы М-27С могут поверяться с применением образцовой аэродинамической трубы до 60 м/с. Методы поверки этих приборов в диапазоне скоростей от 60 до 90 м/с еще не разработаны.

В целях обеспечения локальной поверочной схемы для средств измерения скорости воздушного потока разработаны и внедряются в практику поверки необходимые образцовые средства измерения (типовая аэродинамическая труба, напорные трубки, комплект поверочных приспособлений) для поверки сетевых анеморумбометров М-63М-1 на месте эксплуатации и других приборов. Проводятся работы по аттестации поверочного оборудования и перерабатывается нормативно-техническая документация по аттестации и поверке образцовых и рабочих средств измерений. Планируется оснащение БПУГМС образцовыми аэродинамическими трубами с диапазоном скоростей 0,5—20 м/с, разработка образцового термоанемометра для комплектации указанных труб, а также изготовление и аттестация образцовой установки для градуировки и аттестации термоанемометров в диапазоне 0,5—7 м/с.

Кроме рассмотренных направлений работ, проводятся разработки и исследования по подготовке к реализации поверочных схем для актинометрических измерений и средств измерения влажности. Основные усилия в области актинометрических измерений сейчас направлены на обоснование точности измерений, погрешностей поверки и выполнения исследований по аттестации исходных образцовых средств измерений. В области метрологического обеспечения СИ влажности воздуха выполняются работы по созданию исходных образцовых СИ [6, 7], а также исследованию и нормированию метрологических характеристик психрометров.

Проводимые мероприятия позволяют обеспечить единство измерений метеорологических измерений и значительно повысить уровень их метрологического обеспечения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фатеев Н. П. Поверочные схемы для метеорологических измерений.—Тр. ГГО, 1973, вып. 313, с. 145—155.
2. Фатеев Н. П., Полухин Г. И., Цвелик В. А. Исследование и аттестация образцовых грузопоршневых манометров абсолютного давления.—Тр. ГГО, 1977, вып. 392, с. 23—28.

3. Фатеев Н. П., Леонова Л. И., Андреев М. А. Метрологические исследования образцовых ртутных манометров и барометров.—Тр. ГГО, 1977, вып. 392, с. 29—35.

4. Фатеев Н. П. Проект Подвижной контрольно-поверочной метеорологической лаборатории для обслуживания автоматизированной сети станций.—Тр. ГГО, 1971, вып. 260, с. 163—167.

5. Фатеев Н. П., Сущинский Б. Л., Кузьмин В. А., Блантер Д. Я. Образцовые средства измерения скорости воздушного потока, их исследование и аттестация.—Тр. ГГО, 1977, вып. 392, с. 3—15.

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

7. Резников Г. П., Фатеев И. П. Воспроизведение и передача размера единицы влажности воздуха при метеорологических измерениях.—Тр. ГГО, вып. 340, 1974, с. 107—117.

Ю. В. Роголев, Н. П. Фатеев

О ВЫБОРЕ ОПТИМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ПРИ ПОВЕРКЕ И МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ АТТЕСТАЦИИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

Достоверные результаты поверки или оценки точности средств измерений (СИ) при метрологической аттестации могут быть получены при правильном выборе образцовых средств измерений, определении оптимального числа поверяемых точек, распределенных по диапазону измерения, и необходимого количества отсчетов в точке с применением рациональной методики обработки результатов и нормирования характеристик точности поверяемого прибора.

Выбору образцовых СИ и определению оптимального соотношения погрешностей образцового и поверяемого СИ посвящен ряд работ [1—4], в которых указано, что при этом требуется конкретный подход в зависимости от назначения поверяемого СИ и условий поверки. Образцовые СИ следует подбирать при соблюдении требований экономичности и необходимой точности поверки. Кроме того, должны быть обеспечены поверка по всему диапазону измерения и определение других метрологических характеристик поверяемого прибора (постоянная времени, чувствительность, спектральные характеристики и др.).

Погрешность образцового СИ ($\Delta_{\text{СИ}}$) указывается в паспорте или в поверочной схеме. Она должна учитываться при поверке. В состав $\Delta_{\text{СИ}}$ входят погрешности систематическая Δ_c и случайная $S(\Delta)$, которые могут находиться между собой в различных соотношениях. Если $\Delta_c \geq S(\Delta)$, то влиянием случайной погрешности можно пренебречь. В результат поверки будут входить систематические погрешности образцового и поверяемого $\Delta_{\text{П}}$ приборов. В случае неправильного выбора ОСИ (занижения его точности) поверку необходимо осуществлять при большем числе точек в диапазоне измерения. При больших значениях Δ_c и $S(\Delta)$ приходится учитывать обе эти величины. Погрешность поверяемого

СИ будет определена с большой достоверностью, если погрешность ОСИ ниже не менее чем на один порядок. Однако соблюдение такого соотношения влечет за собой увеличение затрат на поверку и усложнение самого ОСИ, что не всегда возможно при поверке. Такое соотношение может быть применено в тех случаях, когда требуется провести специальные поверочные работы. Практически оптимальное соотношение погрешностей $\Delta_{\text{ОСИ}}/\Delta_{\text{п}}$ при проведении поверочных операций составляет 1:3 (в ряде случаев допускается и $\Delta_{\text{ОСИ}}:\Delta_{\text{п}}=1:2$). Такой результат позволяет не учитывать погрешность, вносимую ОСИ. Определенная при поверке погрешность поверяемого СИ может быть полностью отнесена к собственной погрешности СИ.

В [1] предлагается методика учета $\Delta_{\text{ОСИ}}$ не в целом, а с разделением на учитываемую и неучитываемую погрешности $\Delta_{\text{ОСИ}}$, причем неучитываемая погрешность должна удовлетворять критерию ничтожных погрешностей, т. е. соответствовать выбранному соотношению $\Delta_{\text{ОСИ}}:\Delta_{\text{п}}=1:3$.

Такая методика позволяет осуществлять произвольный выбор соотношения $\Delta_{\text{ОСИ}}/\Delta_{\text{п}}$ и одновременно расширять технологический допуск для поверяемого СИ в 1,5 раза (в нашем случае это — расширение значения допускаемой погрешности $\Delta_{\text{д}}$). В случае когда погрешность образцового и поверяемого СИ соизмеримы между собой ($\Delta_{\text{ОСИ}} \simeq \Delta_{\text{п}}$), значение $\Delta_{\text{д}}$, определяемое при поверке, может быть вычислено по формуле

$$\Delta_{\text{д}} = \pm \sqrt{\Delta_{\text{д(п)}}^2 - \Delta_{\text{д(ОСИ)}}^2}, \quad (1)$$

где $\Delta_{\text{д(п)}}$ — нормированное в нормативно-технической документации значение предела допускаемой погрешности поверяемого СИ, $\Delta_{\text{д(ОСИ)}}$ — полный учитываемый предел допускаемой погрешности образцового СИ.

Отсюда учитываемая погрешность образцового СИ может быть определена из выражения

$$\delta_{\text{ОСИ(у)}} = \Delta_{\text{д(п)}} \frac{n-k}{1-k}, \quad (2)$$

где n — выбранное соотношение $n = \Delta_{\text{д(ОСИ)}}/\Delta_{\text{д(п)}}$, k — неучитываемая часть погрешности, подчиняющаяся критерию ничтожных погрешностей, т. е. $k \leq 1:3$.

В практике поверки центрального устройства (ЦУ) автоматических метеорологических станций (АМС) обычно учитывается полная погрешность $\Delta_{\text{ОСИ}}$, так как образцовое СИ выбирается таким, чтобы соотношение $\Delta_{\text{ОСИ}}/\Delta_{\text{п}}$ было не менее 1:3. Высокие требования, предъявляемые к погрешности измерения метеорологического параметра каналом АМС в целом, не всегда позволяют увеличить значение $\Delta_{\text{д(п)}}$ при поверке за счет учитываемой и неучитываемой составляющих погрешности $\Delta_{\text{ОСИ}}$. Исходя из этого, такую методику целесообразно использовать при исследованиях АМС по обоснованию методики поверки и выборе образцового СИ.

Достоверность результатов поверки во многом зависит от числа точек поверки n_T (или от интервала между соседними точками Δn_T). Выбор числа точек внутри поверяемого диапазона основывается на учете характера функции распределения составляющих Δ_c и $S(\Delta)$. Например, если характеристика $S(\Delta)$ постоянна во всем диапазоне, то вопрос о выборе n_T решается на основе анализа Δ_c . Это наиболее часто встречается при поверке центральных устройств АМС, которые представляют собой устройства с дискретной выдачей информации и преобладающей составляющей на выходе Δ_c . В [3] показано, что граница максимальной погрешности при определении Δ_c определяется высшей гармоникой ее изменения. Тогда общее число точек поверки в диапазоне измерения определяется по формуле

$$n_T = 2\gamma n, \quad (3)$$

где n — полупериод n -гармоники, γ — количество точек поверки на полупериоде n -гармоники.

В работе [4] рассматривается случай, когда погрешность является нормальной стационарной случайной функцией с нулевым математическим ожиданием. При этом решается задача нахождения условной вероятности выхода погрешности за нормированный предел в промежуточных точках Δn_T при условии, что погрешность в точках поверки находится в нормированных пределах. Такие задачи решаются на основе анализа корреляционных функций, получаемых при обработке результатов экспериментальных данных о погрешностях группы СИ.

В [4] рассмотрен также случай уменьшения предела допускаемой погрешности в поверяемых точках по сравнению с наибольшей допустимой погрешностью.

В работе [5] приводится метод получения оптимального числа точек поверки, основанный на теории спектров, по которой, имея экспериментальную функцию ограниченной длительности T , можно построить амплитудно-частотную характеристику для T . В этом случае, если задано некоторое предельное значение спектральной плотности, можно найти соответствующую ей предельную круговую частоту и предельную ширину спектра F_c , тогда

$$n_T = 2F_c T. \quad (4)$$

Для случая СИ с дискретным представлением информации на выходе для обоснования числа n_T необходимо основываться на анализе закономерностей изменения погрешности в диапазоне измерения. В случае выбора точек поверки при исследовании погрешностей ЦУ определяющее влияние на выбор их оказывает характер измерения Δ_c по диапазону. Например, в [9] показано, что если функция $f(\Delta_c)$ по диапазону неразрывна, то $n_T = 5 \div 6$ при доминирующей Δ_c . Для определения с достаточной степенью приближения значений Δ_c и $S(\Delta)$ по диапазону в целом и для конкретной

поверяемой точки необходимо выбирать число наблюдений в этих точках. На основе теории вероятностей и математической статистики можно рассчитать теоретически количество измерений в поверяемой точке для определения Δ_c и $S(\overset{0}{\Delta})$ в этих точках.

Для расчета количества измерений n в точке поверки при определении Δ_c можно воспользоваться формулой

$$n_{\Delta_c} \geq \frac{L_P^2}{q_\alpha^2}, \quad (5)$$

где L_P — коэффициент доверительной вероятности P , определяемый по формуле

$$2\Phi_0(L_P) = P \quad (6)$$

(здесь $\Phi_0(L_P)$ — функция Лапласа), $q = \frac{\Delta_c}{S(\overset{0}{\Delta})}$ — отношение си-

стематической погрешности СИ в данной точке поверки к случайной. Значения P и q выбираются, исходя из конкретных требований к точности и надежности поверки, при условии, что предельная погрешность оценки Δ_c не превысит значения q_α .

Аналогичные рассуждения применимы и для определения числа измерений при расчете $S(\overset{0}{\Delta})$

$$n_{s(\overset{0}{\Delta})} \geq \frac{L_P^2}{2q_{s(\overset{0}{\Delta})}^2}, \quad (7)$$

где $q_{s(\overset{0}{\Delta})}$ — относительная предельная ошибка оценки $S(\overset{0}{\Delta})$, выраженная в долях параметра $S(\overset{0}{\Delta})$.

Как уже отмечалось, необходимое число измерений зависит от соотношения $\Delta_c/S(\overset{0}{\Delta})$. Рассмотрим эти зависимости. При доминирующей роли Δ_c и относительно малом значении величины $S(\overset{0}{\Delta})$ число измерений в поверяемой точке может быть резко сокращено. Это положение применимо при поверке по диапазону измерения центрального устройства (ЦУ) метеорологических станций, где Δ_c практически единственная составляющая погрешности, обусловленная дискретностью преобразования сигнала в ЦУ. При правильном выборе точек поверки внутри диапазона всегда можно найти участки диапазона, где значение Δ_c будет максимальным и в этом случае достаточно осуществить в 3—4 точках этого участка по 3 измерения.

При доминирующей $S(\overset{0}{\Delta})$ предложено много различных путей для ее уменьшения. Один из них — увеличение числа измерений, второй — повышение точности измерений. Для уменьшения значе-

ния $S(\Delta)$ обычно число измерений n выбирают, пользуясь соотношением

$$S(\Delta)_x = \frac{S(\Delta)}{\sqrt{n}}, \quad (8)$$

где $S(\Delta)_x$ — оценка среднего квадратического отклонения среднего арифметического значения, n — число измерений в точке.

Уменьшение случайной погрешности $S(\Delta)$ целесообразно до некоторого предела, определяемого значением Δ_d , зависящим только от значения Δ_c . При этом необходимо, чтобы доверительный интервал ΔX , определенный с выбранной степенью надежности α , был существенно меньше значения Δ_c , т. е. $\Delta X \leq \Delta_c$. Обычно это соотношение выбирается как $\Delta X \leq \Delta_c/2 \div 3$. Количество измерений в точке поверки при превалирующей $S(\Delta)$ составляющей погрешности определяется по формуле

$$n_{s(\Delta)} = 64 \left(\frac{S(\Delta)}{\theta} \right)^2, \quad (9)$$

где θ — оценка границ суммы неисклученных остатков систематической погрешности.

При выборе количества измерений в точке для оценки $S(\Delta)$ часто используют распределение Фишера [6], сущность которого заключается в определении критерия F , равного отношению большей из сравниваемых дисперсий к меньшей при определенном выбранном уровне значимости табличного значения F_t . При таком подходе к задаче о выборе числа измерений в [6] показано, что в большинстве случаев целесообразно, чтобы количество измерений составляло $n \simeq 7 \div 9$. Приведенный анализ различных подходов при выборе числа измерений в точке показывает, что, увеличивая число измерений до $n \leq 10$, можно устранить влияние случайной погрешности только в случае, если $S(\Delta) \leq 5 \Delta_c$. При больших значениях $S(\Delta)$ для уменьшения случайной погрешности количество измерений существенно возрастает; в этом случае уже требуется менять саму методику измерений.

При нормировании значений Δ_d наиболее важно определение результирующей погрешности (суммирование составляющих погрешности) при многозвенном построении измерительной системы. Применительно к АМС необходимо решать три задачи. Первая из них — суммирование частных погрешностей в любой точке исследуемого диапазона для центрального устройства (ЦУ) и первичного измерительного преобразователя (ПИП) и далее для получения значения Δ_{d_i} . Вторая — нормирование величины $\Delta_d(\text{ЦУ})$ и $\Delta_d(\text{ПИП})$ для всего диапазона по результатам исследования частных

погрешностей Δ_{d_i} в дискретных i -х точках диапазона. Третья — нахождение результирующей погрешности по каналу измерения в целом в статическом и динамическом режимах измерения. Проведенные исследования [7] показывают, что при суммировании частных погрешностей в многозвенной измерительной системе необходимо руководствоваться определенными правилами учета взаимной корреляции составляющих.

Результирующие погрешности на выходе измерительной системы после суммирования по группам имеют слабую корреляцию, рассматриваются как статистически независимые и складываются по правилам суммирования случайных погрешностей методами теории вероятности:

$$D(X) = \sum_{i=1}^n D_i, \quad (10)$$

где D — суммарная дисперсия, D_i — дисперсия отдельных слагаемых суммарной погрешности по всем звеньям канала измерения.

Заменяя дисперсии суммы и отдельных слагаемых среднеквадратическими отклонениями случайных величин $S(\Delta)_i$, можно выражение (10) переписать в виде

$$S(\Delta)_n = \sqrt{\sum_{i=1}^n S(\Delta)_i^2}. \quad (11)$$

В случае сильной корреляционной связи составляющих суммарной погрешности необходимо вводить коэффициент корреляции, тогда суммирование случайных погрешностей осуществляется алгебраически, по формуле

$$\sum_{i=1}^n S(\Delta)_x = S(\Delta)_1 + S(\Delta)_2 + \dots + S(\Delta)_i. \quad (12)$$

В работе [8] показано, что при суммировании погрешностей необходимо учитывать законы распределения составляющих суммарной погрешности, причем каждая из составляющих характеризуется своим распределением. Результирующий закон на выходе канала измерения АМС обычно является композицией законов распределения составляющих и может существенно отличаться от них. В этом случае предлагается вводить энтропийный коэффициент K , который зависит от законов распределения составляющих результирующей погрешности Δ и связан со значением $S(\Delta)$ соотношением

$$\Sigma \Delta = \Sigma K \Sigma S(\Delta). \quad (13)$$

Для статистически независимых случайных значений, учитывая энтропийные составляющие погрешности Δ_i с соответствующими

коэффициентами K_i и $S(\Delta)_i^{(0)}$, результирующая погрешность по любому из каналов измерения АМС на выходе будет иметь вид

$$\begin{aligned}\Sigma \Delta_{\text{д}(K)} &= \sum_{i=1}^n K_i \sum_{i=1}^n S(\Delta)_i^{(0)} = \\ &= \sum_{i=1}^n K_i \sqrt{S(\Delta)_1^{(0)^2} + S(\Delta)_2^{(0)^2} + \dots + S(\Delta)_3^{(0)^2}} = \\ &= \sum_{i=1}^n K_i \sqrt{\left(\frac{\Delta_1}{K_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_2}{K_2}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\Delta_n}{K_n}\right)^2}.\end{aligned}\quad (14)$$

По результатам экспериментальных исследований строятся гистограммы распределения результирующей погрешности на выходе измерительного устройства (или канала АМС), а затем подбирается близкая стандартная аппроксимирующая функция распределения, которая и учитывается при нормировании значения $\Delta_{\text{д}(K)}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Швецкий Б. И., Шрашков А. Я. О выборе соотношения погрешностей поверяемого и образцового приборов.— Автометрия, 1974, № 5, с. 95—97.
2. Фатеев Н. П. Поверочные схемы для метеорологических измерений.— Тр. ГГО, 1973, вып. 313, с. 145—155.
3. Карташева А. Н. Достоверность измерений и критерии качества испытаний приборов. М., Изд-во Комитета стандартов, мер и измерительных приборов, 1967, 159 с.
4. Немировский А. С., Волконский В. А. Выбор числа поверяемых точек на шкале прибора.— Измерительная техника, 1961, № 1, с. 5—10.
5. Иванцов А. И. Основы теории точности измерительных устройств. М., Изд. стандартов, 1972, 212 с.
6. Кудряшова Ж. Ф., Рабинович С. Г., Резник К. А. Методы обработки результатов наблюдений при измерениях. Тр. ВНИИМ им. Д. И. Менделеева, 1972, вып. 134 (194), с. 8—51.
7. Шендерович И. М. О суммировании погрешностей измерения.— Тр. НИИ ГМП, 1971, вып. 24, с. 60—65.
8. Новицкий П. В. Основы информационной теории измерительных устройств. Л., «Энергия», 1968, 248 с.
9. Вострокнутов Н. Н., Земельман М. А. Выбор поверяемых точек в диапазоне измерения цифровых вольтметров.— Измерительная техника, 1972, № 10, с. 44—50.

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

О СЛУЧАЙНЫХ ПОГРЕШНОСТЯХ ПОВЕРКИ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АКТИНОМЕТРОВ

Поверка актинометров производится посредством сличения их показаний с показаниями пиргелиометра или образцового актинометра. При поверке определяют чувствительность актинометра или переводный множитель актинометра в паре с гальванометром. Поверка по образцовому актинометру может производиться в естественных условиях и в лаборатории.

Передача единицы измерения прямой солнечной радиации от эталона к рабочему актинометру осуществляется путем ряда последовательных сличений показаний образцовых приборов. Переводный множитель рабочего актинометра включает в себя случайные погрешности поверки всех образцовых приборов, примененных на последовательных этапах сличения. До настоящего времени термоэлектрический актинометр М-3 в паре с гальванометром ГСА-1 используется не только как рабочий прибор, но и как образцовый, поскольку пиргелиометры изготавливаются в очень ограниченном количестве. Экспериментальная оценка случайных погрешностей поверки актинометров с гальванометрами ГСА-1 проводилась ранее [1, 2].

В настоящее время на сеть актинометрических станций начали поступать новые гальванометры ГСА-1-МА. Кроме того, при измерениях радиации все чаще используют потенциометр постоянного тока ПП-63, класса точности 0,05, который обеспечивает более высокую точность измерения термотока актинометра, чем гальванометр ГСА-1.

В связи с этим в отделе метрологии ГГО были проведены экспериментальные исследования, позволяющие оценить случайные погрешности поверки актинометров М-3, используемых с потенциометрами ПП-63 и гальванометрами ГСА-1-МА. Для оценки погрешностей были проведены многократные поверки актинометров в лаборатории на установке ПО-4 и в естественных условиях. Последние проводились в Карадагской обсерватории в 1976 и в 1977 гг.

В лабораторных условиях определялась чувствительность актинометров. Измерение э. д. с. термобатареи осуществлялось по потенциометру ПП-63 для образцового и поверяемых актинометров.

В естественных условиях был проведен ряд серий сличений показаний актинометров с показаниями образцовых приборов в различных сочетаниях. В качестве образцовых применялись: 1) пиргелиометры типа М-59 с круглым приемным отверстием, 2) актинометры с потенциометром ПП-63 и 3) актинометры с гальванометрами типа ГСА-1-МА. Поверяемые актинометры подключались к потенциометру ПП-63 для определения чувствительности актинометра и к гальванометрам ГСА-1-МА для определения переводных множителей. При измерениях по гальванометрам они устанавливались на горизонтальной площадке.

Сличение показаний актинометров с показаниями образцовых приборов проводилось сериями, каждая из которых состояла из трех отсчетов для лабораторных условий и из десяти отсчетов при поверке по Солнцу. По полученным данным для каждого актинометра вычислялось значение чувствительности или переводного множителя, среднее для серии и затем среднее из всех серий.

Случайная погрешность поверки для каждого актинометра, характеризующая погрешность значений, полученных по одной серии сличений, оценивалась по среднему квадратическому отклонению от среднего значения, полученного по отдельным сериям. Затем вычислялось среднее квадратическое отклонение, среднее для данной группы приборов [3].

Полученные средние за все серии значения чувствительности K , переводных множителей a , а также средние квадратические отклонения σ для каждого из актинометров приведены в табл. 1—6. Чувствительность выражена в $\text{мВ/кал} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{мин}^{-1}$, переводный множитель — в $\text{кал} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{мин}^{-1}$ на 1 деление шкалы, σ — в процентах от измеренного значения. Во всех таблицах (кроме табл. 2) средние значения чувствительности и переводного множителя определены из десяти серий.

Поверка актинометров в естественных условиях проводилась при радиации $0,7\text{—}1,3 \text{ кал} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{мин}^{-1}$. Мутность атмосферы, характеризуемая произведением mT оптической массы атмосферы m на фактор мутности Линке T , была в пределах от 3 до 8. Температура воздуха колебалась от 20 до 30°C. Ввиду небольших изменений температуры и малых значений температурных коэффициентов приборов [4] при обработке материала температурные поправки не вводились.

В табл. 1 приведены результаты определения в лабораторных условиях чувствительности для одиннадцати актинометров. Сличение проводилось с двумя образцовыми актинометрами № 392 и 87, предварительно поверенными по пиргелиометру. Поверяемые и образцовые актинометры подключались к потенциометру ПП-63. Среднее по всем приборам среднее квадратическое отклонение

Таблица 1

№ поверяемого прибора	№ образцового прибора			
	392		87	
	K	$\sigma\%$	K	$\sigma\%$
87	5,86	0,32	—	—
383	6,79	0,51	6,77	0,41
4097	6,53	0,68	6,52	0,89
5231	6,77	0,38	6,74	0,38
57	5,82	0,67	5,80	0,71
2551	4,80	0,51	4,78	0,38
2530	7,19	0,37	7,16	0,37
20	5,33	0,31	5,32	0,38
4506	6,32	0,32	6,29	0,33
467	6,50	0,41	6,47	0,44
392	—	—	7,11	0,31
Среднее		0,47		0,48

значения чувствительности, полученное по одной серии сличений, составляет 0,48%.

В табл. 2 приведены результаты определения чувствительности восьми актинометров, подключенных к потенциометру при сличении их с пиргелиометрами № 14 и 15. Из табл. 2 следует, что при проведении n серий сличений среднее квадратическое отклонение, среднее по всем актинометрам, составляет 0,38%.

Таблица 2

№ акти- нометра	n	K	$\sigma\%$	№ акти- нометра	n	K	$\sigma\%$
392	31	7,13	0,36	87	10	5,86	0,26
20	19	5,33	0,28	383	11	6,92	0,45
2530	19	7,19	0,46	57	18	5,81	0,36
467	10	6,50	0,49	4097	11	6,56	0,24

В табл. 3 приведены результаты определения в естественных условиях чувствительности семи актинометров, подключенных к потенциометру. В качестве образцового прибора использовались также актинометры (№ 392 и 2530) с потенциометрами. Среднее квадратическое отклонение, среднее по всем актинометрам, составляет 0,27%.

Таким образом, случайная погрешность при сличении актинометра с потенциометрами между собой несколько меньше, чем при сличении их с пиргелиометрами. Возможно, что большая погрешность при сличении с пиргелиометром должна быть отнесена за счет влияния изменения мутности атмосферы вследствие неоди-

Таблица 3

№ поверяемого прибора	№ образцового прибора			
	392		2530	
	K	$\sigma\%$	K	$\sigma\%$
2530	7,18	0,27	—	—
383	6,92	0,34	6,90	0,25
467	6,50	0,25	6,51	0,11
57	5,80	0,23	5,80	0,22
87	5,84	0,26	5,85	0,16
20	5,34	0,22	5,35	0,45
4097	6,54	0,26	6,54	0,34

накового распределения чувствительности по приемникам актинометра и пиргелиометра, а также за счет разной инерции приборов.

В табл. 4 приведены результаты определения переводных множителей восьми актинометров с гальванометрами № 240, 251, 279 при сличении с пиргелиометром № 14. При сличении с пиргелиометром этой группы актинометров температура воздуха была в пределах 25—30°C. Среднее по всем приборам среднее квадратическое отклонение составляет 0,71%.

Таблица 4

	№ актинометра (гальванометра)				
	392 (240)	392 (251)	87 (279)	87 (240)	2530 (240)
a	0,0145	0,0144	0,0185	0,0171	0,0140
σ^0/σ	0,46	0,66	0,51	0,73	0,75

	№ актинометра (гальванометра)				
	5231 (279)	57 (251)	467 (240)	4506 (279)	383 (251)
a	0,0158	0,0169	0,0159	0,0167	0,0196
σ^0/σ	0,82	0,99	0,59	0,66	0,79

В табл. 5 приведены результаты определения переводных множителей десяти актинометров с гальванометрами при сличении их с двумя образцовыми актинометрами (№ 392 и 87), которые подключались к потенциометру. Температура воздуха в период сличения была 21—27°C. Среднее по всем приборам среднее квадратическое отклонение составляет 0,48%.

В табл. 6 приведены результаты определения переводных множителей актинометров с гальванометрами при использовании

Таблица 5

№ поверяе- мого прибора	№ образцового прибора			
	392		87	
	a	$\sigma\%$	a	$\sigma\%$
57/251	0,0169	0,44	0,0169	0,44
383/251	0,0145	0,40	0,0145	0,56
20/251	0,0191	0,24	0,0191	0,17
2530/240	0,0140	0,41	0,0140	0,66
467/240	0,0158	0,48	0,0158	0,48
4360/251	0,0154	0,58	0,0154	0,52
5231/279	0,0159	0,47	0,0158	0,63
4506/279	0,0167	0,49	0,0167	0,45
2551/279	0,0215	0,47	0,0215	0,38
4097/279	0,0159	0,42	0,0159	0,59
Среднее		0,45		0,51

Таблица 6

№ поверяе- мого прибора	№ образцового прибора							
	392/240		392/251		87/279		87/240	
	a	$\sigma\%$	a	$\sigma\%$	a	$\sigma\%$	a	$\sigma\%$
57/251	0,0169	0,62			0,0170	0,83		
383/251	0,0145	0,56			0,0145	0,73		
2530/240			0,0141	0,71	0,0141	0,58		
467/240			0,0159	0,70	0,0159	0,81		
5231/270			0,0159	0,47			0,0158	0,42
4506/279			0,0168	0,53			0,0166	0,49
87/279	0,0184	0,60	0,0185	0,48				
87/240			0,0172	0,34				

Таблица 7

Образцовый прибор	Поверяемый прибор	$\sigma\%$
Пиргелиометр	Определение чувствительности актинометра с потенциомет- ром	0,4
Актинометр с потенциометром в естественных условиях		0,3
Актинометр с потенциометром в лаборатории		0,5
Пиргелиометр	Определение переводного мно- жителя актинометра с галь- ванометром	0,7
Актинометр с потенциометром в естественных условиях		0,5
Актинометр с гальванометром в естественных условиях		0,6

в качестве образцовых также актинометров в паре с гальванометрами. Среднее по всем приборам значение среднего квадратического отклонения составляет 0,62%.

Полученные значения средних квадратических отклонений при определении чувствительности актинометра и переводного множителя актинометра в паре с гальванометром, в зависимости от образцового прибора и условий поверки сведены в табл. 7.

Полученные данные, характеризующие случайные погрешности при поверке актинометров, в дальнейшем будут использованы при разработке поверочной схемы для актинометрических приборов.

Проведенные эксперименты показали, что при определении чувствительности актинометров целесообразно применять потенциометр ПП-63 как при поверке в лаборатории, так и в естественных условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Луговская М. А., Покровская И. А. Погрешности поверки термоэлектрических актинометров и пиранометров.— Тр. ГГО, 1956, вып. 61(123), с. 120—134.
2. Клеванцова В. А. Случайные погрешности переводных множителей термоэлектрических актинометров.— Тр. ГГО, 1973, вып. 295, с. 143—149.
3. Долинский Е. Ф. Обработка результатов измерений. М., Изд-во стандартов, 1973, с. 187.
4. Покровская И. А. О зависимости от температуры переводных множителей термоэлектрических актинометров и пиранометров.— Тр. ГГО, 1958, вып. 295, с. 38—41.

Л. К. Веселова, В. А. Клеванцова

ОБ ОЦЕНКЕ МУТНОСТИ АТМОСФЕРЫ ПРИ ПИРГЕЛИОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЯХ

При сличении пиргелиометров необходимо производить оценку мутности атмосферы, так как она влияет на соотношение показаний пиргелиометров с разными угловыми характеристиками. Для этой цели можно пользоваться фактором мутности Линке (T), который рассчитывается по высоте Солнца в момент измерения.

В настоящее время в международной практике при сличении пиргелиометров для характеристики мутности атмосферы принято использовать коэффициенты мутности Ангстрема β и Шюппа B , которые зависят главным образом от ослабления радиации аэрозолем.

Аэрозольная оптическая толщина $\tau_{a\lambda}$ связана с коэффициентами мутности β и B следующими выражениями:

$$\tau_{a\lambda} = B(2\lambda)^{-\alpha} \quad \text{и} \quad \tau_{a\lambda} = \beta\lambda^{-\alpha} \frac{1}{\lg e}, \quad (1)$$

где α — коэффициент, характеризующий аэрозольное ослабление, связанный с размерами рассеивающих частиц, λ — длина волны.

Параметр β численно равен значению аэрозольной оптической толщины на длине волны, равной 1 мкм. Параметр Шюппа B численно равен значению аэрозольной оптической толщины, отнесенной к длине волны 0,5 мкм.

Для расчетов коэффициентов мутности α и B используют спектральные измерения радиации актинометрами либо со стеклянными, либо с интерференционными светофильтрами, или же данные фотометров Фольца.

Как показало сличение приборов разных типов [1], для оперативных оценок мутности невозможно использовать актинометр со стеклянными фильтрами из-за больших ошибок измерений. Лучшие результаты получились при использовании актинометра Линке—Фейснера с набором интерференционных светофильтров. Однако для определения значений β и B по этому прибору требуется длительная обработка результатов измерений, вследствие

чего для получения экспресс-информации этот метод не годится.

С целью отработки более оперативной методики определения β и B , пригодной для использования при сличении пиргелиометров, были проведены спектральные измерения радиации двумя актинометрами Линке—Фейснера с комплектами интерференционных светофильтров, принадлежащими ГГО и ЛГУ. Предварительно спектральные кривые пропускания светофильтров были проконтролированы на спектрофотометре. В необходимых случаях интерференционные светофильтры дополнены стеклянными для исключения паразитных максимумов. При этом длины волн λ нм, соответствующие максимумам пропускания применявшихся светофильтров ГГО и ЛГУ, составляли:

ЛГУ . . .	351	378	403	423	447	500	549	679	747	803	1007
ГГО . . .	352	375	404	456	503	555	672	746	798	998	—

Измерение плотности потоков радиации, прошедшей через интерференционные светофильтры, производилось с помощью фотокомпенсационных микровольтмикроамперметров постоянного тока Ф-116/1.

Синхронные измерения по двум приборам проводились на Репетекской песчано-пустынной станции АН ТССР 6—8/X 1976 г. Была получена 51 серия сличений. Аэрозольная оптическая толщина рассчитывалась по каждому из приборов для всех указанных участков спектра, и по каждой серии измерений определялись величины B и β . Методика обработки приведена в [2, 3].

На рис. 1 приведены результаты, полученные по двум синхронным сериям измерений 6 и 8/X с помощью двух приборов с полными комплектами фильтров. Снятое с графика значение τ_a , соответствующее $\lambda=500$ нм, численно равно B . Чтобы получить значение β , надо снятое с графика значение τ_a на $\lambda=1000$ нм умножить на 2,3. При этом оказалось, что часть серий измерений дает более высокое значение B по данным актинометра ГГО, а часть — по актинометру ЛГУ.

Для оценки возможности оперативного определения параметров мутности атмосферы по измерениям с меньшим числом интерференционных светофильтров было проведено сравнение значений β и B , полученных по двум приборам при использовании полного комплекта фильтров, и была оценена погрешность полученных значений. Затем рассматривались погрешности определения тех же характеристик мутности при определении их по четырем и по одному светофильтру ($\lambda=500$ нм в комплекте ЛГУ и $\lambda=503$ нм в комплекте ГГО).

В табл. 1 приведены средние расхождения, выраженные в процентах, в значениях B и β , полученных по приборам ЛГУ и ГГО, при определении их по измерениям с полным комплектом светофильтров, а также расхождение в значениях B при определении их по измерениям только по одному светофильтру ($\lambda=500$ нм

в приборе ЛГУ и $\lambda=503$ нм в приборе ГГО), средние квадратические отклонения σ значений, полученных по одной серии, и число серий измерений n .

Характеристики мутности	Таблица 1	
	$B_{\text{ЛГУ}} - B_{\text{ГГО}}$	$B_{500} - B_{503}$
	$B_{\text{ср}}$	$B_{\text{ср}}$
Средние значения, %	+6	+3
$\sigma\%$	22	17
n	51	51

В период проведения сличений прозрачность атмосферы была высокой. Фактор мутности Линке менялся от 2,9 до 2,0. Средние

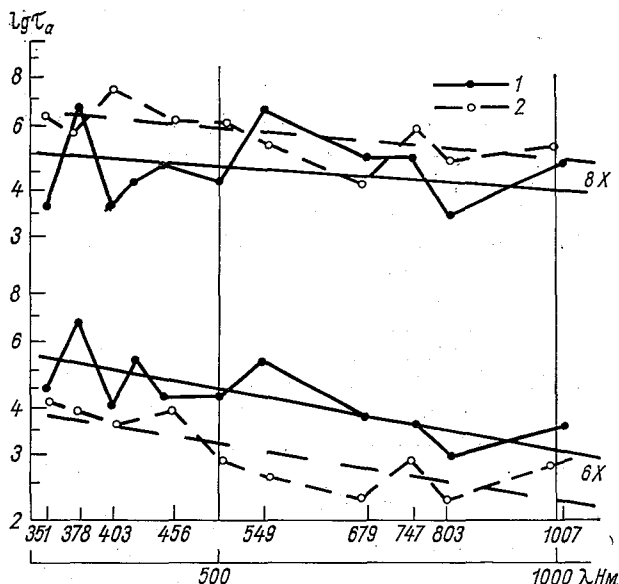


Рис. 1. Зависимость аэрозольной оптической плотности атмосферы τ_a от длины волны λ в логарифмических координатах.

1 — τ_a , рассчитанное по прибору ГГО, 2 — то же по прибору ЛГУ.

величины коэффициента мутности B составили $6/X$ 0,039, $7/X$ 0,045 и $8/X$ 0,052. При высокой прозрачности, наблюдавшейся в Репетеке, относительная погрешность определения оптических толщин велика вследствие их малых значений [4].

По каждому из сличаемых приборов были также определены коэффициенты мутности β_1 и B_1 по четырем светофильтрам, взятым в крайних участках диапазона измерений (по актинометру ЛГУ светофильтры 378, 403, 1007 нм, по актинометру ГГО светофильтры 375, 404, 798, 998 нм). Отметим, что выбор фильтров $\lambda=375$, 378 не всегда удачен; в частности, в условиях пустыни

на этих длинах волн может отмечаться поглощение радиации на частицах аэрозоля, содержащих окислы железа F_2O_3 [5].

В табл. 2 по каждому из приборов приведены средние расхождения в значениях β_1 и B_1 и соответствующих значениях, полученных по полному комплекту фильтров; количество серий, по которым найдено среднее значение и средние квадратические отклонения значений, полученных по одной серии измерений. В табл. 2 приведены также средние квадратические отклонения σ величины B , полученные по одному светофильтру (B_{500} или B_{503}), от значений B , полученных путем осреднения по полному комплекту светофильтров.

Таблица 2

Характеристики мутности	$B - B_1$		$\beta - \beta_1$		$B - B_{500}$	$B - B_{503}$
	B		β		B	B
Актинометр	ЛГУ	ГГО	ЛГУ	ГГО	ЛГУ	ГГО
Средние значения, %	-4	-1	-1	-4	+10	+7
$\sigma/\%$	5	4	2	7	6	7
n	64	66	63	66	51	45

Из сопоставления данных табл. 1 и 2 следует, что различие характеристик мутности, полученных по четырем светофильтрам и по полному комплекту светофильтров данного прибора, меньше, чем разница значений, полученных по двум приборам. Также меньше их средние квадратические отклонения.

Анализ полученных материалов показывает, что для оперативных оценок мутности атмосферы посредством коэффициента мутности Ангстрема β достаточно использовать четыре интерференционных светофильтра, удаленных друг от друга по спектру.

Для определения коэффициента мутности Шюппа B возможно применять один светофильтр с максимумом пропускания, близким к 500 нм. В этом случае величина B_{500} отличается от значения B , определенного по полному комплекту светофильтров, в среднем на 10%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Генихович Е. Л., Говорушкин Л. А., Клеванцова В. А. и др. Результаты сравнения приборов и методов определения характеристик мутности атмосферы.— Тр. ГГО, 1976, вып. 373, с. 122—132.
2. Никитинская Н. И. Применение интерференционных светофильтров для спектральных исследований солнечной радиации.— Тр. ГГО, 1951, вып. 26; с. 126—135.
3. Бартенева О. Д., Никитинская Н. И., Полякова Е. А. О спектральной прозрачности и содержании водяного пара в атмосфере над Памиром.— Тр. ГГО, 1969, вып. 237, с. 3—17.
4. Никитинская Н. И., Бартенева О. Д., Веселова Л. К. Об изменчивости спектральной аэрозольной толщи атмосферы в условиях высокой прозрачности.— Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1973, т. 9, вып. 4, с. 437—442.
5. Кондратьев К. Я., Васильев О. Б., Гришечкин В. С. и др. Спектральные притоки лучистой энергии в тропосфере в диапазоне 0,4—2,4 мкм. Часть II.— Тр. ГГО, 1973, вып. 322, с. 24—35.

Ю. В. Рогалев, Г. И. Тетерев

МЕТОДИКА ПОВЕРКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ, РАБОТАЮЩИХ НА ДЕФОРМАЦИОННОМ ПРИНЦИПЕ

В статье будут рассмотрены методика поверки средств измерения (СИ) атмосферного давления типа БАММ-1, М-67, М-98, а также измерительные преобразователи (ИП) автоматических метеорологических станций КРАМС и М-107, в которых применяются деформационные чувствительные элементы.

Методы поверки этих СИ и выбор образцового оборудования в общем случае определены поверочной схемой [1], устанавливающей порядок передачи размера единицы давления от эталона к образцовым и рабочим СИ. В настоящее время на сети Гидрометслужбы применяются СИ со шкалами, на которые нанесены несколько единиц измерений: в миллибарах, миллиметрах ртутного столба и в паскалях. Для перевода в паскали необходимо пользоваться соотношением: $1 \text{ Па} = 0,007\,500\,62 \text{ мм рт. ст.} = 0,01 \text{ мбар}$, $1 \text{ мм рт. ст.} = 1,3332 \cdot 10^2 \text{ Па} = 1,3332 \text{ гПа}$, $1 \text{ мбар} = 0,750\,062 \text{ мм рт. ст.} = 100 \text{ Па} = 1 \text{ гПа}$.

Для рассматриваемых СИ определение атмосферного давления основано на измерении деформации упругого чувствительного элемента. В этом случае основными источниками погрешности СИ такого типа являются гистерезис (зависящий от химического состава материала, технологии производства и структуры), упругое последствие (зависящее от температуры и линейных размеров чувствительного элемента) и погрешность, обусловленная трением в осях и неточностью изготовления элементов передаточного механизма [2]. Совокупность погрешностей приводит к искажению результатов измерения атмосферного давления на выходе ИП. Путем поверки определяются метрологические характеристики поверяемого СИ и нормируется значение предела допускаемой погрешности Δ_d на выходе ИП. При разработке методики поверки рассматриваемых СИ определялись их основные метрологические характеристики, диапазон измерения, значение температурной поправки ΔP_t и предел допускаемой погрешности Δ_d . Общая

методика (внешний осмотр, подготовка к проведению поверки, условия проведения поверки и т. п.), предусмотренная ГОСТ 8.042—72, здесь не рассматривается.

Выбранный принцип поверки основан на методе непосредственного сличения поверяемого СИ с образцовым манометром в барокамере.

Способы регистрации измеренного значения давления на выходе рассматриваемых СИ различны. Для БАММ-1, М-67 и М-98 отсчет показаний осуществляется непосредственно по шкале. Измеренное значение давления для ИП станции КРАМС регистрируется счетчиком с цифровым выходом в миллибарах, а для ИП станции М-107 преобразуется в последовательность электрических импульсов N с размерностью K ($K=0,5$ мбар), т. е.

$$P_{\text{вых}} = P_0 + NK, \quad (1)$$

где P_0 — нижний предел измеряемого давления ИП, конкретный для определенного места эксплуатации (указан в паспорте).

В соответствии с требованиями поверочной схемы соотношение погрешностей поверяемого и образцового СИ должно быть не менее чем 4:1. Поэтому в качестве образцовых СИ для ИП станций М-107, КРАМС, а также для М-67 и М-98 используются грузопоршневые манометры абсолютного давления типа МАД-3М или МПА-15 с диапазоном измерения от 0 до 4000 гПа и пределом допускаемой погрешности не более 10 Па. Для БАММ-1 в качестве образцового СИ может быть использован ртутный манометр типа МБП с пределом допускаемой погрешности не более ± 50 Па. Для обеспечения поверки по всему диапазону измерения используется единый комплекс оборудования, состоящий из барокамеры с поворотным устройством БК-007, позволяющей создавать давление в диапазоне от 400 до 1090 гПа, и форвакуумного насоса для откачки (нагнетания) воздуха (например, типа ВН-461М) с подключенным к барокамере образцовым СИ. При определении температурной поправки на 1°C целесообразно использовать камеры тепла (холода), например типа КТХБ [3], позволяющие создавать среду с температурой от -25 до $+50^\circ\text{C}$. Для контроля температуры в рабочем объеме барокамеры используются термометры ртутные психрометрические с пределами измерения от -25 до $+50^\circ\text{C}$ и пределом допускаемой погрешности измерения $\pm 0,1^\circ\text{C}$. Образцовые СИ и контрольно-поверочное оборудование должны быть аттестованы в органах государственной или ведомственной метрологических служб и иметь действующее клеймо или свидетельство о поверке. Можно применять другие образцовые СИ и оборудование удовлетворяющее предъявленным требованиям по диапазону и точности и имеющие свидетельство о поверке (аттестации).

В процессе поверки могут возникнуть погрешности поверки Δ_p , которые определяются в основном двумя составляющими: погрешностью, обусловленной применяемым образцовым СИ

$\Delta_{\text{оси}}$), и погрешностью, вызванной неточностью задания давления в камере (или негерметичностью камеры) $\Delta_{\text{к}}$, т. е.

$$\Delta_{\text{п}} = \Delta_{\text{оси}} + \Delta_{\text{к}}. \quad (2)$$

Проведенные в ГГО экспериментальные исследования ИП станции КРАМС показали, что величина $\Delta_{\text{п}} \leq \pm 0,07$ мбар [4] и по сравнению с погрешностью поверяемого СИ ($\Delta_{\text{д}} = \pm 0,5$ мбар) ею можно пренебречь. Сведение к минимуму составляющей $\Delta_{\text{к}}$ достигается обеспечением надлежащей герметичности применяемой барокамеры, что также не представляет особых трудностей. Практически на всех отметках диапазона измерения изменение давления в барокамере не превышает 0,5 мбар/ч. Время для осуществления серии из 10 отсчетов на поверяемой отметке диапазона составляет порядка 5—7 мин, т. е. указанное изменение давления в моменты отсчетов вполне допустимо и не внесет искажений в результаты сличений. Таким образом, результаты сличений (поверки) определяются лишь погрешностью непосредственно самих СИ.

Рассмотрим вопросы определения температурной поправки для рассматриваемых СИ. Основной причиной возникновения температурной погрешности у ИП, имеющих анероидные барокоробки, является изменение модуля упругости материала, из которого изготовлен чувствительный элемент. Изменение модуля упругости зависит от многих факторов, основные из них — температура и давление. Изменение упругости будет увеличиваться с возрастанием измеряемого диапазона давления. Это проявляется в непостоянстве поправки по шкале.

Компенсацию температурной погрешности ИП осуществляют несколькими способами. Например, газовая компенсация, при которой наполняются барокоробки некоторым заранее рассчитанным количеством газа, или так называемая силовая компенсация, при которой используются биметаллические пластины; применяется также введение коэффициентов. Учет влияния различных факторов тем сложнее, чем выше требования к точности и чем больше пределы измерений.

Определение температурной поправки производится при атмосферном давлении и при двух значениях температуры: t_1 и t_2 . Для обеспечения большой точности и надежности определения температурной поправки перепад температур Δt должен быть не менее 25°C .

Для ИП давления станции М-107 определение температурной поправки осуществляется в термобарокамере методом непосредственного сличения при температуре $28\text{—}30^\circ\text{C}$ с изменением давления от нижнего предела через 25 гПа до значения верхнего предела, затем при температуре $-23, -25^\circ\text{C}$. Результаты вычисления температурной поправки оформляются в виде таблицы для различных значений давления. Пример обработки подробно изложен в [5].

Для ИП давления станции КРАМС определение температурной поправки также осуществляется непосредственным сличением с показаниями образцового манометра при атмосферном давлении и при температурах 0—5 и 35—40°C. Среднее значение давления определяется из 10 отсчетов в серии. Величина коэффициента не должна быть более 0,05 гПа/°C. Она постоянна по диапазону измерения и заложена в центральное устройство станции с дальнейшим автоматическим вводом в результат измерения.

Для барометров-анероидов температурная поправка вычисляется через температурный коэффициент K по формуле

$$K = \frac{\Delta P_{t_1} - \Delta P_{t_2}}{\Delta t}, \quad (3)$$

где ΔP_{t_1} и ΔP_{t_2} — разности между значениями давления по образцовому СИ и показаниями поверяемого СИ при температурах t_1 и t_2 , $\Delta t = t_2 - t_1$ — разность температуры в камере тепла (холода).

При определении температурной поправки отсчеты производятся двумя поверителями, причем первый начинает с отсчета по образцовому СИ и заканчивает последним поверяемым СИ, а второй повторяет операции в обратном порядке (табл. 1).

Таблица 1

Основные характеристики, используемые при определении температурной поправки

Поверяемые СИ	Температура среды (°C) при определении K				Число отсчетов при t_1 и t_2	Время выдержки, ч	Допуск на K , гПа/°C
	t_1		t_2				
	от	до	от	до			
ИП КРАМС	0	5	+35	+40	10	2	0,05
ИП М-107	-23	-25	+28	+30	5	2	0,05
М-67	0	+5	+45	+5	2	4	0,11
М-98	-20 (+3)	0 (+5)	+45	+5	2	6	0,13
БАММ-1	0		+35		2	2	0,13

Определение поправки по шкале для барометров-анероидов производится в барокамере путем непосредственного сличения с образцовым манометром в измеряемом диапазоне: для БАММ-1 от 1050 до 800 гПа через 20 гПа, для М-67 от 1053 до 813 гПа через 13 гПа и М-98 от 400 до 1067 гПа через 30 гПа. Стрелки барометров-анероидов устанавливают на атмосферное давление с учетом температурной поправки и размещают их горизонтально в барокамере. Скорость изменения давления на точках сличения не должна превышать 15 гПа/мин. Время выдержки на точках должно быть для БАММ-1 5 мин, для М-67 и М-98 порядка 2 мин

[6]. По полученным результатам строят график шкаловых поправок, которые заносятся в поверочное свидетельство. Изменения шкаловых поправок не должны превышать на каждые 10 делений шкалы для БАММ-1 1 гПа (в диапазоне от 1050 до 1025 гПа) и 0,5 гПа (от 1025 до 825 гПа), для М-67 0,7 гПа (от 840 до 1027 гПа) и 1,3 гПа (в остальном диапазоне), для М-98 на каждые 20 делений шкалы 1,3 гПа (от 1027 до 453 гПа) и 2 гПа (в остальном диапазоне). Разность величины поправки по шкале при понижении и повышении давления (поправка на гистерезис) не должна быть более $\pm 1,3$ гПа.

Определение добавочной поправки (только для барометров-анероидов БАММ-1, М-67 и М-98) производят сличением с образцовым манометром при атмосферном давлении. Показания барометров-анероидов исправляют температурной и шкаловой поправками. Добавочную поправку вычисляют как среднее арифметическое из 10 разностей между значениями атмосферного давления, измеренного по образцовому манометру и исправленными показаниями барометра-анероида. Определение добавочной поправки следует производить не ранее, чем через 24 ч для БАММ-1, 6 ч для М-67 и 4 ч для М-98 после определения шкаловых поправок. Интервал между парными отсчетами должен быть 3 ч. Величина добавочной поправки не должна превышать ± 4 гПа для БАММ-1, ± 3 гПа для М-67 и ± 2 гПа для М-98.

Определение пределов и диапазона измерения осуществляется также в барокамере с подключенным образцовым манометром путем непосредственного сличения с ним на отметках диапазона кратных 20 гПа от нижнего предела до верхнего и обратно. Одна из отметок выбирается при атмосферном давлении. В процессе поверки температура окружающей среды не должна изменяться более чем $0,5^\circ\text{C}/\text{ч}$. Численное значение пределов измерения устанавливается в зависимости от места поставки конкретного ИП и указывается в паспорте.

Вычисление погрешности на выходе ИП (для М-67) производится по формуле

$$\Delta P_{\text{вых}} = P_{\text{пов}} + \Delta_{\text{ш}} + \Delta P_t + \Delta_{\text{д. п}} + P_{\text{оси}}, \quad (4)$$

где $P_{\text{пов}}$ — показания поверяемого СИ, $\Delta_{\text{ш}}$ — поправка шкалы, ΔP_t — температурная поправка, $\Delta_{\text{д. п}}$ — добавочная поправка, $P_{\text{оси}}$ — значение давления по образцовому манометру.

Значение ΔP_t в выражении (4) может быть рассчитано по формуле

$$\Delta P_t = Kt + b(75 - P)(t - 20), \quad (5)$$

где K — температурный коэффициент барометра-анероида, t — температура среды, в которой находится барометр-анероид, P — показание барометра-анероида, b — коэффициент, значение которого указывается в паспорте на прибор. Экспериментальные исследования показали, что для соблюдения значения допускаемой

погрешности для М-98, равной ± 1 мм рт. ст. ($\pm 1,3$ гПа), коэффициент b должен находиться в пределах $0,001 \div 0,005$. Выбор коэффициента определяется обеспечением минимального значения температурной погрешности по формуле (5). Определение b производится непосредственным сличением с образцовым манометром на шести отметках шкалы при температуре -20 и $+50^\circ\text{C}$ с выдержкой на каждой температуре не менее 2 ч. Результаты вычисления b представляются в форме таблицы (табл. 2). Рассмотрим конкретный пример (см. табл. 2). Для показания барометра-анероида 301,2 мм рт. ст. определяем $(B + \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3) - M_0$, т. е. $(301,2 + 0,8 + 0,8) - 297 = 5,8$. Далее в табл. 3 подбираем такое значение $b(75 - P)(t - 20)$, которое больше всех приближается к значению 5,8. В нашем случае это 5,4. Следовательно, значение коэффициента b равно 0,003. Аналогично по данным табл. 3 определяется значение коэффициента b и при температуре $+50^\circ\text{C}$.

Таблица 2

Вспомогательные данные для определения коэффициента

t_6	B	M_0	Δ_1	Δ_2	Δ_3	Δ	B_0	P
-20	301,2	297,0	+0,8	+0,8	0,0	-5,4	297,4	+0,4

Примечание. В таблице приняты следующие обозначения: t_6 — показание термометра при барометре-анероиде, B — показание барометра-анероида, M_0 — давление, определенное по образцовому манометру, Δ_1 — шкаловая поправка, Δ_2 — температурная поправка, определенная по формуле $\Delta_2 = Kt_6$, Δ_3 — добавочная поправка, Δ — значение $b(75 - P)(t - 20)$ из табл. 3, B_0 — исправленное показание барометра-анероида, P — погрешность М-98 после введения всех поправок.

Таблица 3

Значения выражения $b(75 - P)(t - 20)$ для $B = 0,001 \div 0,005$ при температуре -20 и $+50^\circ\text{C}$

P	B					P	B				
	0,001	0,002	0,003	0,004	0,005		0,001	0,002	0,003	0,004	0,005
$t = -20^\circ\text{C}$						$t = +50^\circ\text{C}$					
700	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	700	0,2	0,3	0,4	0,6	0,8
600	0,6	1,2	1,8	2,4	3,0	600	0,4	0,9	1,4	1,9	2,4
500	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	500	0,8	1,5	2,2	3,0	3,8
400	1,4	2,8	4,2	5,6	7,0	400	1,0	2,1	3,2	4,2	5,2
300	1,8	3,6	5,4	7,2	9,0	300	1,4	2,7	4,0	5,4	6,8

Примечание. При подстановке чисел в (5) их следует брать со знаком минус.

Вычисление погрешности на выходе М-98 осуществляется по формуле

$$\Delta P = P_{\pi} - P_{\text{Оси}}, \quad (6)$$

где P_{π} — исправленные показания поверяемого СИ, рассчитываемые по формуле

$$P_{\pi} = P_0 + \Delta_{\text{ш}} + \Delta_{\text{д. п.}} + \Delta P_t. \quad (7)$$

Для ИП станции КРАМС расчет погрешности измерения осуществляется по формуле

$$\Delta P_{\text{вых}} = P_{\text{сч}} - \Delta P_t, \quad \Delta P_t = (t_{\text{уст}} - t_{\text{тек}}) K, \quad (8)$$

где $P_{\text{сч}}$ — показания счетчика ИП, ΔP_t — температурная поправка, $t_{\text{уст}}$ — установочная температура, при которой осуществлялась первичная поверка (приводится в паспорте на ИП), $t_{\text{тек}}$ — температура при проведении текущей поверки, K — температурный коэффициент (приводится в паспорте на ИП).

Проведенные исследования позволили разработать методы поверки указанных выше рабочих средств измерений, которые внедряются в настоящее время в бюро поверок сети УГМС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фатеев Н. П. Поверочные схемы для метеорологических измерений. — Тр. ГГО, 1973, вып. 313, с. 145—155.
2. Карпуша В. Е., Чернов Б. С. Измерение атмосферного давления. Л., Гидрометеиздат, 1973, 275 с.
3. ГОСТ 10370—71. Камеры испытательные тепла и холода, тепла и холода и давления, тепла, холода и влаги. Типы и основные параметры. М., Издательство стандартов, 1973, 5 с.
4. Рогалев Ю. В., Андреев М. А. Анализ результатов поверки преобразователя атмосферного давления автоматической метеостанции в естественных условиях. — Тр. ГГО, 1977, вып. 392, с. 90—93.
5. Автоматическая радиометеорологическая станция М-107. Методы и средства поверки. Л., Гидрометеиздат, 1975, 43 с.
6. Руководство по поверке метеорологических приборов. Л., Гидрометеиздат, 1976, 420 с.

Б. Я. Толетобров, Н. Н. Бердовский

МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКАЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ

Для решения ряда научных и прикладных задач требуется проведение комплексных измерений метеорологических величин. При этом число измеряемых величин может достигать нескольких десятков. Так, например, большое количество первичных преобразователей включают в себя измерительные системы, служащие для определения градиентов метеорологических величин на высотных сооружениях при выполнении структурных измерений на нескольких уровнях, при организации измерений в аэропортах, при проведении судовых комплексных измерений и др. Для этих целей требуется специальная измерительная аппаратура, создание которой требует затраты значительных усилий. Отечественной промышленностью выпускается ряд метеорологических измерительных комплексов [5], однако они предназначены для решения сугубо специальных задач. Из унифицированных измерительных систем широкого назначения следует указать на информационные измерительные системы (ИИС) типа К-200.

В настоящей статье описывается метеорологический комплекс аппаратуры, выполненный на базе ИИС К-200. ИИС К-200 предназначена для автоматического последовательного измерения электрических напряжений постоянного тока от многих источников с представлением результатов измерений на табло цифрового измерительного прибора (ЦИП) и регистрации их на цифрорегистраторе типа ЭУМ-23, перфораторе ПЛ-150 или им подобных. В зависимости от функциональных признаков имеется 11 разновидностей систем. По количеству входных каналов системы подразделяются на две группы. Одна из них рассчитана на подключение до 40 каналов, другая — до 100 каналов.

Указанная система обладает хорошими эксплуатационными качествами, однако непосредственное использование ее для целей метеорологических измерений ограничено рядом причин. Во-первых, в качестве измерительного прибора в ИИС К-200 используется

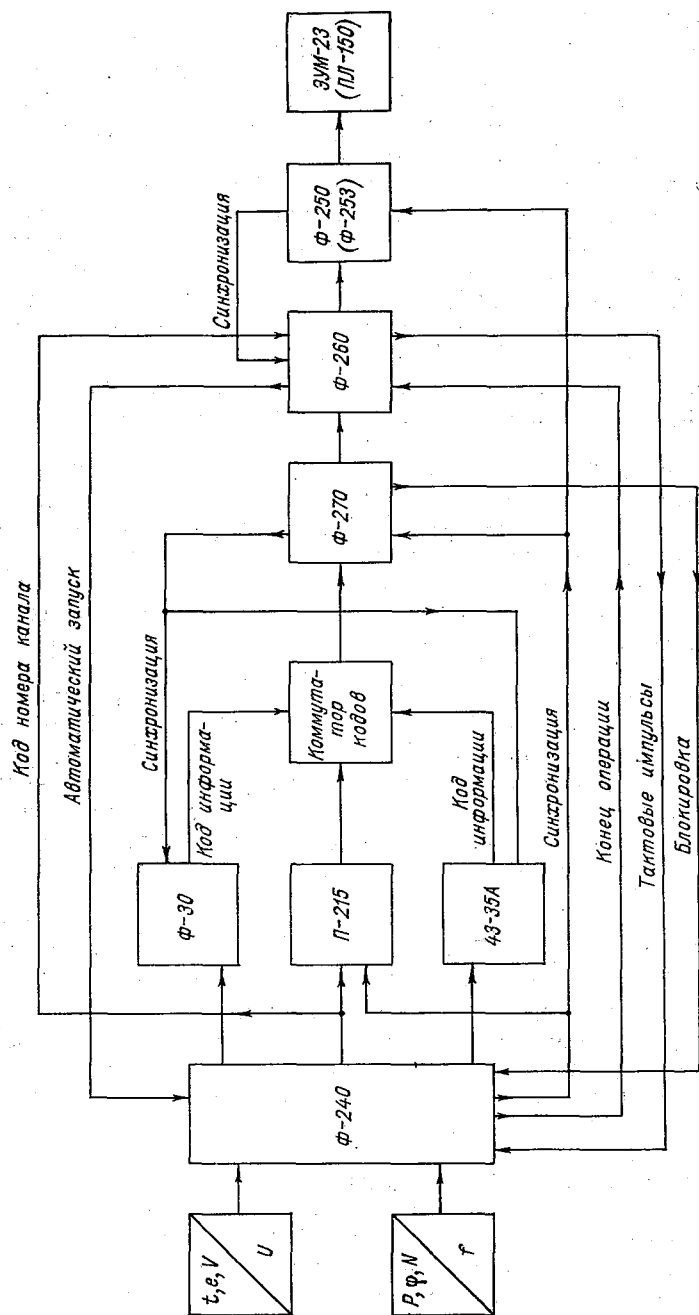


Рис. 1. Структурная схема измерительного комплекса.

цифровой вольтметр (ЦВ) типа Ф-203 класса точности 0,2/0,1. Хотя вольтметр и обладает высоким быстродействием, но точность измерения входных сигналов недостаточна. Для измерения большинства метеорологических величин необходимы вольтметры с классом точности на порядок выше. Во-вторых, ИИС К-200 рассчитана на подключение одного типа преобразователей, выходной величиной которых является напряжение постоянного тока. Что касается первичных преобразователей метеорологических величин, то они отличаются большим разнообразием. Однако при некотором усовершенствовании ИИС К-200 ее можно использовать также в комплекте с другими измерительными приборами. Так, например, при разработке метеорологического измерительного комплекса в состав ИИС К-200 включались цифровой ампервольтметр Ф-30 и цифровой частотомер 43-35А, что позволило расширить его функциональные возможности и измерять ряд дополнительных величин (электрический ток, сопротивление, частоту тока).

Измерительный комплекс предназначен для измерения любых метеорологических величин, первичные преобразователи которых выдают электрические сигналы в виде напряжения постоянного тока и частоты тока. Поскольку наибольшие трудности при измерениях связаны с определением градиентов метеорологических величин, особенно с определением градиентов температуры и влажности воздуха, то данному вопросу и посвящена настоящая статья.

Структурная схема метеорологического измерительного комплекса (рис. 1) отличается от структурной схемы ИИС К-200 тем, что, помимо цифровых приборов Ф-30 и 43-35А, в нее дополнительно введен коммутатор кодов. Кроме того, ввиду недостаточного быстродействия прибора Ф-30 в него дополнительно введена еще схема согласования (на рис. 1 не показана).

В состав метеорологического измерительного комплекса входят следующие блоки: коммутатор аналоговый Ф-30, частотомер 43-35А, дискриминатор П-215, коммутатор кодов, усилитель согласователь Ф-270, устройство сигналов времени (УСВ) Ф-260, транскриптор Ф-250 или устройство управления Ф-253, машина пишущая электроуправляемая ЭУМ-23 или перфоратор ПЛ-150 и комплект первичных измерительных преобразователей (ПИП), подключаемых ко входу коммутатора Ф-240. Устройство управления Ф-253 и перфоратор ПЛ-150 включаются в систему в том случае, если запись измерений печатается на перфоленту.

Измерительный комплекс имеет три режима работы: 1) циклический непрерывный, 2) циклический разовый, 3) адресный. Рассмотрим эти режимы работы подробнее.

При запуске коммутатора на выходе его появляется сигнал «конец операции», который поступает на УСВ Ф-260. При этом разрешается прохождение кода времени на вход транскриптора Ф-250. После регистрации времени сигнал «синхронизация» поступает с транскриптора на Ф-260, при этом:

запрещается прохождение кода времени на транскриптор, разрешается прохождение кода номера канала и кода информации измерительных приборов через УСВ на транскриптор, разрешается прохождение с УСВ на коммутатор Ф-240 тактовых импульсов, которые определяют скорость переключения каналов.

Коммутатор Ф-240 вырабатывает сигнал «синхронизация», который запускает цифровые измерительные приборы Ф-30, 43-35А и транскриптор Ф-250. Начинается измерение входных сигналов и их регистрация вместе с номером соответствующего канала. Коммутатор Ф-240 последовательно подключает измерительные преобразователи ко входу ампервольтметра Ф-30, если с ПИП снимается напряжение (ток или сопротивление) и ко входу 43-35А, если с ПИП снимается частота. Коды информации с Ф-30 и 43-35А поступают на вход коммутатора кодов, которым управляют сигналы, вырабатываемые дискриминатором П-215. В дискриминаторе происходит сравнение кода номера канала, поступающего с коммутатора Ф-240, с предварительно установленными предельными значениями (уставками). Если номер канала находится в ряду от 1 до n (где n — число ПИП, выходной величиной которых является напряжение), то на выходе дискриминатора появляется сигнал, который открывает одну группу ключей коммутатора кодов, разрешая прохождение кода информации с ампервольтметра Ф-30. Если номер канала больше n , то открывается вторая группа ключей и код информации идет с частотомера 43-35А. С коммутатора кодов четырехразрядный двоично-десятичный код положительной полярности поступает на вход усилителя-согласователя Ф-270, где он инвертируется. Затем с выхода усилителя код информации поступает на вход транскриптора, где преобразуется в позиционный двоично-десятичный код, одновременно усиливаясь по мощности. С выхода транскриптора информационные сигналы поступают на цифropечатающее устройство ЭУМ-23. После опроса всех заданных каналов коммутатор Ф-240 автоматически вырабатывает сигнал «конец операции», с приходом которого на УСВ Ф-260 начинается новый цикл работы, если ИИС работает в режиме непрерывном циклическом, и такого сигнала не поступает, если режим работы циклический разовый.

В адресном режиме происходит постоянное измерение и регистрация результата измерения только в одном заданном канале.

Информационная измерительная система удобна для накопления режимной информации. Разновидности систем, в которых запись осуществляется на цифropечатающую машину, частота переключения каналов выбирается из ряда 1, (в случае регистрации не более 5 разрядов печати) 0,1 и 1/60 Гц. Разновидности систем, в которых выходная информация записывается на перфоратор, частота переключения каналов выбирается из ряда 5, 1, 0,1 и 1/60 Гц. Однако подключение ампервольтметра Ф-30 ограничивает верхний предел скорости печати. Интервалы времени

между циклами работы системы выбираются из ряда 5, 10, 30 мин, 1 и 2 ч. В начале каждого нового цикла происходит регистрация времени.

Рассмотрим первичные измерительные приборы, служащие для измерения градиентов температуры и влажности воздуха. Трудности измерения градиентов температуры и влажности воздуха связаны с тем, что из-за малых значений этих величин требуются высокочувствительные приборы. Однако, чем чувствительнее прибор, тем сложнее добиться стабильности его показаний. Было предложено много различных вариантов схем измерителей градиентов температуры и влажности воздуха, направленных на увеличение чувствительности и улучшение стабильности работы [1, 2, 3], но окончательно вопрос нельзя считать разрешенным. Особенно это касается измерения градиентов влажности.

Если считать, что измерение градиентов температуры производится с помощью термометров сопротивления, а измерение градиентов влажности — с помощью электропсихрометров, у которых температура сухого и смоченного термометров определяется также с помощью термометров сопротивления, то основная задача при разработке измерителей градиентов температуры и влажности воздуха сводится к преобразованию термосопротивления в напряжение или ток. Обычно это преобразование осуществляется с помощью мостовых измерительных схем. Несмотря на все их положительные качества, эти преобразователи весьма критичны к внешним условиям. По этим причинам все чаще отказываются от их применения.

При разработке измерителей градиентов влажности возникает дополнительная проблема, связанная с обеспечением надежного смачивания батиста. С этой целью был разработан специальный электропсихрометр [6], который при эксплуатации во многом оправдал себя.

В качестве первичных преобразователей в электропсихрометрах использовались измерительные преобразователи типа ИПТ-1, выполненные из литого никелевого микропровода в стеклянной изоляции с номинальным сопротивлением $R_0 = 10$ кОм (R_0 — сопротивление преобразователя при температуре 0°C). Поскольку сопротивление никелевой проволоки нелинейно зависит от температуры воздуха, то в самой конструкции датчика предусмотрена его линеаризация. Измерительная схема первичного преобразователя состоит из основной и дополнительной частей. Преобразователи ИПТ-1 можно разбить на три группы в зависимости от диапазона измеряемых температур с соответствующим отклонением характеристик от линейной. В случае использования преобразователей в меньшем температурном диапазоне линейность его, естественно, выше.

Структурные схемы, представленные на рис. 2 и 3, показывают, что схемы измерителей температур и их разностей однотипны. Питание измерительных преобразователей осуществляется от двух стабилизированных источников: стабилизатор напряжения (СН)

и стабилизатора тока (СТ). Стабилизатор тока предназначен для работы в пределах колебания температуры, наблюдаемой в рабочих помещениях, и в пределах изменения термосопротивления ИПТ-1 в заданном диапазоне. При этих условиях на

Рис. 2. Структурная схема измерителя температуры.

Резисторы для коррекции: R_1 — тока, протекающего по термосопротивлению; R_2 , R_2' — напряжений V_t и V_0 соответственно.

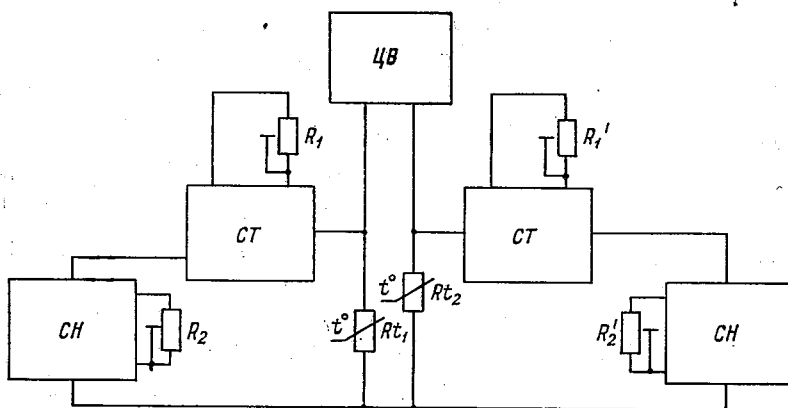
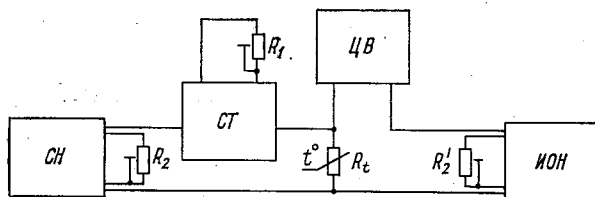


Рис. 3. Структурная схема измерителя градиента температуры.

Резисторы для коррекции: R_1 , R_1' — токов, протекающих по термосопротивлениям R_{t1} и R_{t2} соответственно; R_2 , R_2' — напряжений, подаваемых на R_{t1} и R_{t2} соответственно.

ИПТ-1 происходит изменение напряжения V_t , пропорциональное только изменению термосопротивления R_t :

$$V_t = IR_t. \quad (1)$$

Напряжение V_t сравнивается с опорным $V_0 = IR_0$, в результате чего на выходе схемы появляется разность напряжений, связанная с измеряемой температурой t следующим соотношением:

$$V_t - V_0 = I(R_t - R_0), \quad (2)$$

где $R_t = R_0(1 + \alpha t)$, I — ток термосопротивления. Заметим, что при $R_0 = 10$ кОм, $I = 0,17 \cdot 10^{-3}$ А мощность рассеяния $P \approx 0,3 \cdot 10^{-3}$ Вт, что существенно меньше номинальной мощности рассеяния для данного типа термосопротивлений ($P_{\text{ном}} = 0,5 \cdot 10^{-3}$ Вт). Опорное напряжение снимается со специального источника опорного напряжения (ИОН). Масштаб шкалы измерительного прибора подобран таким, что считываемое значение температуры оказы-

вается равным измеряемому, выраженному в градусах Цельсия. Причем $\Delta V_t = V_t - V_0$ численно равна $0,01^\circ\text{C}$. Таким образом, чувствительность термометров оказалась равной $\frac{dv_t}{dt} = 10 \text{ мВ}/1^\circ\text{C}$. При пределах шкалы 1 В младший знак на цифровом табло ампервольтметра Ф-30 соответствовал $0,01^\circ\text{C}$.

Так как ИПТ-1 все же имеют разброс по температурному коэффициенту сопротивления и по значению R_0 , в описываемой схеме предусмотрены дополнительные регулировки. Крутизна наклона характеристики преобразователя меняется резистором R_1 стабилизатора тока, подстройка по отклонению R_0 от номинального значения осуществляется регулируемым резистором R'_2 источника опорного напряжения.

В измерительном комплексе определенный интерес представляет оценка суммарной погрешности в естественных условиях, выполнение которой без образцовых приборов крайне сложно. Все же такая оценка была произведена при проведении судовых измерений. При этом важное значение имел выбор методики измерения градиентов метеорологических величин. Градиентные измерения можно производить либо подвижными, либо стационарными первичными измерительными преобразователями. Однако при одних и тех же условиях погрешности измерений могут быть разные. На подвижные преобразователи существенное влияние оказывает временной ход измеряемых величин и меньше сказываются систематические погрешности приборов. На неподвижные преобразователи, наоборот, меньше сказывается временной ход и существенное влияние оказывают систематические погрешности. Указанные недостатки при разумном выборе инерции первичного преобразователя, интервала осреднения и частоты снятия отсчетов можно практически исключить, если измерения производить с помощью двух преобразователей: опорного, установленного посредине слоя, и подвижного, перемещаемого между верхней и нижней границами исследуемого слоя атмосферы. Такая методика измерений была использована при испытании градиентного измерительного комплекса. Ранее подобная методика применялась при измерении градиентов температуры в приземном слое атмосферы [7].

Испытания осуществлялись в корабельных условиях в районе Индийского океана в течение четырех месяцев. Перемещение датчиков по высоте осуществлялось с помощью специального подъемного устройства, включающего в себя электролебедку и подвесную «канатную (тросовую) дорогу», по которой перемещался спускаемый за борт приборный контейнер с первичными преобразователями. Измерения проводились в стандартные синоптические сроки на 9 уровнях: 2, 3, 4, 6, 8, 10, 12, 16 и 20 м. Для получения устойчивых значений температуры и влажности воздуха на каждом уровне первичные преобразователи выдерживались по 2,5—3 мин. За это время регистрировалось по 10 отсчетов температуры сухого и смоченного термометров, а также их разностей,

которые затем осреднялись. Поскольку отсчеты температуры снимались до $0,01^{\circ}\text{C}$, точности психрометрических таблиц [4] было недостаточно. Поэтому была разработана комплексная программа обработки градиентных измерений, позволяющая по измеренным значениям температуры сухого и смоченного термометров рассчитывать по приведенным в психрометрических таблицах формулам влажность воздуха, а также определять основные параметры профилей.

Оценка погрешности измерения градиентов температуры и влажности воздуха производилась с учетом, что при условиях, близких к равновесным (градиенты температуры крайне малы), зависимость температуры и влажности от высоты в приводном слое атмосферы подчиняется логарифмическому закону. Тогда отклонение измеренных значений метеорологических величин от логарифмического закона будет характеризовать неувязку измерений, которая носит случайный характер и обусловлена суммарной погрешностью всего измерительного канала, влиянием корпуса судна и отклонением от этого закона, связанного с физическими процессами в атмосфере (нестационарность, горизонтальная неоднородность и т. д.). Таким образом, плотность распределения отклонений значений температуры и влажности воздуха от логарифмического профиля на каждом уровне будет характеризовать максимальную погрешность измерения соответствующих градиентов. Для этого указанные отклонения значений температуры и влажности от логарифмических профилей, построенных с помощью метода наименьших квадратов, вычислялись на ЭВМ. В результате обработки оказалось, что отклонения распределены по нормальному закону со средней квадратичной погрешностью для измерителей температуры $\sigma_t = 0,02^{\circ}\text{C}$, для измерителей влажности $\sigma_e = 0,05$ мбар. Указанные оценки произведены на статистическом материале, включающем в себя более 20 000 измерений каждого параметра, причем сбор материала проводился в течение четырех месяцев. За это время не наблюдалось ни одного выхода аппаратуры из строя. Все это говорит о хороших эксплуатационных качествах данного метеорологического измерительного комплекса аппаратуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Качурин Л. Г. Электрические измерения аэрофизических величин. М., «Высшая школа», 1967, с. 233—245.
2. Качурин Л. Г., Толстобров Б. Я., Ушаков В. М., Ялынычев Н. С. Стационарный автоматический уравновешивающийся термоградиентограф. — Тр. ЛГМИ, 1963, вып. 15, с. 161—170.
3. Кожух В. Я. Автоматическое измерение разности температур. М., «Энергия», 1969, 86 с.
4. Психрометрические таблицы. Л., Гидрометеониздат, 1972, 235 с.
5. Справочник по гидрометеорологическим приборам и установкам. Л., Гидрометеониздат, 1976, с. 249—312.
6. Толстобров Б. Я. Дистанционный электрический психрометр с самовлажнением. Авт. свид. № 537317. — Бюлл. изобр., № 44, 1976.
7. Ялынычев Н. С. Полупроводниковый термоградиентограф (Кочующий термометр). — Труды ЛГМИ, 1966, вып. 21, с. 57—62.

Б. Я. Толстобров

ДИСТАНЦИОННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПСИХРОМЕТР С САМОУВЛАЖНЕНИЕМ

В последние годы много внимания уделяется разработке новых методов измерения влажности воздуха, однако и совершенствование старых методов измерения до сих пор не потеряло своей актуальности. В первую очередь это следует отнести к психрометрическому методу. Психрометрический метод измерения влажности воздуха имеет свою историю. В силу своей практичности он считается одним из основных методов, используемых для сетевых и специальных измерений. Психрометры обладают достаточно высокой точностью и стабильностью показаний, поэтому в ряде случаев они даже включаются в номенклатуру поверочного оборудования.

В связи с автоматизацией метеорологических измерений стали широко разрабатываться электропсихрометры, которые при прочих равных условиях позволяют достичь более высокой точности измерений, чем обычные психрометры. К настоящему времени создано несколько конструкций электропсихрометров [1, 2, 3, 4]. Особенно актуальной стала разработка таких электропсихрометров в связи с унификацией датчиков в системе агрегатированного комплекса метеорологической аппаратуры.

Конструкция любого психрометра в основном определяется системой смачивания батиستا. Из существующих психрометров наиболее удачной считается конструкция психрометра Ассмана, который эксплуатируется во многих странах в течение длительного времени.

Для электрических психрометров основной технической проблемой является обеспечение смачивания батиستا. По принципу смачивания электропсихрометры можно разделить на три группы: 1) с использованием эффекта Пельтье [3], 2) фитильные [1, 2], 3) безфитильные [4].

Электропсихрометры первой группы используются крайне редко из-за технических трудностей, связанных с конденсацией влаги.

В электропсихрометрах второй группы система смачивания бывает с автоматическим поддержанием заданного уровня в стаканчике или без него. В последнем случае в результате испарения уровень воды в стаканчике понижается и приходится регулярно доливать ее. Подобные психрометры не пригодны для непрерывных длительных измерений. Применение резервуаров с большим поперечным сечением делает такие психрометры не достаточно компактными.

В системах смачивания электропсихрометров третьей группы электротермометр с батистом полностью погружают в воду и на время измерения откачивают ее. Такие системы обычно сочетают с системами автоматического долива воды для поддержания ее уровня в заданных пределах. Достоинства этих систем смачивания определяются тем, что при смачивании ткань, которой обернут термометр, между сроками измерений погружена в воду, благодаря чему она меньше загрязняется. Существенно увеличивается автономность системы, отсутствуют погрешности, связанные с потоком тепла по фитилю. Однако этой системе смачивания присущи и существенные недостатки, которые прежде всего заключаются в невозможности непрерывно регистрировать влажность воздуха. Возникают также некоторые трудности использования их в автоматических станциях, поскольку интервал времени от момента смачивания до момента снятия отсчетов в этих станциях должен быть жестко запрограммирован. В действительности же вследствие того, что интенсивность испарения существенно зависит от температуры воздуха и дефицита влажности, время, потребное для принятия термометром установившегося состояния, бывает разным. В диапазоне температур от 0 до 30°C оно меняется примерно 10 раз. Этим регламентируется также и частота измерений. При повторном измерении необходимо повторное погружение термометра в воду с последующей паузой на установление равновесия. При редкой смене батиста периодическое погружение термометра в воду приводит к вымыванию оседаемых на батисте примесей и засолению воды. Наличие капель воды на стенках резервуара после ее откачивания несколько изменяет поле влажности вблизи смоченного термометра.

Электропсихрометры с гидростатической системой смачивания батиста свободны от указанных недостатков. В этих психрометрах смачивание батиста осуществляется непрерывно при помощи фитиля (батист постоянно увлажнен), благодаря чему возможно непрерывное измерение влажности воздуха. Они нуждаются в более частой смене батиста (при непрерывной работе) и точном поддержании постоянного уровня воды в стаканчике. От этого, при прочих равных условиях, зависит величина дополнительной погрешности, обусловленной потоком тепла от смачивающей жидкости к термометру.

Рассмотрим описание одного из вариантов электропсихрометра, разработанного в Ленинградском гидрометеорологическом институте [5] и успешно эксплуатируемого в течение ряда лет. Общий

вид измерительного преобразователя электропсихрометра представлен на рис. 1. В состав его входят сухой 18 и смоченный 6 термометры сопротивления. На смачиваемый термометр надет батистовый чехол, свободный конец которого опущен в стакан 13

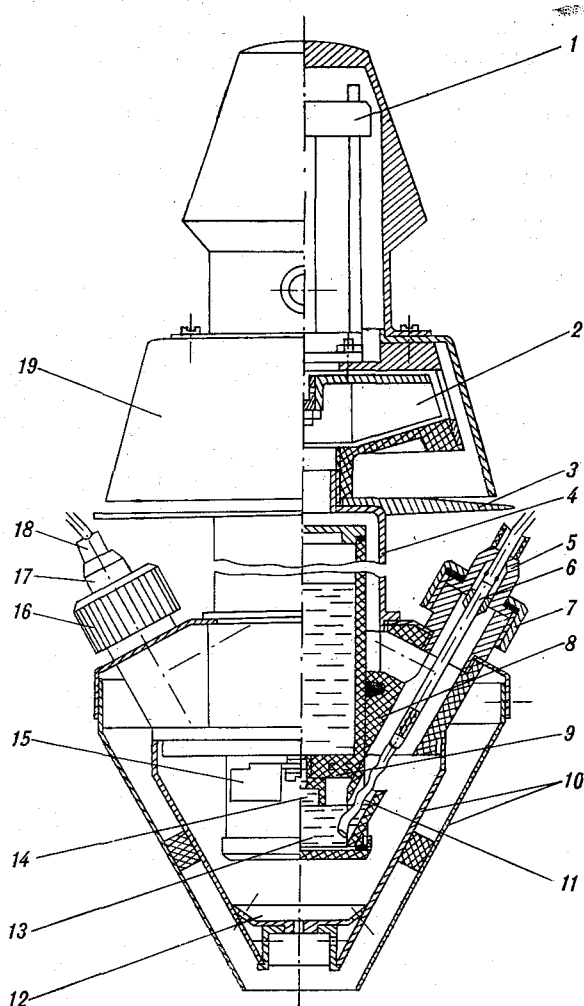


Рис. 1. Общий вид измерительного преобразователя электропсихрометра.

с водой, представляющий собой устройство для смачивания батиста. Термометры сопротивления 6, 18 и стакан 13 закреплены в корпусе 8, выполненном из капралона, обладающего малой теплопроводностью. К корпусу 8 термометры сопротивления 6, 18 крепятся через промежуточные переходники 5 и 17 и фиксируются

неподвижно с помощью накидных гаек 7 и 16. Термометры и устройство для смачивания батиста снабжены двойной противорадиационной защитой 10, которой придана конусообразная форма для увеличения отражения солнечных лучей.

Для непрерывного забора воздуха из окружающего пространства и обдува чувствительных элементов (первичных преобразователей) предусмотрен электровентилятор 1, состоящий из двигателя постоянного тока, на оси которого закреплена крыльчатка 2. Для защиты от ветра и прямого попадания дождя или снега крыльчатка снабжена колпаком 19. Для отражения выбрасываемого вентилятором воздуха, который может исказить естественный фон вблизи него, предусмотрен экранный диск 3.

Корпус датчика сочленен с корпусом вентилятора при помощи соединительной трубы 4 со специальным устройством для смачивания батиста, служащей для воздухопровода. К трубе 4 прикрепляется кронштейн (на чертеже не показан) для крепления преобразователя на мачте.

Устройство для смачивания батиста (стакан 13) выполнено из оргстекла. Перегородка 9 внутри стакана 13 разделяет его внутреннюю полость на две части: верхнюю, для резервной воды, и нижнюю, куда поступает расходная часть воды. Обе емкости соединяются трубкой 14. В нижней части стакана имеется боковое отверстие 11, через которое осуществляется связь с атмосферным воздухом и подача воды к термометру по фитилю, опущенному в него. Стакан 13 снабжен съемным дном, через которое осуществляется наполнение стакана водой. Положение стакана 13 относительно смоченного термометра фиксируется с помощью защелок 15. Существенно, что вся система смачивания находится внутри преобразователя, защищена от нагрева солнечными лучами и обдувается воздухом. При смене батиста отворачивается накидная гайка и термостат сопротивления вынимается из вентиляционной шахты.

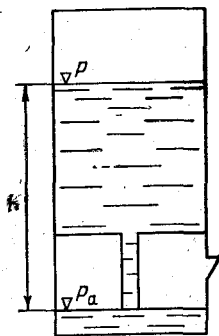
При эксплуатации преобразователя в морских условиях, когда возникает необходимость в защите термометров сопротивления от брызг, предусмотрен дополнительный съемный экран 12, который устанавливается во входном отверстии.

Перед началом измерений необходимо осуществить подготовительные операции, связанные со сменой батиста и наполнением стаканчика водой. Операция смены батиста проста и не требует пояснений. Для наполнения водой устройства для смачивания необходимо снять противорадиационную защиту, освободить защелки и вынуть стакан из корпуса. Через съемное дно стакана наполнить резервный отсек устройства дистиллированной водой. После чего герметически закрыть крышку и снова закрепить его в корпусе преобразователя в вертикальном положении. При этом вода из верхнего отсека начнет перетекать по соединительной трубке в нижний. Этот процесс будет наблюдаться до тех пор, пока уровень жидкости в нижней части стакана не поднимется до нижнего среза соединительной трубки и не перекроет доступ

воздуха в верхнюю его часть. Затем следует включить вентилятор и производить запись показаний.

Когда уровень воды в нижней части стакана упадет на 2—3 мм и воздух через соединительную трубку попадет в верхнюю его часть, снова произойдет пополнение воды. Уровень воды в стакане будет зависеть от изменений температуры воздуха и атмосферного давления. Для оценки этих зависимостей следует воспользоваться функциональной схемой системы смачивания, представленной на рис. 2.

Столб воды высотой h , находящийся в резервном бачке, будет уравниваться разностью давления атмосферного P_a и давления P , оказываемого на поверхность жидкости



$$P_a - P = \rho gh, \quad (1)$$

где ρ — плотность воды, g — ускорение силы тяжести. Из этого соотношения видно, что высота столба воды h будет меняться при изменении как атмосферного давления P_a , так и температуры, влияющей на изменение давления P за счет изменения объема воздуха, находящегося в резервном бачке над жидкостью, и упругости насыщения. Это изменение давления P можно определить из уравнения состояния влажного насыщенного воздуха

Рис. 2. Функциональная схема системы смачивания батиста.

$$P = \rho_{\text{вл}} R_c T + 0,378 \rho_{\text{вл}} R_c T \frac{E}{P}. \quad (2)$$

Здесь $\rho_{\text{вл}}$ — плотность влажного насыщенного воздуха, R_c — удельная газовая постоянная сухого воздуха, T — температура воздуха, E — максимальная упругость водяного пара.

Для получения зависимости уровня воды в стакане от температуры дифференцируем основное уравнение гидростатики

$$\frac{dh}{dT} = - \frac{1}{\rho g} \frac{dP}{dT}. \quad (3)$$

Найдя производную dP/dT из уравнения (2) и подставив ее в уравнение (3), получим

$$\frac{dh}{dT} = \frac{R_c \left[(P_a - \rho gh + 0,378E) (\rho_{\text{овл}} \beta T - \rho_{\text{вл}}) + 0,378 \rho_{\text{вл}} \frac{LE}{kT} \right]}{\rho g (2P_a + 2\rho gh + \rho_{\text{вл}} RT)}, \quad (4)$$

где $\rho_{\text{овл}}$ — плотность влажного насыщенного воздуха при температуре 0°C , β — коэффициент объемного расширения воздуха, L — скрытая теплота парообразования, k — постоянная Больцмана.

Это соотношение позволяет произвести следующую численную оценку:

t	5	10	20	30
$\frac{dh}{dt}$	0,010	0,013	0,020	0,030

Аналогично, если взять производную от h по P_a и пренебречь изменением плотности воздуха, изменение высоты столба от изменения атмосферного давления можно выразить следующим соотношением:

$$\frac{dh}{dP_a} = - \frac{(2P_a - 2\rho gh - \rho_{вл} R_c T)}{\rho g (2P_a + 2\rho gh + \rho_{вл} R_c T)} \cdot \quad (5)$$

Численная оценка, выполненная по соотношению (5), показывает, что изменение высоты столба воды составляет $\sim 0,001$ см/мбар. Таким образом, реакцией давления можно пренебречь.

Анализ расчетов показывает, что при надлежащем выборе соотношений площадей поперечного сечения приемного и резервного бачков колебания уровня воды в стакане могут быть сведены на нет. В действительности эти колебания будут еще меньше, так как в период измерения происходит затрата воды на испарение. Испытания преобразователя проводились в наземных и морских условиях и показали хорошие эксплуатационные качества. Это дает основание рекомендовать его для измерения температуры и влажности воздуха при проведении сетевых и специальных измерений, а также для контроля влажности в гигростатах и промышленных установках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берлинер М. А. Измерения влажности. М., «Энергия», 1973, с. 212—230.
2. Богородский М. М. Морская градиентная установка для изучения полей температуры и влажности воздуха.— Тр. морск. гидрофиз. ин-та, т. XXV. Изд-во АН СССР, М., 1962, с. 57—64.
3. Влажность. Измерение и регулирование в научных исследованиях и технике, т. 1. Принципы и методы измерения влажности в газах. Пер. с англ. Л., Гидрометеониздат, 1967, с. 565.
4. Стернзат М. С. Метеорологические приборы и наблюдения. Л., Гидрометеониздат, 1968, с. 385—386.
5. Толстобров Б. Я. Дистанционный электрический психрометр с самовлаживанием. Авт. свид. № 537317.— Бюлл. изобр., № 44. 1976.

*Л. И. Леонова, Л. А. Ядова, Н. Н. Климин, Н. П. Фатеев,
Г. П. Резников, Б. В. Куров, Т. П. Доманькова*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АСПИРАЦИОННЫХ ПСИХРОМЕТРОВ

Мероприятия, проводимые в настоящее время по обеспечению единства и точности измерений, охватывают и область измерения влажности газов. Уже предварительный анализ состояния измерений в этой области обнаружил несоответствие традиционно применяемых методов и средств измерений влажности газов, в частности воздуха, выработанным и утвержденным стандартным нормам и требованиям [1—6] к порядку проведения метрологических исследований, способов и форм выражения точности измерений. Одним из широко и давно используемых средств измерения влажности воздуха в различных отраслях народного хозяйства и в ряде случаев в Гидрометслужбе являются психометры аспирационные типа М-34 (с электрическим приводом воздушной турбинки) и МВ-4 по ГОСТ 6353—52 (с пружинным приводом), на которые имеются нормативно-техническая документация [7, 8] и таблицы [9] для перевода результатов измерений по «сухому» и «смоченному» термометрам в параметры влажности воздуха. Тем не менее существуют веские основания для проверки нормируемой в настоящее время погрешности психометра и проводимых с его помощью измерений.

Эти основания требуют выяснения следующих вопросов:

- а) насколько точна зависимость упругости насыщения водяного пара от температуры;
- б) насколько точна психометрическая формула;
- в) в какой степени правильно определено значение психометрического коэффициента, входящего в психометрическую формулу;
- г) насколько достоверно определены инструментальные погрешности психометра.

Основное требование, которое предъявляется к ответам на эти вопросы, заключается в высокой степени их надежности. Это может быть достигнуто путем использования теорий с небольшим

количеством приближений, учета большинства влияющих факторов при проведении исследований психрометра, применения образцовой аппаратуры, прошедшей метрологическую аттестацию, корректных методов обработки результатов наблюдений.

Перед ГГО была поставлена задача экспериментальным путем с учетом приведенных требований ответить на вопросы б), г) и по результатам этих исследований дать рекомендации по нормированию точностных характеристик психрометров, определить численные значения этих характеристик и методику контроля производства и эксплуатации психрометров в соответствии с требованиями стандартов.

Теоретические и экспериментальные исследования психрометрического метода измерения влажности продолжают уже свыше 150 лет, начиная с основополагающей работы 1822 г. И. Айвори [10]. Большая концентрация усилий в этом направлении отчасти связана со стремлением принять психрометр в качестве образцового прибора для измерения влажности. Помимо уточнения рабочего уравнения психрометра, непрерывно уточняются и численные значения входящего в него психрометрического коэффициента.

Исторически первой теорией психрометра была конвекционная, одним из создателей которой является Е. Август [11]. Эта теория исходит из бесконечно большой скорости вентиляции V , что избавляет от необходимости устанавливать связь параметров уравнения с реальными значениями скоростей. Следующей явилась диффузионная теория психрометра Дж. Максвелла [12]. В отличие от конвекционной теории она рассматривает процесс диффузии водяного пара от смоченного термометра в неподвижный воздух без учета конвективного теплообмена испаряющей поверхности с окружающей средой. Теория Дж. Арнольда [13] соединила основные положения теории конвекции и теории диффузии. Она использует установленную Прандтлем аналогию между теплопереносом и переносом количества движения в пограничном слое, т. е. основана на подобии процессов тепло- и влагообмена. Теория конвекции является предельным случаем ее, когда $V \rightarrow \infty$, а теория диффузии, когда $V \rightarrow 0$ [13].

Дальнейшее уточнение теории психрометра было выполнено Льюисом [14]. Оно связано с применением критерия (носящего имя его автора), который получается при выводе также, как и психрометрический коэффициент.

В соответствии с рекомендациями ВМО о развитии теории аспирационного психрометра и получении надежного численного значения психрометрического коэффициента на V сессии Комиссии по метеорологическим приборам и методам наблюдений (Париж, 1969 г.) Э. Бернар [15] представил доклад об исследовании, основанном на строгом анализе процессов диффузии и пограничном слое. Для пограничных слоев записываются уравнение неразрывности и три уравнения диффузии: количества движения, теплоты и водяного пара. Из уравнения энергетического баланса для установившегося режима получится психрометрическое уравнение,

включающее термические градиенты (порядка $100 \text{ К} \cdot \text{см}^{-1}$) и градиенты концентрации водяного пара на поверхности раздела воздух—стенка.

Несмотря на различия в подходах к анализу процессов в психрометре, общий вид психрометрического уравнения сохраняется

$$e = E' - AP(t - t'), \quad (1)$$

где e — парциальное давление водяного пара, P — давление воздуха, E' — давление насыщенного водяного пара при температуре смоченного термометра, t — температура воздуха, измеренная по сухому термометру, t' — температура по смоченному термометру, A — психрометрический коэффициент.

Как видно из приведенного краткого обзора теорий психрометра, конечной целью каждой из них является уточнение вида уравнения и численного значения его основного параметра — психрометрического коэффициента. При этом рассуждения проводятся для некоего «теоретического» психрометра. Такая абстракция необходима для получения возможности сопоставления полученных результатов, исключения влияния на них значений краевых условий. Например, смоченный термометр рассматривается в виде бесконечно тонкой неограниченно протяженной пластины, смоченной с двух сторон. При этих условиях теория дает следующее выражение для психрометрического коэффициента [16]:

$$A_T = \frac{c\delta_0}{760\rho_0 L_0} \left(\frac{a_0}{D_0} \right)^n, \quad (2)$$

где c — теплоемкость воздуха, δ — плотность воздуха (δ_0 — при температуре $t=0^\circ\text{C}$), ρ — плотность пара воды при давлении 1 мм рт. ст. и $t=0^\circ\text{C}$, $a_0 = \frac{\lambda}{c\delta}$ — температуропроводность воздуха при $t=0^\circ\text{C}$, λ — коэффициент теплопроводности, L_0 — скрытая теплота испарения (различная для воды и льда), D_0 — коэффициент диффузии пара воды через воздух, h — показатель степени, зависящий от принимаемой теории и учитывающий интенсивность теплообмена.

Как видно из следующей краткой сводки выражений для A_T , полученных разными авторами, они отличаются только значениями n :

n	A_T	Автор, год	Примечание
0	$\frac{c\delta_0}{760\rho_0 L_0} = A_{0T}$	Апзон, 1835	Для слабой вентиляции конвективным током
1	$\frac{c\delta_0}{760\rho_0 L_0} \left(\frac{a_0}{D_0} \right) = A_{0T} \left(\frac{a_0}{D_0} \right)$	Максвелл, 1877	
$1/2$	$A_{0T} \left(\frac{a_0}{D_0} \right)^{1/2}$	Свенссон, 1898	Для сильной вентиляции
$1/3$	$A_{0T} \left(\frac{a_0}{D_0} \right)^{1/3}$	Вебер, 1912	

Формулы Свенссона и Вебера согласуются с формулой Альона с погрешностью 1%, а с формулой Максвелла с погрешностью 4%. Численное значение A_T , полученное расчетным путем по формуле Свенссона ($627 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), почти совпадает с A_T из экспериментальных данных ($625 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$).

Конечные значения конкретных граничных условий при инструментальном воплощении психометрического метода накладывают отпечаток на структуру и численное значение психометрического коэффициента. Это было давно осознано: например, Н. Звонриным [17] была дана формула, учитывающая зависимость психометрического коэффициента от конструктивных параметров психометра и скорости вентиляции:

$$A_n = A_T \left(1 + \frac{\varepsilon}{U_a^\psi} \right), \quad (3)$$

где ε и ψ — параметры, зависящие от конструкции психометра, его размеров и формы термометра, U_a — скорость аспирации.

Как видно из формулы, при увеличении скорости вентиляции психометрический коэффициент конкретного типа приближается по значению к теоретическому.

Зависимость психометрического коэффициента A_n от скорости вентиляции и конструктивных параметров исследовалась и проверялась многими авторами [16—18 и др.]. Из их работ следует, что психометрический коэффициент для психометров с обычно используемыми термометрами очень сильно зависит от скорости вентиляции в пределах ее изменения от 0 до 2,5—2,7 м/с [17], тогда как при значениях больших 2,5—2,7 м/с изменяется незначительно. Однако при использовании термометров весьма малых размеров (например, термоспаев) A_n практически не меняется в диапазоне 0—15 м/с [16].

В работе [19] со ссылкой на [20] приводится таблица, иллюстрирующая связь психометрического коэффициента с формой, размерами смоченного термометра и скоростью вентиляции (табл. 1).

Таблица 1

Скорость вентиляции, м/с	Смоченный термометр					
	ртутный сферический цилиндр				проволочный металличе- ский цилиндр ($d=8$ мм, $l=100$ мм)	
	$d=12$ мм		$d=5,6$ мм			
	теор. [19]	эксп. [19]	теор. [19]	эксп. [18]	теор. [19]	эксп. [19]
$\times 10^{-6} \text{ K}$						
0	900	1310	900	1310	900	1010
0,3	730	1100	730	1000	770	800
1,0	680	880	680	880	710	720
2,0	660	830	660	830	680	670
3,0	650	810	650	810	660	660
5,0	630	790	630	790	650	660

Приведенные в табл. 1 теоретические и экспериментальные данные получены при средней температуре воздуха 18°C и средней психрометрической разности 4,5°C в аэродинамической трубе без радиационной защиты термометров. В качестве образцового прибора использовался гигрометр точки росы.

Как видно из данных табл. 1, экспериментальные значения $A_{\text{п}}$ существенно выше теоретических, но при этом не зависят от диаметра ртутного термометра. При использовании же проволочного термометра сопротивления цилиндрической формы наблюдается хорошее совпадение с теоретическими значениями, особенно при скорости обдува выше 2 м/с. Причина наблюдаемых несоответствий сводится к влиянию теплопритоков по выступающему столбику в случае ртутных термометров. Естественно, что при использовании проволочного термометра кондуктивные теплопритоки через выводы неизмеримо меньше.

Интересно проследить, в какой степени влияет конструкция и размеры аспирационного психрометра на связь психрометрического коэффициента со скоростью вентиляции. Наглядные сведения об этом можно получить из работы Зворыкина [17], в которой была определена зависимость психрометрического коэффициента от скорости аспирации для психрометров двух моделей: большой диаметр резервуара и малой (длина цилиндрического резервуара 10 мм и диаметр 4 мм).

Для психрометра большой и малой моделей зависимости, полученные, по экспериментальным данным, аналитически выражаются соответственно формулами:

$$A_{\text{пб}} = 593,1 + 135 \frac{1}{\sqrt{V}} + \frac{48,0}{V}; \quad (4)$$

$$A_{\text{пм}} = 640,3 + \frac{4,3}{\sqrt{V}} + \frac{51,5}{V}. \quad (5)$$

Из полученных Зворыкиным результатов следует, что для психрометра большой модели психрометрический коэффициент имеет большие значения, чем для малой модели, хотя в пределе при больших скоростях вентиляции они стремятся к одному значению, после которого $A_{\text{пб}}$ становится меньшим $A_{\text{пм}}$.

Классические работы Зворыкина послужили основой для дальнейшего развития теории и практики психрометрии.

Как видно из изложенного, постоянство психрометрического коэффициента можно гарантировать лишь неизменной соответствующей определенному значению скорости потока влажного воздуха относительно резервуара термометра.

Ассманом в 1901 г. [22] и была предложена конструкция аспирационного психрометра, модификацией которого являются М-34 и МВ-4.

Конструктивно он состоит из двух термометров, резервуары которых заключены в двойные трубчатые защиты, соединяющиеся

потом в одну общую трубку, к верхнему концу которой присоединяется центробежный вентилятор. Последний приводился во вращение пружинным (МВ-4) или электрическим (М-34) двигателями.

Формула полученная Шпрунгом (опытным путем) совпадает с психрометрической формулой, а психрометрический коэффициент имеет значение $A = 662,3 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ для скорости аспирации 2 м/с.

Обстоятельно исследуя влияние скорости аспирации на результаты измерения аспирационным психрометром, Ассман [22] пришел к выводу, что увеличение скорости аспирации свыше 2,3 м/с не влияет на показания сухого и смоченного термометров, уменьшение же ее ниже 0,8 м/с приводит к быстрому увеличению погрешности.

Полученные выводы справедливы, когда психрометр находится в спокойном воздухе. При наличии же ветра условия аспирации меняются в зависимости от его скорости. Двойная радиационная защита весьма эффективна при сохранении заданной скорости аспирации. Еще Ассманом было показано, что температура внутренней трубки повышается лишь на $0,1^\circ\text{C}$, если температура внешней трубки за счет воздействия лучистых потоков на 10°C выше температуры воздуха. Попадающая через нижнее отверстие отраженная радиация (при принятых расстояниях нижнего края термометра от нижнего среза трубки) полагается незначительной и не способной оказать влияния на показания термометров.

Влияние выступающего столбика ртути у смоченного термометра рекомендовалось учитывать при точных измерениях.

Иногда высказывается указание на источник погрешности аспирационного психрометра, связанный с неизбежным различием температуры смоченного термометра и внутренней трубки радиационной защиты, вследствие чего возможен радиационный теплообмен, особенно при малых значениях относительной влажности, например, [16].

По-видимому, нагрев смоченного термометра такими радиационными потоками будет зависеть еще и от скорости аспирации, что может привести к более сильной зависимости психрометрического коэффициента от скорости аспирации по сравнению с зависимостью у стационарного психрометра.

Не перечисляя пока всех возможных источников погрешности аспирационного психрометра, отметим, что ряд авторов [24, 25, 27] выполнил экспериментальные исследования аспирационных психрометров (типа М-34), в основном посвященные проверке правильности принятия в психрометрических таблицах [9] значения психрометрического коэффициента, принятого равным $662 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ (т. е. значения, полученного Шпрунгом).

В результате сличения точки росы по одному экземпляру психрометра с гигрометром в работе [24] получено значение $A = 638 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$, которое в работе [25] оказалось равным $631 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ (в обеих работах вводились поправки на выступающий столбик).

Кроме того, в работе [25] расчетным и экспериментальным путем показано, что для случая, когда на батисте не вода, а лед для психрометрического коэффициента следует принимать значение $559 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Скорость аспирации по данным [25] составила 2,5 м/с.

В психрометрических таблицах [9] учтены часть из этих и другие замечания, однако значения психрометрического коэффициента $662 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ для скорости аспирации 2 м/с сохранено.

В качестве рабочей формулы принята формула Ферреля, учитывающая зависимость скрытой теплоты парообразования или сублимации от температуры

$$e = E' - AP(t - t')(1 + 0,00115t'), \quad (6)$$

что освободило от влияния температуры смоченного термометра на значение психрометрического коэффициента.

Казалось бы, что теперь погрешность психрометра зависит только от погрешности прямых измерений, входящих в формулу величин t , t' , P и погрешности ее определения. Однако фактически добавляется еще ряд других погрешностей, трудно оцениваемых количественно. В табл. 2 приводятся источники погрешностей аспирационного психрометра с указанием способов устранения или уменьшения их влияния.

Приведенный в табл. 2 перечень возможных и реальных источников погрешностей психрометра аспирационного был положен в основу программы экспериментального исследования прибора.

Основная задача такого экспериментального исследования — определить погрешности психрометра как средства измерения влажности, основанного на прямых измерениях температуры сухого и смоченного термометров и давления в условиях сведения к минимуму влияния не поддающихся конкретной количественной оценке источников погрешности. При таком определении погрешности должно использоваться более точное средство задания или измерения влажности, а в качестве средства для определения значений относительной влажности по результатам прямых измерений указанных параметров — психрометрические таблицы с принятым в них значением психрометрического коэффициента. Тогда, если характеризовать точностные свойства психрометра математическим ожиданием $\Delta\varphi$ разности между результатами измерения по психрометру φ_{pi} и образцовым средством $\Delta\phi_i$ и средним квадратическим отклонением случайной составляющей психрометра, то можно получить следующие соотношения:

а) $\Delta\varphi_i = \varphi_{pi} - \phi_{oi}$ — частные разности;

б) $\bar{\Delta\varphi} = \frac{1}{n} \sum \Delta\varphi_i$ — среднее арифметическое (n — число измерений). Поскольку систематическая погрешность образцового средства сведена к минимуму, то $\bar{\Delta\varphi}$ характеризует систематическую погрешность психрометра, т. е. $\Delta\varphi = \Delta_{\pi}$;

Таблица 2

Источник	Способ
Неадекватность психрометрической формулы	Развитие теории психрометрического метода
Неадекватность принятого уравнения зависимости давления насыщающего водяного пара от температуры	Уточнение на основе уравнений состояния воздуха
Ошибка в определении действительного нормированного значения психрометрического коэффициента	Развитие теории психрометрического метода, постановка и проведение корректного физического эксперимента по определению коэффициента
Погрешность смоченного термометра	Регулярная поверка термометров. Введение шкаловых поправок
Погрешность сухого термометра	То же
Погрешность измерения давления воздуха	Увеличение точности измерения давления
Выступающий столбик ртути смоченного термометра	Введение поправок на выступающий столбик. Применение термометров с ограниченным числом градусов в выступающем столбике
Отклонение скорости аспирации от принятого значения	Проверка значения скорости аспирации при выпуске и эксплуатации психрометра аспирационного с последующим введением поправки на отклонение или регулировки ее до номинального значения
Влияние скорости ветра	Изучение влияния и при необходимости введение поправки
Нагрев смоченного термометра лучеиспусканием внутреннего цилиндра радиационной защиты	Проверка состояния поверхности внутреннего цилиндра, обращенного к резервуару. При необходимости введение поправочного множителя (особенно при малых значениях относительной влажности)
Нагрев выступающего столбика ртути и термометров лучистыми потоками	Экранирование шкал термометров от внешних лучистых потоков
Различие в степени нагрева (или охлаждения) сухого и смоченного термометров вследствие неидентичности коэффициентов радиационного поглощения (испускания) в направлении осей термометров	Удаление от психрометра тел, не находящихся в термодинамическом равновесии с воздухом, или их экранировка

Источник	Способ
Ошибка в определении фазового состояния (вода—лед) на смоченном термометре (при его отрицательной температуре)	Внимательность и аккуратность при проведении эксперимента по определению фазового состояния. Критический анализ полученного результата измерения
Влияние качества и структуры батиста на характер испарения	Применение только нормированного сорта батиста и проверка его сосущей силы
Загрязнение батиста примесями в воздухе биологического (бактерии) и химического (соли, кислоты, щелочи, поверхностно-активные вещества) происхождения	Установление частоты смены батиста в зависимости от наблюдаемой или предполагаемой степени загрязнения воздуха указанными примесями. Смачивание только дистиллированной водой
Неаккуратная и неединообразная подвязка батиста	Соблюдение требований при подвязке батиста
Неаккуратное смачивание (недостаточное и сопровождающееся попаданием воды на внутреннюю поверхность меньшего цилиндра аспирационной защиты)	Соблюдение правил при смачивании. При дистанционном смачивании контроль за образованием капли на нижнем срезе батистовой обвязки
Неидентичность динамических характеристик сухого и смоченного термометров	Производить измерения влажности, установив частоту отсчетов по термометрам в зависимости от предполагаемой степени изменчивости температуры и влажности во времени
Образование контура циркуляции воздуха от двигателя к резервуару термометров, при которой нагретый электродвигателем воздух подается к термометрам	Выключение электродвигателя аспирационного психрометра в промежутках между отсчетами. Установка экрана между аспирационной головкой и отсчетной частью психрометра при особо ответственных измерениях
Попадание капель воды на сухой термометр при измерениях в тумане	Установка сетчатой защиты перед сухим термометром или покрывание резервуара сухого термометра смесью масел [27]
Ошибки при отсчетах по термометрам психрометра	Соблюдение правил отсчетов и моментов отсчета
Ошибки при пользовании психрометрическими таблицами, в частности при интерполяции и введении поправок	Аккуратность при пользовании таблицами

в) $\delta_i = \Delta\varphi_i - \bar{\Delta\varphi}$ — отклонения среднего значения;

г) $\sigma_{\Delta\varphi}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n \delta_i^2}{n}$ — дисперсия отклонений среднего.

Эта дисперсия зависит от дисперсии измерений образцовым средством σ_0^2 и условий проведения сличений δ_y^2 . Поскольку психрометр и образцовый прибор подвержены разным источникам воздействия, то можно не без оснований считать коэффициент корреляции между их показаниями равным нулю:

$$\sigma_{\Delta\varphi}^2 = \sigma_{\pi}^2 + \sigma_0^2 + \sigma_y^2. \quad (7)$$

Дисперсию результатов за счет условий можно свести к минимуму, если гигротермическое поле в камере достаточно равномерное и скорость изменения температуры и влажности при регулировании существенно меньше постоянных времени психрометра и образцового средства. В результате σ_{π} можно оценить по формуле

$$\sigma_{\pi} = \sqrt{\sigma_{\Delta\varphi}^2 - \sigma_0^2}, \quad (8)$$

в которой $\sigma_{\Delta\varphi}$ получается из эксперимента, а σ_0 известно из нормативно-технической документации на образцовое средство измерения влажности.

Наличие нескольких экземпляров исследуемых психрометров позволит оценить, согласно [1], пределы допускаемых значений систематической погрешности психрометра $\Delta_{\text{сд}}$ и среднего квадратического отклонения случайной составляющей от его погрешности $\sigma_{\pi} \left(\overset{0}{\Delta} \right)$.

Другой путь оценок погрешности состоит в использовании значения психрометрического коэффициента из психрометрической формулы, записанной относительно этого коэффициента, и подстановки в нее результатов прямых измерений температуры сухого и смоченного термометров, давления и влажности по образцовому прибору.

Из формулы Ферреля следует, что

$$A = \frac{E'(t') - e(\tau)}{P(t - t')(1 + 0,00115t')}. \quad (9)$$

Все величины, входящие в формулу (9), могут быть измерены с известной погрешностью, поэтому можно оценить и погрешность экспериментального определения A . Расчетное значение относительной погрешности δ_{A_p} определения A можно получить по формуле

$$\begin{aligned} \delta_{A_p} &= \frac{\Delta A}{A} = \sqrt{\delta_A^2 |_{\Delta t'} + \delta_A^2 |_{\Delta t} + \delta_A^2 |_{\Delta P} + \delta_A^2 |_{\Delta \varphi}} = \\ &= \sqrt{\left(\frac{1}{A} \frac{\partial A}{\partial t'} \Delta t' \right)^2 + \left(\frac{1}{A} \frac{\partial A}{\partial t} \Delta t \right)^2 + \left(\frac{1}{A} \frac{\partial A}{\partial P} \Delta P \right)^2 + \left(\frac{1}{A} \frac{\partial A}{\partial \varphi} \Delta \varphi \right)^2}, \quad (10) \end{aligned}$$

где ΔA — абсолютная погрешность A , а слагаемые под корнем квадратным — составляющие погрешности A , вследствие погрешности измерения температуры по сухому и смоченному термометрам, давления и влажности — по образцовому прибору (в данном случае это ГТР М-116 или К-2Д-75).

Составляющая за счет погрешности измерения давления

$$\delta_A|_P = \frac{1}{A} \frac{\partial A}{\partial P} = -\frac{dP}{P}, \quad (11)$$

т. е.

$$|\delta_A|_P = \frac{\Delta P}{P}. \quad (12)$$

Остальные составляющие принимают весьма сложную аналитическую форму, являясь функциями практически всех аргументов для выражения A . По результатам расчета на ЭВМ эти зависимости для δA представлены в табл. 3.

Таблица 3

$t^{\circ}\text{C}$	$\varphi\%$						
	10	30	50	70	80	90	98
$\delta A _t$ для $\Delta t = 0,1^{\circ}\text{C}$							
10	1,17	1,54	2,23	3,84	5,87	11,98	93,07
20	0,80	1,09	1,61	2,81	4,32	8,89	56,11
30	0,60	0,84	1,25	2,23	3,46	7,14	41,86
40	0,47	0,68	1,04	1,88	2,92	6,07	34,31
$\delta A _{t'}$ для $\Delta t' = 0,1^{\circ}\text{C}$							
10	2,03	2,86	4,38	7,98	12,53	26,44	209,94
20	1,67	2,53	4,12	7,92	12,71	27,31	178,46
30	1,49	2,46	4,31	8,77	14,42	31,57	193,39
40	1,41	2,60	4,89	10,46	17,53	39,00	232,47

Как видно из данных табл. 3, составляющая относительной погрешности определения A при постоянной погрешности измерения, например, температуры анализируемого воздуха $\Delta t = \pm 0,1^{\circ}\text{C}$, зависит как от температуры, так и от относительной влажности. До значения относительной влажности примерно 80% она весьма медленно увеличивается, а выше этого значения резко возрастает, достигая уже около 95% нескольких сотен процентов. Эти результаты содержат практическую рекомендацию для выбора диапазона гигрометрических условий определения A экспериментальным методом.

При наличии сведений о значениях погрешностей величин, входящих в формулу (9), можно найти суммарную расчетную погрешность экспериментального определения A . Эти данные приводятся

в табл. 4 и на рис. 1. Если рассматривать указанные абсолютные погрешности в качестве предельных, то δ_A следует принимать в качестве границ полученных значений в эксперименте.

Таблица 4

$t, ^\circ\text{C}$	$\varphi\%$						
	10	30	50	70	80	90	98
Образцовый прибор ГТР							
10	2,42	3,84	6,77	13,92	23,00	50,51	321,65
20	1,98	3,76	7,35	16,12	27,24	60,86	348,68
30	1,83	4,17	8,88	20,34	34,91	78,72	421,66
40	1,87	5,03	11,33	26,72	56,05	105,43	588,29
Образцовый прибор К-2Д-75							
10	3,15	4,24	6,48	11,45	17,69	35,65	225,95
20	3,44	4,68	7,26	13,09	20,41	42,55	246,49
30	4,20	5,98	9,24	16,95	26,63	55,54	273,99
40	5,47	7,99	12,55	23,29	36,74	77,31	413,94

Очевидно, что рассмотренная оценка δ_A является заниженной. Действительно, если A в самом деле не зависит от условий изме-

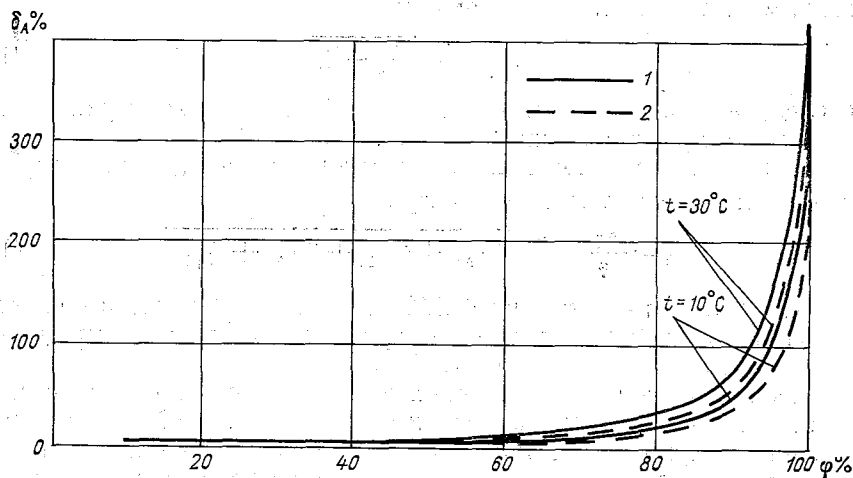


Рис. 1. Зависимость относительной погрешности $\delta_A = \frac{\Delta A}{A}$ определения психрометрического коэффициента от относительной влажности и температуры (при $\Delta t = \Delta t' = \pm 0,1^\circ\text{C}$, $\Delta P = \pm 1$ мбар).

1 — для $\Delta t_{\text{обp}} = \pm 3^\circ\text{C}$, 2 — для $\Delta \varphi_{\text{обp}} = \pm 1\%$.

рения психрометром и является лишь функцией физических постоянных и скорости аспирации, то большинство источников

погрешности приведет к искажению температуры смоченного термометра. Эту температуру следует рассматривать как некую физическую величину, характеризующую в терминах температуры комплексные условия фазового перехода воды на смоченном батисте. Ясно, что вариации этой температуры, вызванные воздействиями различных факторов, при одних и тех же заданных гигрометрических условиях гораздо больше, чем те, которые внесли бы случайные погрешности термометра, измеряющего эту температуру. Поэтому ограниченность приведенной оценки δ_A состоит в отождествлении погрешности термометра, используемого для измерения температуры фазового перехода, как некоей физической величины, с погрешностью измерения ее, которая является неизвестной. Часть $\delta_{A|_H}$, выделенная отдельно, может характеризовать вклад в общую погрешность неизвестных, неполностью исключенных источников погрешности или находящихся в неизвестной функциональной связи с A .

С учетом сказанного полная относительная погрешность определения δ_{A_0} , полученная при обработке экспериментальных данных, будет отличаться от A_p :

$$\delta_{A_0} = \sqrt{\delta_{A|\Delta t'}^2 + \delta_{A|\Delta t}^2 + \delta_{A|\Delta P}^2 + \delta_{A|\Delta \varphi}^2 + \delta_{A|_H}^2} = \sqrt{\delta_{A_p}^2 + \delta_{A|_H}^2}. \quad (13)$$

Так как $\delta_{A|_0}$ и δ_{A_p} будут известны, то составляющую погрешности можно получить по формуле:

$$\delta_{A|_H} = \sqrt{\delta_{A_0}^2 - \delta_{A_p}^2} \quad (14)$$

и, следовательно, оценить степень ослабления влияния указанных источников при проведении эксперимента.

Располагая численным найденным значением δ_{A_0} и A_0 , можно оценить и погрешность психометра

$$\delta_\varphi = \frac{\Delta \varphi}{\varphi} = \sqrt{\delta_{\varphi|\Delta t'}^2 + \delta_{\varphi|\Delta t}^2 + \delta_{\varphi|\Delta P}^2 + \delta_{\varphi|\Delta A}^2}. \quad (15)$$

Результаты расчетов на ЭВМ составляющих относительной погрешности психометра и ее суммарная оценка приводятся в табл. 5 и иллюстрируются рис. 2.

Как видно из рис. 2, δ_φ при неизменных значениях погрешностей Δt , $\Delta t'$, ΔP , ΔA сильно зависит от φ и в меньшей степени от t .

При любом из описанных способов определения погрешности психометра следует учитывать, что эти погрешности характеризуют точностные свойства психометра, когда воздействие влияющих факторов сведено по возможности к минимуму. Поэтому такая погрешность является основной. Она зависит от измерения величины φ , т. е. содержит мультипликативную составляющую.

В соответствии с ГОСТ 13600—68 для нормирования такой относительной основной погрешности можно применить формулу:

$$\delta = \pm 100 \frac{\Delta x}{x} = \pm \left[c + d \left| \frac{x_0}{x} - 1 \right| \right], \quad (16)$$

где x_0 — значение измеряемой величины (здесь относительной влажности), при которой предел допускаемой погрешности имеет минимальное значение; c и d — постоянные числа.

В данном случае ввиду сугубо нелинейной зависимости δ_φ от φ при таком способе выражения требуется аппроксимировать эту зависимость (см. рис. 2), разбив весь диапазон φ по крайней мере на два участка.

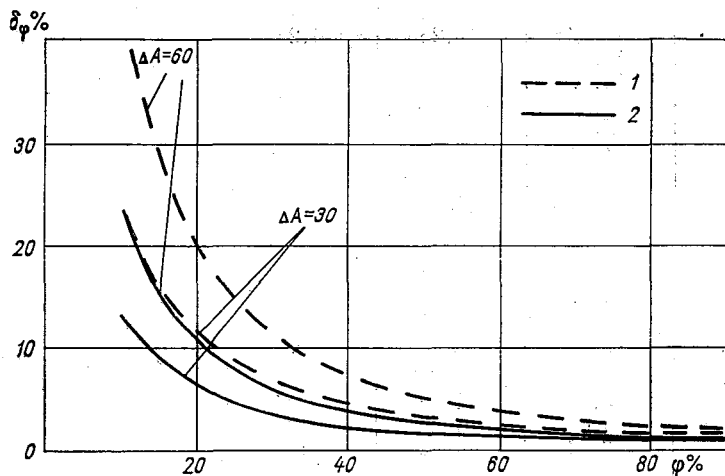


Рис. 2. Зависимость относительной погрешности психрометра

$\delta_\varphi = \frac{\Delta\varphi}{\varphi}$ от относительной влажности и температуры при ($\Delta t = \Delta t' = 0,1^\circ\text{C}$, $\Delta P = \pm 1$ мбар).

1 — для $t = 10^\circ\text{C}$, 2 — для $t = 30^\circ\text{C}$.

Тогда для температуры $t = 20^\circ\text{C}$ и $\delta_A = 4,5\%$ ($\Delta A = 30 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) могут быть получены значения δ_φ в процентах в диапазоне φ от 10 до 30%

$$\delta_\varphi = \pm \left[5 + 6 \left| \frac{30}{\varphi} - 1 \right| \right] \quad (17)$$

и в диапазоне φ от 30 до 100%

$$\delta_\varphi = \pm \left[1 + 0,6 \left| \frac{100}{\varphi} - 1 \right| \right]. \quad (18)$$

Оценка погрешности психрометра при наличии влияющих факторов должна сопровождаться оценками дополнительных погрешностей, которые возникают при выходе значений влияющей величины за пределы нормальной области значений. Одной из таких величин является скорость ветра, при которой производится измерение психрометром. Влияющей величиной, поскольку от нее зависит δ_φ , следует считать и температуру. Поэтому важно найти функции влияния этих величин, что и было включено в программу экспериментальных исследований психрометра.

Таблица 5

$\varphi\%$	$\delta\varphi \Delta t$	$\delta\varphi \Delta t'$	$\delta\varphi \Delta P$	$\delta\varphi \Delta A$	$\delta\varphi$
$t = -20^\circ\text{C}$					
10,0	50,37	57,52	0,77	36,17	112,63
20,0	25,62	28,82	0,34	16,06	54,63
30,0	17,37	19,26	0,20	9,36	35,29
40,0	13,24	14,48	0,13	6,01	25,63
50,0	10,77	11,61	0,09	4,00	19,84
60,0	9,12	9,69	0,06	2,67	15,98
70,0	7,94	8,33	0,04	1,71	13,22
80,0	7,06	7,30	0,02	1,00	11,15
90,0	6,37	6,51	0,01	0,44	9,55
100,0	5,82	5,87	0,00	0,00	8,26
$t = -10^\circ\text{C}$					
10,0	22,71	28,38	0,68	31,83	68,18
20,0	11,75	14,28	0,30	14,11	32,60
30,0	8,10	9,58	0,18	8,21	20,75
40,0	6,27	7,23	0,11	5,26	14,83
50,0	5,18	5,82	0,07	3,50	11,29
60,0	4,45	4,89	0,05	2,32	8,93
70,0	3,93	4,22	0,03	1,49	7,25
80,0	3,53	3,71	0,02	0,87	5,99
90,0	3,23	3,32	0,01	0,38	5,02
100,0	2,99	3,01	0,00	0,00	4,24
$t = 0^\circ\text{C}$					
10,0	11,10	15,48	0,57	26,53	45,58
20,0	5,91	7,86	0,25	11,71	21,54
30,0	4,19	5,32	0,15	6,78	13,55
40,0	3,32	4,05	0,09	4,33	9,57
50,0	2,80	3,29	0,06	2,86	7,19
60,0	2,46	2,79	0,04	1,90	5,61
70,0	2,21	2,43	0,03	1,21	4,49
80,0	2,03	2,16	0,01	0,70	3,66
90,0	1,88	1,95	0,01	0,31	3,02
100,0	1,77	1,78	0,00	0,00	2,51
$t = 10^\circ\text{C}$					
10,0	5,87	9,16	0,45	21,06	31,95
20,0	3,27	4,73	0,20	9,22	14,97
30,0	2,41	3,25	0,11	5,30	9,35
40,0	1,97	2,51	0,07	3,36	6,56
50,0	1,71	2,07	0,05	2,21	4,90
60,0	1,54	1,78	0,03	1,45	3,81
70,0	1,42	1,57	0,02	0,92	3,04
80,0	1,32	1,42	0,01	0,53	2,47
90,0	1,25	1,30	0,00	0,23	2,03
100,0	1,19	1,20	0,00	0,00	1,69

$\varphi\%$	$\delta\varphi \Delta t$	$\delta\varphi \Delta t'$	$\delta\varphi \Delta P$	$\delta\varphi \Delta A$	$\delta\varphi$
-------------	--------------------------	---------------------------	--------------------------	--------------------------	-----------------

$t = 20^{\circ}\text{C}$

10,0	3,37	5,78	0,34	16,12	22,82
20,0	2,00	3,06	0,15	6,98	10,64
30,0	1,54	2,15	0,09	3,97	6,62
40,0	1,31	1,70	0,05	2,49	4,64
50,0	1,17	1,43	0,03	1,62	3,47
60,0	1,08	1,25	0,02	1,06	2,71
70,0	1,01	1,13	0,01	0,67	2,18
80,0	0,97	1,03	0,01	0,38	1,79
90,0	0,93	0,96	0,00	0,17	1,50
100,0	0,90	0,90	0,00	0,00	1,27

$t = 30^{\circ}\text{C}$

10,0	2,10	3,85	0,26	12,05	16,44
20,0	1,34	2,11	0,11	5,15	7,64
30,0	1,08	1,53	0,06	2,89	4,77
40,0	0,96	1,24	0,04	1,79	3,36
50,0	0,88	1,07	0,02	1,16	2,54
60,0	0,83	0,96	0,02	0,75	2,01
70,0	0,79	0,88	0,01	0,47	1,65
80,0	0,77	0,82	0,01	0,26	1,38
90,0	0,74	0,77	0,00	0,11	1,18
100,0	0,73	0,73	0,00	0,00	1,03

$t = 40^{\circ}\text{C}$

10,0	1,42	2,69	0,19	8,89	11,94
20,0	0,98	1,54	0,08	3,74	5,56
30,0	0,83	1,16	0,04	2,07	3,49
40,0	0,75	0,97	0,03	1,27	2,50
50,0	0,71	0,85	0,02	0,81	1,92
60,0	0,68	0,78	0,01	0,52	1,55
70,0	0,66	0,72	0,01	0,32	1,30
80,0	0,64	0,68	0,00	0,18	1,12
90,0	0,63	0,65	0,00	0,08	0,99
100,0	0,62	0,63	0,00	0,00	0,88

Примечание. Данные, приведенные в таблице, получены при $\Delta t = 0,1^{\circ}\text{C}$, $\Delta t' = 0,1^{\circ}\text{C}$, $\Delta P = 1$ мбар, $\Delta A = 30 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

Что касается влияния температуры, то уже из зависимости $\delta\varphi$ от φ и t видно, что изменение температуры от 30 до 10°C приводит к увеличению $\delta\varphi$ на 11% при 10% относительной влажности, на 3% при 30% относительной влажности и на 0,5% при 90%. Иначе говоря, принимая значение температуры, характеризующей нормальные условия измерений, равным 20°C , получим, что при отклонении от этого значения на $\pm 10^{\circ}\text{C}$ для измеряемой влажности 10% дополнительная относительная случайная погрешность составит 5,5%, соответственно при 30% она составит 1,5%.

Программой этих исследований предусматривалась также оценка влияния на погрешность психрометра некоторых источни-

ков, обусловленных конструктивными его особенностями, погрешность от выступающего столбика ртути в смоченном термометре из-за образования контура циркуляции от турбинки аспиратора к входным отверстиям психрометра.

Кроме того, при исследованиях экспериментально уточнены постоянные времени сухого и смоченного термометров.

Приведенное краткое изложение содержания исследований дает основание для обоснования выбора средств измерений. При этом трудности не возникают в случае экспериментов по определению функций влияния. К аппаратуре же для определения погрешностей психрометра и особенно значения психрометрического коэффициента предъявляются более жесткие требования. Это касается главным образом погрешностей такой аппаратуры, которая проходила бы метрологическую аттестацию. Отсутствие такой аппаратуры до последнего времени служило главным препятствием проведению систематической работы по экспериментальному исследованию точностных характеристик психрометра.

В 1975—1976 гг. положение улучшилось. Госстандартом были проведены метрологическая аттестация камеры влажности на методе двух давлений (Промэнерго, г. Иваново) и государственные испытания гигрометра точки росы М-116 (ГГО, г. Ленинград). Эта камера, будучи основанной на расчетном методе, была аттестована в диапазоне температуры от 15 до 35°C и относительной влажности от 10 до 100% с пределом допускаемой погрешности воспроизведения относительной влажности 1%. Камера имеет полезный объем свыше 1 м³ и скорость потока по сечению 0,5 м/с.

Прошедший испытания гигрометр точки росы М-116 в диапазоне температуры и точки росы от -40 до +40°C имеет предел допускаемой погрешности 0,4°C по точке росы, что соответствует погрешности 2% относительно измеряемого значения относительной влажности в области температуры и влажности, приходящейся на условия исследования психрометра.

Для исследования влияния скорости ветра на погрешность психрометра использовалась аттестованная аэродинамическая труба ГГО. При измерении скорости аспирации применялась установка ПО-30 (микроанометр с насадкой).

Смачивание психрометров, располагаемых в камере, производилось дистанционно с помощью капилляра, через который дистиллированная вода подавалась из резиновой груши, находящейся снаружи камеры (рис. 3).

Исследованию подвергалась выборка, состоящая из 7 психрометров типа М-34 и 9 психрометров типа МВ-4. Эти приборы подвергались входному контролю на соответствие требований нормативно-технической документации, в частности на наличие поправок к ртутным термометрам, и чтобы значения скорости аспирации V составляли не менее 2 м/с.

Результаты контроля скорости аспирации приводятся в табл. 6. Из данных табл. 6 видно, что психрометры М-34 имеют скорость аспирации, удовлетворяющую предъявляемому требованию,

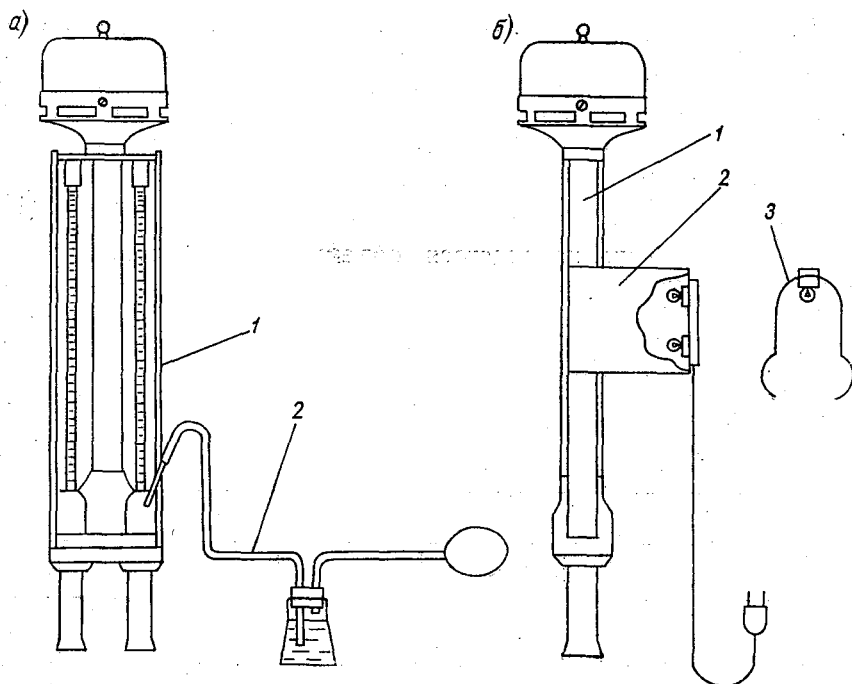


Рис. 3.

а — дистанционное смазывание в аспирационном психрометре (1 — психрометр, 2 — приспособление для смазывания); б — подсветка шкалы психрометра (1 — психрометр, 2 — приспособление для подсветки шкал, 3 — вид сверху).

Таблица 6

№ прибора	Время от момента смазывания, мин						
	1	2	3	4	5	6	среднее
Электрические психрометры М-34							
729	2,5	2,5	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4
844	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4
1470	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6
885	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4
1401	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4
682	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
1315	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7
Заводные психрометры МВ-4							
2713	2,6	2,5	2,4	2,4	2,4	2,3	
1815	2,4	2,3	2,0	2,2	1,9	1,9	
2281	2,7	2,7	2,5	2,4	2,4	2,3	
3349	2,4	2,3	2,3	2,3	2,2	2,2	
1715	2,7	2,5	2,5	2,4	2,4	2,2	
3463	2,7	2,6	2,6	2,6	2,4	2,4	
2652	2,5	2,3	2,4	2,4	2,2	2,2	
1983	2,5	2,4	2,3	2,4	2,3	2,2	
1808	2,4	2,3	2,3	2,3	2,3	2,2	

т. е. $V > 2$ м/с (от 2,4 до 2,7 м/с), а МВ-4 (на 4-й мин) — от 2,2 до 2,6 м/с.

При исследованиях вводилась температурная поправка на выступающий столбик ртути смоченного термометра. Эта поправка, очевидно, зависит от температуры и относительной влажности анализируемого воздуха. Она рассчитывается по формуле

$$c = kn(t - t'), \quad (19)$$

где k — коэффициент кажущегося объемного расширения ртути в стекле, n — длина выступающего столбика, выраженная числом градусов данного термометра, t' — температура резервуара термометра, t — температура выступающего столбика, определенная по сухому термометру психрометра.

Значения этой поправки при разных значениях температуры и влажности представлены в табл. 7.

Таблица 7

φ%	t°C				
	0	10	20	30	40
10	-0,05	-0,05	-0,10	-0,15	-
20	-0,05	-0,05	-0,10	-0,15	-0,20
30	-0,05	-0,05	-0,10	-0,10	-0,20
40	0,00	-0,05	-0,10	-0,10	-0,15
60	0,00	-0,05	-0,05	-0,05	-0,10
80	0,00	0,00	0,00	-0,05	-0,05

Неприменение введения этих поправок приводит к функциональной систематической погрешности психрометра, зависимость которой от относительной влажности и температуры иллюстрируется графиком, на котором $\delta_\phi = \frac{\Delta\phi}{\phi}$ — относительная погрешность (рис. 4). В работе [25] главной причиной несовпадения получаемых численных значений психрометрического коэффициента с принятым в психрометрических таблицах указано игнорирование поправок.

Оценка динамических погрешностей психрометра может быть выполнена при наличии сведений о динамических свойствах его. Поэтому согласно предусмотренному программой эксперименту, была оценена постоянная времени сухого и смоченного термометров. В результате в среднем для нескольких психрометров при наличии аспирации для постоянной времени сухого термометра получено значение 23 с, а для смоченного 21 с. Измерения выполнены в нормальных условиях. Таким образом, принятая в существующих методиках измерения психрометром форма — проведение отсчета на 4-й мин от момента смачивания, — намного перекрывает время достижения установившегося режима сухим и смоченным термометрами.

Оценка возможного влияния на погрешность психрометра вследствие образования контура циркуляции от аспиратора к входным отверстиям психрометра проводилась на пяти психрометрах типа М-34, поскольку это влияние может быть вызвано не только поступлением к смоченному термометру дополнительно увлажненного им воздуха, но и подогревом его электродвигателем аспиратора.

Психрометры сравнивались попарно без экрана и с экраном, представляющим собой диск диаметром 0,5 м, который устанавливался между верхней и нижней частями психрометра, предотвращая образование контура циркуляции. При сличениях расстояние между психрометрами составляло 0,5 м, температура и влажность анализируемого воздуха в помещении в среднем составляла 19°C и 40% соответственно.

Из полученных результатов следует, что если это влияние и существует, то оно количественно выражается в погрешностях, не превышающих случайных погрешностей эксперимента.

Влияние скорости обдува психрометра внешним потоком на погрешность аспирационных психрометров обнаруживалось и объяснялось исследованиями, например [23]. Результатом этих исследований оказалась рекомендация по комплектованию аспирационного психрометра так называемого ветровой защитой. Программой экспериментальных исследований предусматривалось выяснение степени эффективности такой защиты.

С этой целью психрометры и гигрометр точки росы М-116 устанавливались в поток, создаваемый аэродинамической трубой, и производились сличения при различных скоростях потока, наличии ветровой защиты или в ее отсутствии. Исследованию подвергались психрометры с электрическим мотором (М-34) и с пружинным механизмом (заводные МВ-4) (всего 10 экземпляров).

На рис. 5 приводятся полученные зависимости относительной погрешности психрометра от скорости воздушного потока в зависимости от типа и наличия защиты. Из рис. 5 видно, что относительная погрешность как при наличии защиты, так и в ее отсутствие может достигать весьма больших значений (до 5%), обнаруживается также во всех случаях монотонное возрастание погрешности с увеличением скорости внешнего потока.

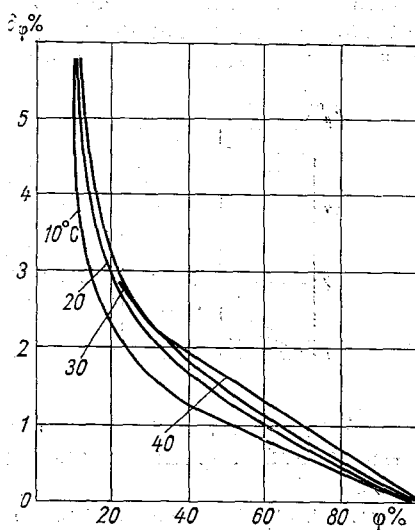


Рис. 4. Зависимость относительной погрешности психрометра из-за выступающего столбика ртути в смоченном термометре.

Особенность этой зависимости для психрометра М-34 с защитой заключается в том, что не наблюдается замедления роста погрешности во всем диапазоне скоростей задаваемого потока, вплоть до наибольшего (10 м/с), за исключением участка от 3 до 5 м/с. Из анализа этих зависимостей можно сделать общий вывод о том, что в среднем ветровая защита эффективна лишь при скоростях, меньших 7 м/с.

Хотя и ясно, что влияние внешнего потока на погрешность психрометра в конечном счете происходит через изменение скорости аспирации смоченного термометра, все же отметим, что механизм этого влияния во всех его промежуточных звеньях довольно сложен. По-видимому, ведущую роль здесь играет взаи-

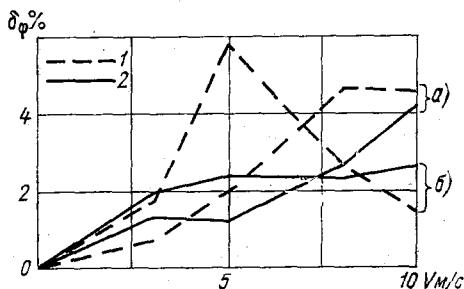


Рис. 5. Влияние скорости воздушного потока (ветра) с защитой (а) и без защиты (б), обдувающего психрометр, на относительную погрешность заводного (1) и электрического (2) аспирационных психрометров.

модействие внешнего потока с турбинкой аспиратора и характер нагрузочной характеристики электрического и пружинного двигателя.

Это подтверждает результат специально поставленного побочного эксперимента, в котором была получена зависимость относительного изменения числа оборотов турбинки, приводимой в движение электродвигателем, в зависимости от скорости набегающего потока. За опорное принято число оборотов при безветрии. Обнаружилось, что при скорости внешнего потока 8 м/с число оборотов турбинки достигает минимального значения, отличающегося от номинальных на 10%.

Погрешность от влияния ветра носит систематический характер, т. е. монотонно увеличивается с увеличением скорости, сохраняя один и тот же знак. Поскольку по значению эта погрешность сопоставима с погрешностью от влияния выступающего столбика ртути смоченного термометра, целесообразно при точных измерениях вводить поправку на скорость ветра в соответствии с формулами:

$$-\delta = -\frac{\Delta\varphi}{\varphi} \cdot 100 = -0,43v; \quad (20)$$

$$\Delta\varphi|_v = -\Delta\varphi = -0,043v\varphi, \quad (21)$$

где v — скорость ветра в м/с, φ — измеряемое значение относительной влажности (полученное без поправки) в процентах относительной влажности.

Коэффициент 0,43 получен как угловой коэффициент для прямой, определяющей зависимость погрешности от скорости ветра.

Таким образом, если первоначальное измерение дает результат, например 35% относительной влажности, и при этом известно, что скорость ветра при измерении составила 6 м/с, то из полученного значения влажности следует вычесть 2,6%.

Полученные результаты по оценке параметров функций влияния различных факторов на погрешность психрометра позволяют в дальнейшем при определении погрешности его активным образом воздействовать на них, в частности, путем введения поправок.

Метрологический анализ полученных результатов проведен в [28].

Выводы

1. Нормируемые в настоящее время метрологические характеристики аспирационного психрометра не отвечают современным метеорологическим требованиям, в частности, по точностным параметрам.

2. Краткий анализ предшествующих теорий психрометра и результатов экспериментальных исследований выявил необходимость проведения экспериментального уточнения значения психрометрического коэффициента.

3. Анализ источников погрешности аспирационного психрометра позволил представить перечень источников погрешностей и возможные способы их устранения или ослабления.

4. Определена структура погрешности психрометра и функциональная связь погрешности с относительной влажностью и температурой анализируемого воздуха.

Определена структура и функциональная связь погрешности экспериментального определения психрометрического коэффициента с относительной влажностью и температурой. Согласно проведенным расчетам погрешность определения психрометрического коэффициента возрастает от нескольких процентов при небольших относительных влажностях, до нескольких сотен процентов при влажностях больших 90%.

5. Обоснована и сформулирована программа экспериментальных исследований психрометра, в которой предусматривается определение влияния на погрешность психрометра ряда воздействующих факторов и определение экспериментально психрометрического коэффициента и точностных характеристик психрометра, применив для этой цели аттестованные Госстандартом СССР образцовые средства измерений — гигрометр точки росы М-116 (ГГО) и гигрокамеру, основанную на методе двух давлений К-2Д-75 (г. Иваново).

Эксперименты предусматривалось проводить на выборке из нескольких психрометров.

6. Выявлены численные значения и характер погрешностей от воздействия различных факторов. Относительная погрешность

определения относительной влажности от пренебрежения поправкой на выступающий столбик ртути носит функциональный систематический характер и способна достигать +5% при 10% относительной влажности. Относительная погрешность от пренебрежения влиянием скорости ветра имеет также систематический характер и достигает 5% при скорости ветра 7 м/с и влажности 10%. Влияния контура циркуляции от аспиратора к входным отверстиям психрометра в погрешности измерения не обнаружено.

7. Постоянные времени сухого и смоченного термометров при аспирации оказались соответственно равными 23 и 21 с.

В заключение авторы приносят благодарность за содействие в работе сотрудникам Ивановского производственного объединения Промэнергоремонт О. А. Кузнецову, Е. А. Тюрину и Т. И. Ветроуевой, а также за предоставление гигрокамеры К-2Д-75 и помощь в проведении сличений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 8.009—72. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений. М., Изд-во стандартов, 1972, 15 с.

2. ГОСТ 8.011—72. Показатели точности измерений и формы представления результатов измерений. М., Изд-во стандартов, 1972, 6 с.

3. ГОСТ 8.010—72. Общие требования к стандартизации и аттестации методик выполнения измерений. М., Изд-во стандартов, 1972, 6 с.

4. ГОСТ 8.001—71. Организация и порядок проведения государственных испытаний средств измерений. М., Изд-во стандартов, 1976, 22 с.

5. МУ 8.7—77. Методические указания по проведению метрологической аттестации средств измерений. М., Изд-во стандартов, 1976, 10 с.

6. ГОСТ 13600—68. Средства измерений. Классы точности. Общие требования. М., Изд-во стандартов, 1976, 10 с.

7. ГОСТ 6353—52. Психометр аспирационный. М., Изд-во стандартов, 1959, 6 с.

8. ГОСТ 15055—69. Термометр ртутный метеорологический к аспирационному психрометру. М., Изд-во стандартов, 1974, 5 с.

9. Психометрические таблицы. Л., Гидрометеониздат, 1972, 235 с.

10. Ivory I. Phil. Mag. 1822, v. 60, p. 81.

11. August E. Ann. Physik. 1825, v. 5, p. 69.

12. Maxwell J. C. Encyclopedia Britannica, ed. 9, v. 7, p. 218.

13. Arnold G. H. Physics. 1933, July, No. 4, p. 255.

14. Lewis W. K. Mech. Eng. 1933, September, No. 55, p. 56.

15. Бернар Э. Теория психометрических приборов, основанная на законах двухмерной диффузии (реферат доклада). Информационный сборник по гидрометеорологическим приборам и методам наблюдений. М., Гидрометеониздат, № 48, 1971, с. 11—12.

16. Спенсер-Грегори Г., Роурке Е. Гигрометрия. М., Metallurgиздат, 1963, 254 с.

17. Зворыкин Н. А. Исследования о психрометре.—Ученые записки Московского университета. 1884, вып. 5, 54 с.

18. Yoshitake M., Shimizu G. Experimental results of the psychrometer constant.—Humidity and Moisture. 1965, v. 1, N 4, p. 70—75.

19. Folland C. K. The psychrometer coefficient of the wet—bulb thermometers, used in the meteorological official large thermometer screen.—Meteor. off., Scient. Paper 1977, No. 38, 38 p.

20. Kondo J. Psychrometric constant for different sizes of the wet thermometer.—Scient. Rep. Tokoku Univ. Geophys., 1967, No. 18, p. 125—137.

21. Swensson A. Zur Kenntniss des Ventilierten Psychrometers.—Met. Zschr. 1898.

22. Assman Dr. Aspirations — Psychrometer Veröff. des Königl. Preuss. Met. Inst. Abhandlungen, 1901, B. I, No. 5.

23. Пенкевич М. С. О некоторых недостатках методов определения влажности воздуха на метеорологических станциях.— Изв. Гл. геофиз. обс., 1932, № 3, с. 13—21.

24. Алянчикова Г. Н., Доронин М. А. Некоторые погрешности аспирационного психрометра при низких значениях относительной влажности.— Тр. НИИ ГМП, 1968, вып. 19, с. 27—33.

25. Усольцев В. А. О величине психрометрического коэффициента аспирационного психрометра.— Тр. НИИ ГМП, 1969, вып. 22, с. 64—74.

26. Леонова Л. И., Резников Г. П., Рогалев Ю. В. Статистические оценки погрешностей образцовых средств измерений влажности воздуха, поверочные схемы Гидрометслужбы.— Тр. ГГО, 1975, вып. 345, с. 77—83.

27. Стернзат М. С. Об измерении влажности воздуха в тумане психрометром Ассмана.— Тр. ГГО, 1946, вып. 23, с. 56—60.

28. Леонова Л. И., Ядова Л. А., Климин Н. Н. и др. Метрологический анализ результатов экспериментальных исследований аспирационных психрометров.— См. наст. сб.

**Л. И. Леонова, Л. А. Ядова, Н. Н. Климин, Н. П. Фатеев,
Г. П. Резников, Б. В. Куров, Т. П. Доманькова**

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ АСПИРАЦИОННЫХ ПСИХРОМЕТРОВ

В [1] отмечалось, что определение погрешности психрометра, значения психрометрического коэффициента и параметров точности его отыскания было сделано на основе метрологического сравнения психрометров с образцовым гигрометром точки росы М-116 и с гигрокамерой на расчетном методе двух давлений. Эти сравнения проводились в 1976 и 1977 гг.

Поскольку характеристики точности зависят от относительной влажности и температуры, то сравнения проводились при различных сочетаниях значений этих величин, а именно: при температурах 5, 10, 20, 30, 35°C и относительной влажности 30, 40, 60, 80%.

Психрометры объединялись в группы по 3 экземпляра, которые устанавливались в камеру К-2Д (рис. 1).

В камере задавалось одно из перечисленных значений температуры и через 1—1,5 ч, когда приборы приходили в практическое равновесие с воздухом (о чем можно было судить по показаниям смоченных термометров), устанавливали наименьшее из перечисленных значений относительной влажности. При гигротермических условиях, согласно су-

ществующим инструкциям по эксплуатации всех используемых в эксперименте средств измерения, производилось по пять отсчетов,

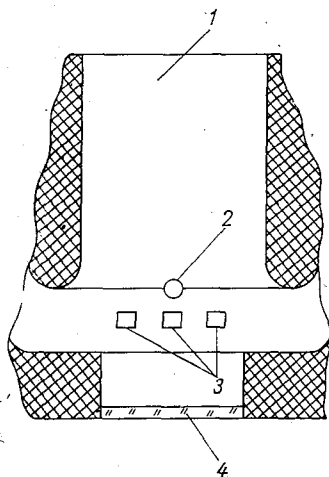


Рис. 1. Взаимное расположение психрометров и образцового гигрометра М-116 в гигрокамере К-2Д—75.

1 — рабочий объем гигрокамеры, 2 — гигрометр точки росы, 3 — психрометры, 4 — люк камеры.

образующих группу. При каждой комбинации t и ϕ получалось 5 таких групп измерений.

Затем устанавливалось следующее значение относительной влажности при той же температуре и производились измерения в этих условиях. После сличений при наибольшем из указанных значений влажности установленные до этого в камере психрометры вынимались и заменялись другими, с которыми все операции повторялись. Хотя ход влажности для новой группы психрометров был противоположным (на понижение), это не могло влиять на результат благодаря обеспечению гигротермического равновесия при каждом новом значении влажности. Описанный режим позволил с наибольшей эффективностью использовать отведенное ограниченное время работы в камере. Такие измерения производились при каждом из указанных значений температуры.

Таким образом, в результате выполненных экспериментов были получены достаточно мощные статистические совокупности (множества) сравнений исследуемых психрометров с образцовыми средствами измерений. Все многообразие условий, при которых эти множества были получены, откладывает отпечаток на каждый элемент такого множества. Поэтому обозначение такого элемента можно сопровождать указанием условий, при которых он был получен, в виде индексов. Последние представляют собой числа, присвоенные определенному параметру, характеризующему эти условия. Например, j — номер отсчета в каждой из пяти групп (т. е. значения от 1 до 5); g — номер группы по 5 отсчетов в каждой, g принимает значения от 1 до 5; f — номер, присваиваемый одному из значений относительной влажности, $f=1\div 4$; l — номер, присваиваемый одному из значений температуры, $l=1\div 4$; i — условный номер исследуемого психрометра, $i=1\div 7$; результаты измерений, выполненные гигрометром точки росы, сопровождаются индексом «т», в камере — «к», психрометром — «п». Тогда обозначение отсчета по психрометру выглядит так: $\varphi_{п jgli}$, т. е. j -й отсчет в g -й группе при значениях влажности f и температуры l по i -му экземпляру психрометра. Соответственно обозначим разности показаний психрометра и образцового средства

$$\Delta_{п-т jgli} = \varphi_{п jgli} - \varphi_{т jgli}. \quad (1)$$

Общее количество отсчетов по психрометрам, таким образом, составило

$$N = \sum_j^5 \sum_g^5 \sum_f^4 \sum_l^4 \sum_i^7 = 5 \cdot 5 \cdot 4 \cdot 4 \cdot 7 = 2800. \quad (2)$$

Все полученное множество результатов следует классифицировать по одному признаку или по комбинациям их и объединять в соответствующие серии, например, φ_{fi} , т. е. подмножество отсчетов по i -му психрометру при значении влажности f (внутри этой совокупности ϕ принимаются однородными, т. е. неразличимыми по признакам j, g, l). Общее количество таких возможных сочетаний

C , очевидно, равно сумме числа сочетаний по выбранному количеству элементов из их общего количества (5), т. е.

$$C = C_5^1 + C_5^2 + C_5^3 + C_5^4 + C_5^5 = 31. \quad (3)$$

При этом количество сформированных групп в каждой из 32 комбинаций определяется наибольшими значениями, которые принимают индексы в комбинациях.

Таким образом, из потенциального множества при обработке приходится ограничиться лишь несколькими комбинациями, к которым отнесем комбинации, характеризующие связь погрешности психрометра со значениями относительной влажности и температуры, номером психрометра, типом образцового средства измерения влажности. Такой подход применяется как при определении погрешности психрометра на основании прямых метрологических сравнений с образцовыми средствами измерений, так и при определении психрометрического коэффициента.

Экспериментальный исходный материал подвергался критическому анализу уже на этапе его получения. Дальнейшая обработка производилась с учетом рекомендаций, требований и схем в соответствии, например, с [2, 3].

Вычислялись дисперсии и оценки среднего квадратического отклонения каждой совокупности из 25 отсчетов. Затем проверялась гипотеза о нормальности распределения по критерию К. Пирсона, в результате этой проверки гипотеза нормальности была принята.

Затем, по методу [3], были исключены промахи. Далее проверялась допустимость рассеивания оценок дисперсий групп наблюдений, по критерию М. Бартлетта. Поскольку уже заранее была оценена зависимость дисперсии от относительной влажности, проверка имела смысл для групп, полученных при близких значениях относительной влажности.

Еще до проверки по статистическому критерию из построенных с помощью ЭВМ гистограмм погрешностей психрометров для определенных сочетаний температуры и влажности в гигрокамере следовало, что между средними значениями погрешностей отдельных психрометров существует значительное расхождение. Это приводило к предположению о наличии у некоторых экземпляров психрометров существенных систематических погрешностей. Объяснение причин появления этих погрешностей будет приведено при анализе результатов определения психрометрического коэффициента.

На рис. 2 приведены в качестве допустимых погрешности психрометра как типа прибора по результатам метрологических сравнений с К-2Д и гигрометром точки росы М-116. Как видно из рис. 2, ранее рассчитанные пределы меньше, чем полученные из сравнений, что и следовало ожидать. Поскольку полученные погрешности существенно больше, чем погрешность образцовых средств, то исключение погрешности образцового средства не приводит к существенным изменениям.

Следует отметить, что экспериментально полученный ход погрешностей психрометра в зависимости от относительной влажности

и их значения значительно ближе к расчетным в случае использования в качестве образцового прибора гигрометра точки росы, чем в случае использования в качестве образцового метода двух давлений.

По результатам сличений 7 психрометров с гигрометром точки росы и осреднения их по всем экземплярам связь между пределом допускаемой относительной погрешности и относительной влажно-

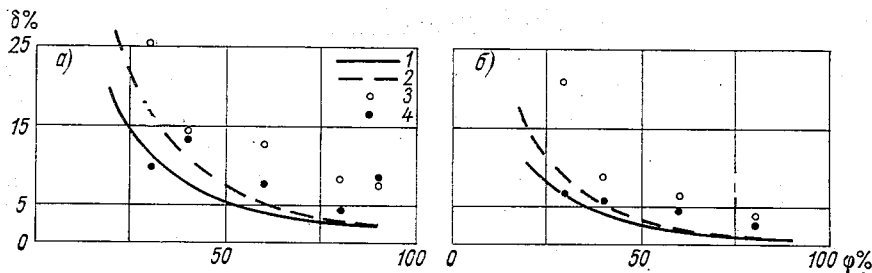


Рис. 2. Экспериментально найденная зависимость предела допускаемой погрешности психрометра $\delta = \frac{\Delta\varphi}{\varphi}$ от относительной влажности φ при температуре анализируемого воздуха 10°C (а) и 20°C (б).

1) $\Delta A=0$, 2) $\Delta A=30 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, 3) сравнение с прибором К-2Д, 4) то же с М-116.

стью можно выразить в процентах уравнениями для температуры 10 и 35°C соответственно [4]:

$$\delta_{\varphi} = \pm \left[2 + 4,34 \left| \frac{100}{\varphi} - 1 \right| \right]; \quad (4)$$

$$\delta_{\varphi} = \pm \left[2 + 2,6 \left| \frac{100}{\varphi} - 1 \right| \right]. \quad (5)$$

По результатам сравнений с методом двух давлений для тех же условий:

$$\delta_{\varphi} = \pm \left[3 + 7,8 \left| \frac{100}{\varphi} - 1 \right| \right]; \quad (6)$$

$$\delta_{\varphi} = \pm \left[3 + 1,7 \left| \frac{100}{\varphi} - 1 \right| \right]. \quad (7)$$

Сопоставляя эти выражения для погрешностей с выражением для расчетных значений, можно отметить, что получаемые оценки погрешностей экспериментально существенно выше расчетных.

Согласно изложенному, погрешность психрометра можно оценить, если в распоряжении имеется экспериментально определенное значение психрометрического коэффициента и оценка погрешности его определения. Помимо этого, информация о психрометрическом коэффициенте более универсальна, поскольку коэффициент в большей мере характеризует психрометрический метод.

Поскольку было принято предположение, что наиболее соответствующей истинной зависимости является формула Ферреля,

то не следует, видимо, ожидать зависимости психрометрического коэффициента от относительной влажности и температуры. В противном случае предположение было бы неверным. Таким путем, следовательно, можно проверить истинность психрометрического уравнения в пределах погрешностей эксперимента.

Численные значения психрометрического коэффициента получались по формуле (1) для каждого произведенного сличения Δ_{jgfi} . Для каждого из психрометров при всех сочетаниях значений температуры и относительной влажности вычислялись оценки среднего значения (из 25 отсчетов), т. е. A_{fli} , оценки σ_{jgfi} среднего квадратического отклонения Δ_{jgfi} от A_{fli} и оценки σ_{fli} среднего квадратического отклонения результата определения A_{fli} . Очевидно, что для 7 экземпляров психрометра ($i_{\max}=7$), четырех значений температуры ($l_{\max}=4$) и четырех значений относительной влажности ($f_{\max}=4$) таких значений A_{fli} и соответственно σ_{jgfi} и σ_{fli} должно было быть 112. Но ввиду того, что для некоторых из психрометров измерения были выполнены (по организационным причинам) не при всех значениях температуры и влажности и что была частичная отбраковка измерений, общее число таких значений составило 79.

Нетрудно видеть, что внешне A_{fli} и их точностные характеристики зависят от относительной влажности. Однако, принимая во внимание ранее приведенную зависимость погрешности определения A от относительной влажности при неизменных погрешностях прямых измерений в эксперименте, можно убедиться, что экспериментальная зависимость подчиняется расчетной. Таким образом, оказывается, что после исключения систематической погрешности в прямых измерениях A_{fli} не зависит от относительной влажности, т. е. $A_{fli} \neq f(t)$.

Для выяснения связи A_{fli} с температурой были найдены средние значения A для всех экземпляров психрометров при каждой температуре и влажности, т. е.

$$A_{fl} = \frac{1}{7} \sum_{i=1}^7 A_{fli}. \quad (8)$$

Оказалось, что значения A_{fl} зависят от относительной влажности по-разному, в зависимости от l , т. е. температуры. Для примера рассмотрим рис. 3 и табл. 1.

Из табл. 1 и рис. 3 следует, что зависимость A_{fl} от относительной влажности обусловлена постоянной по знаку систематической погрешностью, эквивалентной систематической погрешности измерения t при всех значениях относительной влажности и равной в среднем $t = +10^\circ\text{C}$, $\Delta t_{\text{экр}} = +0,07^\circ\text{C}$. При температуре же $t = +20^\circ\text{C}$ эта погрешность остается той же, но меняется по знаку, что и вызывает кажущееся увеличение A при $+10^\circ\text{C}$ и уменьшение при $+20^\circ\text{C}$. Такая систематическая погрешность прямого измерения ниже ее оценки при эксперименте. Следует признать, что в указанных пределах точности эксперимента зависимость

Таблица 1

$t, ^\circ\text{C}$	Относительная влажность, %											
	30			40			60			80		
10	-2*	0,30%	+0,04	+4*	1,20%	+0,10	+10*	1,50%	+0,07	+3,3*	50%	+0,07
20	+2*	0,30%	-0,04	-6*	1,00%	-0,10	-20*	3,30%	-0,10	-2,4*	40%	-0,05

Примечание. В таблице звездочка (*) означает умножение на $10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$. Три графы при каждом из значений температуры и влажности показывают: первая — ΔA отклонение A_{fl} от среднего значения $A=632$ (вычисленного далее) по всей совокупности результатов измерений; вторая — относительная погрешность в процентах, т. е. отношение $(\Delta A/A) \cdot 100$; третья — найденное из зависимости $\Delta(A/A)$ от φ и Δt значение эквивалентной систематической погрешности прямых измерений температуры или точки росы.

психрометрического коэффициента от температуры и влажности лишь кажущиеся и на самом деле отсутствуют.

На основании того, что зависимость A от φ и t во всем рабочем диапазоне не обнаружена (при указанных условиях эксперимента), психрометрический коэффициент действительно можно считать «постоянной», а выбор в качестве рабочего уравнения психрометрической формулы Ферреля правильным.

Независимость значений A_{fl} от φ и t (относительной влажности и температуры), а также незначительность различий их, вызванных условиями эксперимента (что подтверждается проверкой по

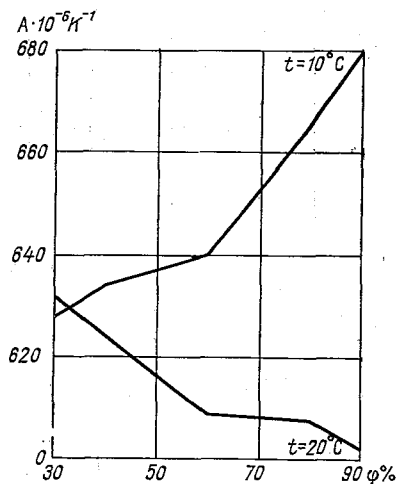


Рис. 3. Кажущаяся зависимость психрометрического коэффициента от относительной влажности и температуры (по экспериментальным данным) для $\Delta t_{\text{крв}} = \pm 0,07^\circ\text{C}$, $A \neq f(\varphi, t)$.

критерию Р. Фишера), и допустимость рассеивания дисперсий σ_{igft}^2 позволяет объединить эти группы в общие совокупности для каждого из экземпляров психрометров.

Полученные совокупности характеризуются оценкой среднего значения A_i оценкой σ_{fli} среднего квадратического отклонения A_{fli} от A_i и оценкой σ_i среднего квадратического отклонения A_i . Определение A_i производилось по формуле

$$A_i = \frac{1}{f_{m'l_m}} \sum_{l=1}^{f_{m'l_m}} A_{fli} = \frac{1}{n_i} \sum_{f=1}^{f_m} \sum_{l=1}^{l_m} A_{fli}, \quad (9)$$

где $n_i = f_m l_m$ — общее число сочетаний значений температуры и влажности, при которых исследовался i -й психрометр. Оценка σ_{fli} производилась по формуле

$$\sigma_{fli} = \sqrt{\frac{\sum_{l=1}^{l_m} \sum_{f=1}^{f_m} (A_{fli} - \bar{A}_i)^2}{l_m (f_m - 1)}}. \quad (10)$$

Оценка σ_i соответственно

$$\sigma_i = \frac{\sigma_{fli}}{\sqrt{l_m f_m}}. \quad (11)$$

Полученные для 7 экземпляров психрометров результаты приведены в табл. 2, где $\bar{A}_i$ — среднее значение психрометрического для i -го психрометра, а $\delta_{\bar{A}_i}$ — среднее квадратическое отклонение оценки среднего арифметического $\bar{A}_i$.

Таблица 2

№ п/п, (см. рис. 4)	Прибор №	ГТР М-П6		К-2Д-75		
		$\bar{A}_i \cdot 10^{-6}$	$\sigma_{\bar{A}_i} \cdot 10^{-6}$	$\bar{A}_i \cdot 10^{-6}$	$\sigma_{\bar{A}_i} \cdot 10^{-6}$	V м/с
1	729	633	31,68	643	14,3	2,4
2	844	631	31,55	609	21,47	2,4
3	1470	624	31,05	646	31,7	2,6
4	885	640	12,66	674	20,3	2,4
5	1401	633	8,91	638	21,93	2,4
6	682	643	18,9	679	22,3	2,5
7	1315	618	15,3	626	15,93	2,7

Сопоставление значений A_i в табл. 2 позволяет отметить, что одна часть из них группируется с небольшим разбросом, тогда как другая часть значительно отличается одна от другой. Поскольку A_i представляют собой средние значения оценок психрометрического коэффициента, полученных при одинаковых условиях эксперимента для каждого из экземпляров психрометра, то, очевидно, что различие A_i связано с особенностями в индивидуальных свойствах отдельных экземпляров психрометров, несмотря на удовлетворительные результаты входного контроля, проведенного перед началом эксперимента. В поисках каких-либо индивидуальных особенностей экземпляров можно обратить внимание лишь на некоторое различие в скорости аспирации. Несмотря на то что в выполненных ранее работах, в том числе и Ассмана, для аспирационного психрометра не отмечается какой-либо зависимости от скорости аспирации при ее значениях больше 2 м/с, проверим, не существует ли корреляции между экспериментально полученными значениями A_i и V_i .

Из рис. 4 видна явная связь между значениями коэффициента и скорости аспирации. Поскольку на участке от 2 до 3 м/с связь

между A и V с высокой степенью приближения можно аппроксимировать линейной зависимостью, т. е. сильное основание описывать эту связь и в данном случае линейной зависимостью, при аналитическом описании этой связи были найдены методом наименьших квадратов параметры уравнения прямой на интервале V от 2,4 до 2,7 м/с.

$$A_{|2,4 \div 2,7} = [636,2 - 55,97(V - 2,4)] \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}. \quad (12)$$

Экстраполируя на интервале от 2 до 3 м/с, получим

$$A_{|2 \div 3} = [660 - 56(V - 2)] \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}, \quad (13)$$

откуда следует, что при $V=2$ м/с $A=660 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$, а при $V=2,5$ м/с $A=632 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$.

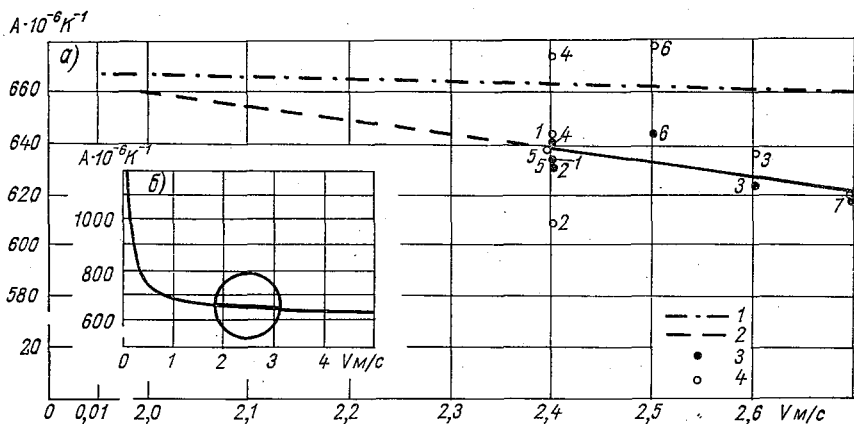


Рис. 4. Экспериментальная связь между психрометрическим коэффициентом и скоростью аспирации $A=f(V)$ для диапазона 2,0—2,7 м/с (а) и 0—5 м/с (б).

а) 1 — для неаспирационного психрометра, 2 — для аспирационного, 3 — данные по прибору ГТР, 4 — то же К-2Д; цифры у точек 3 и 4 — номера приборов по табл. 2.

Погрешность описания связи между психрометрическим коэффициентом и скоростью аспирации здесь складывается из погрешности приближения методом наименьших квадратов по четырем заданным точкам, погрешности от замены нелинейной зависимости линейной и погрешности экстраполяции за пределы экспериментальной области определения. Расчетным путем можно показать, что погрешность определения параметров прямой или линейной зависимости по четырем точкам не превышает 2%. Погрешность вследствие замены нелинейной зависимости линейной и экстраполяции можно оценить, приняв за истинное уравнение $A=f(V)$, полученное в [6], и проведя секущую через точки на ней, соответствующие 2,4 и 2,7 м/с. Сопоставляя ординаты точек на кривой $A=f(V)$ и секущей для $V=2$ м/с, получим, что они отличаются всего лишь на

0,14%, причем значение A при линейной аппроксимации оказывается ниже.

Таким образом, найденное значение психрометрического коэффициента для скорости аспирации 2 м/с с точностью до единиц совпадает со значением, принятым для этой скорости в отечественных психрометрических таблицах. Причиной же ранее указанного поведения систематической погрешности психрометров и разброса A_i заключается в отличии V_i между собой.

Существенное отличие психрометрических коэффициентов A_i от принятого значения в психрометрических таблицах обусловлено тем, что скорость аспирации у всех экземпляров выборки больше приведенной в психрометрических таблицах по крайней мере на 0,4 м/с. Устанавливаемое в ГОСТ на психрометр ограничение на скорость аспирации распространяется только на нижний предел (2 м/с), поэтому изготовитель на законных основаниях допускает скорость аспирации заведомо большую чем 2 м/с.

Такое положение, как теперь ясно, приводит к значительному отличию среднего значения психрометрического коэффициента по всей совокупности экземпляров психрометров (оно было предварительно оценено и составило $632 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$) от принятого в таблицах.

Значение $A = 632 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ было получено как результат осреднения значений коэффициента для четырех экземпляров (условные №№ 1, 2, 4, 5) психрометров, у которых скорость аспирации одинакова (наименьшая из всех) и равна 2,4 м/с.

Используя данные табл. 2, по формуле

$$\sigma_i = \frac{\sum_{j=1}^{j_m} \sum_{f=1}^{f_m} \sum_{i=1}^{i_m} (A_{jfi} - A)}{k - 1} \quad (14)$$

можно оценить среднее квадратическое отклонение средних значений психрометрических коэффициентов каждого психрометра, полученных для всего диапазона температуры и влажности. Оно оказывается равным $\sigma_i = 14,7 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$. Среднее квадратическое отклонение погрешности определения среднего значения психрометрического коэффициента при этих условиях составляет

$$\sigma_A = \frac{\sigma_i}{\sqrt{f_m j_m i_m}} = \frac{14,7}{\sqrt{48}} \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1} = 2,12 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}. \quad (15)$$

Задаваясь доверительной вероятностью $P = 0,997$, получим доверительный интервал найденного значения $A = 636 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$, который равен $(2,12 \cdot 3) \cdot 10^{-6} = 6,4 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$.

Таким образом, психрометрический коэффициент, определенный из результатов сравнения четырех психрометров, имеющих одинаковую скорость аспирации 2,4 м/с, с образцовыми средствами измерений влажности в диапазоне температуры от 5 до 35°C и относительной влажности от 30 до 80%, равен

$$A_{|2,4} = (636 \pm 6,36) \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}, \quad (16)$$

т. е. указанное значение определено с относительной погрешностью, не превышающей 1%.

Значение психрометрического коэффициента, полученного экстраполяцией на скорость 2 м/с, составит

$$A_{12,0} = (660 \pm 6,6) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}. \quad (17)$$

Отметим, что верхнее значение из этого интервала для A равно $666,6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, совпадает со значением психрометрического коэффициента ($667 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), принятым в психрометрических таблицах для аспирационных психрометров в ряде зарубежных стран, например, ссылка в упоминавшейся работе [8].

Ранее полученные для экспериментальных психрометров значения психрометрического коэффициента и введение поправок на выступающий столбик ртути не достигают табличного значения [9, 10, 11]. Отметим, что в работе [10] по результатам исследования одного экземпляра психрометра $A = 631 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, при этом указывается, что измеренная скорость аспирации составила $V = 2,5 \text{ м/с}$. Используя только что полученное уравнение связи между психрометрическим коэффициентом и скоростью для 2 м/с, имеем $A = 660 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. В остальных упомянутых работах, к сожалению, сведений о скорости аспирации не содержится, что лишает возможности оценить полученные в них значения A в переводе на скорость 2 м/с.

Принимая во внимание зависимость относительной влажности психрометра от погрешности определения A можно сделать заключение, что для наиболее часто встречающегося отклонения психрометрического коэффициента $\Delta A = -30 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ составляющая систематической погрешности может достигнуть 10% при относительной влажности 20% и температуре 20°C. Такова оценка относительной погрешности температуры, причиной которой служит только несоответствие реальной скорости аспирации той, что принята в таблицах.

Оценим индивидуальную систематическую погрешность психрометра, вызванную остаточным разбросом значений психрометрического коэффициента для четырех психрометров с одинаковой скоростью аспирации 2,4 м/с (№№ 1, 2, 4, 5). Этот разброс, по-видимому, связан с другими индивидуальными свойствами отдельных экземпляров психрометра, характеризующим его

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^4 (A_i - A)^2}{4 - 1}} = 4,24 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}. \quad (18)$$

Поскольку эта характеристика получена на материале четырех значений A_i , то следует использовать распределение Стьюдента—Фишера и при доверительной вероятности $P = 0,99$ в этом случае $z = 5,84$, откуда границы доверительного интервала, в котором могут находиться индивидуальные значения психрометрического коэффициента, составляют $\pm 24,66 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

Таким образом, составляющая предела допускаемой систематической погрешности психрометра, определяемая максимальным отклонением психрометрического коэффициента в совокупности экземпляров промышленной серии от среднего, может достигать, согласно зависимости $\delta\varphi$ от ΔA , 6% при 20% относительной влажности. Эта погрешность систематическая для каждого экземпляра, но имеет случайный характер для совокупности приборов, т. е., определив экспериментально значения психрометрического коэффициента, можно в дальнейшем рассчитать систематическую погрешность для этого экземпляра в случае отклонения полученного значения от табличного. Однако выполнить это практически затруднительно, поскольку дисперсия A в группах больше дисперсии A для отдельных экземпляров.

Таким образом, учитывая погрешность определения A и его разброс по совокупности психрометров, для оценки предела допускаемой погрешности психрометра, случайной по своему характеру, можно воспользоваться полученной ранее зависимостью $\delta\varphi$ для $\Delta A = 30$. Этой же зависимости подчиняется среднее значение систематической погрешности выпускаемых в настоящее время психрометров, которая имеет положительный знак, т. е. все психрометры завышают измеряемое значение относительной влажности и это завышение может достигать 10% при 10% относительной влажности и температуре 20°C.

Введение поправки на выступающий столбик ртути приводит к выявленной систематической погрешности с положительным знаком (т. е. психрометры также завышают измеряемое значение). Эта погрешность при 10% относительной влажности может достигать 5%.

Неприменение введения поправки на скорость воздушного потока, обдувающего психрометр, вызывает систематическую погрешность, нарастающую при скоростях потока до 7 м/с и в среднем при положительном знаке достигающую 5% измеряемого значения.

Следовательно, игнорирование этих составляющих способно вызвать суммарную относительную систематическую погрешность (сложение здесь арифметическое!) до 20% измеряемого значения.

Суммируя предел допускаемой случайной погрешности (20%) при влажности 10% и температуре 20°C со значением суммарной систематической погрешности (20%) при тех же условиях, получаем, что относительная погрешность психрометров (без учета других возможных перечисленных источников) может достигать 40%.

Выводы и рекомендации

1. Непосредственным сличением с образцовыми средствами измерения определены погрешности психрометра. Зависимость погрешности психрометра от относительной влажности (в процентах) описывается формулой

$$\delta\varphi = \pm [2 + 4,34 |(100/\varphi) - 1|]$$

(для $t = 10^\circ\text{C}$) в соответствии с ГОСТ 13 600—68.

2. Проведен анализ результатов 7000 отдельных сравнений с применением методов математической статистики. Выяснено, что зависимость психрометрического коэффициента от температуры и влажности в пределах точности эксперимента отсутствует.

3. Так как при расчетах использовалась психрометрическая формула Ферреля, то предыдущий вывод подтверждает ее правильность, в связи с чем ее следует и в дальнейшем использовать в качестве номинальной статической характеристики психрометра.

4. Обнаружена гораздо более сильная зависимость психрометрического коэффициента от скорости аспирации у различных экземпляров психрометров, чем предполагалось до сих пор. Для скорости аспирации в пределах 2—3 м/с эта связь описывается уравнением

$$A = [660 - 56(V - 2)] \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1},$$

коэффициенты которого определены методом наименьших квадратов по экспериментальным данным.

5. Для скорости аспирации 2 м/с найденные значения психрометрического коэффициента $[660 \pm 7] \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ практически совпадает с принятым в психрометрических таблицах для этой скорости $662 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$.

6. Поскольку в нормативной документации на психрометр не указывается верхнее предельное допустимое значение скорости аспирации, то это может привести при выпуске приборов из производства к завышению указанного параметра относительно номинального значения 2 м/с, что приведет, в свою очередь, к неоправданному завышению погрешности психрометра. В частности, для исследовавшихся приборов среднее значение скорости аспирации составило 2,4 м/с, чему соответствует значение психрометрического коэффициента $636 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$.

7. Отличие реального значения психрометрического коэффициента от номинального способно привести к средней относительной систематической погрешности всех экземпляров психрометров, достигающей 10% при относительной влажности 20%.

8. Для доверительной вероятности 0,99 определены границы доверительного интервала измерения психрометрического коэффициента для группы психрометров, обладающих одинаковой скоростью аспирации $\pm 24,7 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$.

9. Суммарная систематическая относительная погрешность психрометра может достигать 20%, что обосновывает необходимость принятия мер по устранению ее источников или введения поправок.

10. Для исключения погрешности, связанной с отличием значения психрометрического коэффициента выпускаемых психрометров, следует провести конструктивно-технологические мероприятия, направленные на регулировку скорости аспирации при изготовлении и ее стабилизацию при эксплуатации в диапазоне ее изменения от 2 до 2,2 м/с.

11. При первичной и периодической проверке необходимо нормировать верхнюю границу значений скорости аспирации, установив ее не более чем 2,2 м/с.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Леонова Л. И., Ядова Л. А., Климин Н. Н. и др. Экспериментальные исследования аспирационных психрометров. См. настоящий сборник.
2. Долинский Е. Ф. Обработка результатов измерений. М., Изд-во стандартов, 1973, 190 с.
3. Кудряшова Ж. Ф., Рабинович С. Б., Резник К. А. Методы обработки результатов наблюдений при измерениях. Тр. метрологических институтов СССР, 1972, вып. 134 (194), 116 с.
4. ГОСТ 13600-68. Средства измерений. Классы точности. Общие требования. М., Изд-во стандартов, 1976, 10 с.
5. Психрометрические таблицы. Л., Гидрометеиздат, 1972, 235 с.
6. Зворыкин Н. А. Исследования о психрометре.— Уч. зап. Моск. ун-та, вып. 5, 1884. 54 с.
7. ГОСТ 6353-52. Психрометр аспирационный. М., 1959, 6 с.
8. Folland C. K. The psychrometer coefficient of the wet—bulb thermometers, used in the meteorological off ice large thermometer screen. Meteor. off. scient. Paper 1977, N 38, 38 p.
9. Алянчикова Г. Н., Доронин М. А. Некоторые погрешности аспирационного психрометра при низких значениях относительной влажности.— Тр. НИИ ГМП, 1968, вып. 19, с. 27—33.
10. Усольцев В. А. О величине психрометрического коэффициента аспирационного психрометра.— Тр. НИИ ГМП, 1969, вып. 22, с. 64—74.
11. Леонова Л. И., Резников Г. П., Роголев Ю. В. Статистические оценки погрешностей образцовых средств измерений влажности воздуха поверочные схемы Гидрометслужбы.— Тр. ГГО, 1975, вып. 345, с. 77—83.

Г. П. Резников, Ю. В. Роголев

АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА ПОВЕРКИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Обеспечение единства и правильности измерений достигается проверкой средств измерений, при которой метрологическим органом осуществляется определение погрешностей средства измерений и установление его пригодности к применению. Основным способом определения погрешности средства измерений является сравнение его показаний с показаниями образцового средства измерений, называемое сличением средства измерений (1).

В общем случае результат измерения поверяемым и образцовым средством измерения физической величины, меняющейся во времени по произвольному закону, представляет собой комбинацию истинного значения x_n этой величины, погрешности, вызываемой отклонением характеристики статического преобразования (статической характеристики) от номинальной (статической) $\Delta_{ст}$ погрешности, от влияющих факторов $\Delta_{вл}$ и динамической погрешности $\Delta_{дин}$; предполагается, что погрешность, вызываемая наблюдателем, имеющая другую природу, сюда не включена.

Таким образом, результаты измерения одной и той же величины поверяемым средством измерения x_n и образцовым x_o соответственно равны:

$$x_n = x_n + \Delta_{п ст} + \Delta_{п вл} + \Delta_{п дин}; \quad (1)$$

$$x_o = x_n + \Delta_{о ст} + \Delta_{о вл} + \Delta_{о дин}. \quad (2)$$

Поскольку законы образования суммарной погрешности не ограничиваются простым алгебраическим сложением, то здесь знаку плюс (+) придается смысл композиции составляющих, что сохраняет общность рассуждений, одновременно упрощая их.

Для того чтобы на входы поверяемого и образцового средств измерений воздействовало одно и то же значение физической величины, принимают меры по обеспечению пространственной однородности среды и синхронности наблюдений.

В результате отдельных сличений получают разности

$$\delta_i = x_n - x_o = (\Delta_{п ст} - \Delta_{о ст}) + (\Delta_{п вл} - \Delta_{о вл}) + (\Delta_{п дин} - \Delta_{о дин}). \quad (3)$$

Принимая во внимание конкретный вид функции влияния, или, более упрощенно, зависимость дополнительной погрешности от влияющего фактора, $\Delta_{0\text{ вл}}$ и $\Delta_{\text{п вл}}$, исключают поправками или сводят к минимуму путем устранения воздействия влияющих факторов (их стабилизацией, экранированием). В наиболее благоприятном частном случае, когда функции влияния у поверяемого и образцового средства измерения одинаковы, эта разность тождественно равна нулю при любых значениях влияющих факторов, что существенно упрощает процедуру поверки. Исключение влияния динамических погрешностей поверяемого и образцового средств измерения при обычной поверке достигается сведением их к нулю за счет стабилизации задаваемого при поверке значения физической величины в специальных поверочных установках (термостатах, гигростатах, баростатах, аэродинамических трубах).

Из изложенного следует, что при поверке должны определяться значения δ_i

$$\delta_i = \Delta_{\text{п ст}} - \Delta_{0\text{ дин}}. \quad (4)$$

В часто встречающемся случае $\Delta_{0\text{ ст}} < \Delta_{\text{п ст}}$, поэтому $\Delta_{\text{п ст}} \approx \delta_i$. Далее эти значения δ_i используются для оценки погрешности поверяемого прибора и для заключения о соответствии его допуску на эту погрешность.

Несмотря на то, что поверка в статических условиях стала традиционной [2], задача определения статической погрешности средства измерения в нестатических условиях приобретает все большую актуальность. Это связано с рядом недостатков, присущих системе существующей поверки: сложностью и большой стоимостью как поверочных установок, так и их эксплуатации, необходимостью частой длительной выдержки поверяемых средств при заданном значении величины, что замедляет процесс поверки, необходимостью нарушать режим работы измерительных систем, подлежащих поверке в связи с демонтажем их и перевозкой к месту расположения поверочных установок, что особенно неблагоприятно сказывается на эксплуатации расширяющейся сети автоматизированных (наземных и корабельных) систем сбора и первичной обработки метеорологической информации.

В литературе описаны как наблюдения, так и попытки сличения метеорологических приборов непосредственно в открытой атмосфере, когда, несмотря на самый тщательный анализ и учет влияющих факторов, указанные разности δ_i сильно отличались от значений, полученных в статических условиях [3].

По-видимому, подобные результаты привели к отрицанию возможности поверки в естественных условиях открытой атмосферы [4, с. 48] несмотря на то, что в действительности поверка средств измерения ряда метеорологических элементов (метеорологическая дальность видимости, потоки солнечной радиации) производится в условиях меняющейся во времени величины. В частности, поверка средств измерения давления, даже находящихся на высших ступенях поверочной схемы, осуществляется преимущественно при значениях давления открытой атмосферы [2, с. 99].

Причины, вызывающие большие погрешности такой поверки при попытках выполнить ее для средств измерения других метеорологических параметров, заключается в появлении динамических погрешностей образцового и поверяемого средств измерений, т. е. после учета влияющих факторов:

$$\delta_i = (\Delta_{\text{п ст}} - \Delta_{\text{о ст}}) + (\Delta_{\text{и дин}} - \Delta_{\text{о дин}}). \quad (5)$$

Из последней формулы видно, что для определения статической погрешности при поверке в условиях меняющейся величины необходимо знать значения $\Delta_{\text{п дин}}$ и $\Delta_{\text{о дин}}$. Из теории динамических измерений известно, что значение динамической погрешности зависит от динамических свойств средства измерения и характера изменения во времени измеряемой физической величины. Способы поверки, предложенные ранее для ускорения процесса поверки датчиков с большой инерцией, предусматривают задание величины, описываемой детерминированной функцией времени (например, их линейной), с последующим введением поправки для исключения динамической погрешности [7, 8]. Непосредственное распространение этого способа на более сложные случаи становится затруднительным. В открытой атмосфере изменение величины носит случайный характер и описывается случайной функцией времени, параметры которой трудноопределимы и также носят вероятностный характер. Несколько проще обстоит дело с динамической характеристикой средства измерения, так как стандарт [6] предусматривает нормирование ее функцией динамического преобразования, обобщающей понятия передаточной, переходной, импульсной весовой, амплитудно- и фазочастотной характеристик. Оценке динамических погрешностей измерения метеорологических параметров посвящено большое количество работ, из которых к наиболее обстоятельным следует отнести [9, 10, 11, 12].

В обзоре [11] рассматриваются 12 случаев различных сочетаний значений периодов осреднения измеряемой величины, интервала осреднения по прибору и постоянной времени (для прибора, описываемого линейным дифференциальным уравнением 1-го порядка, т. е. инерционным звеном первого порядка).

Среднее квадратическое значение разности между мгновенным значением метеорологического параметра и результатом измерения таким прибором представлено в виде

$$\bar{\gamma}^2 = R_f(0) - \frac{1}{T} \int_0^{\infty} e^{-\frac{\tau}{T}} R_f(\tau) d\tau, \quad (6)$$

где $R_f(\tau)$ — корреляционная функция процесса, τ — интервал корреляции, T — постоянная времени прибора.

Если даже известен вид корреляционной функции, например

$$R_f(\tau) = R_f(0) e^{-\alpha |\tau|}, \quad (7)$$

то необходимо определить дисперсию процесса $R_f(0)$ и показатель затухания корреляционной функции α .

Указанная погрешность в этом частном случае выражается формулой (после подстановки и вычисления интеграла)

$$\bar{\gamma}^2 = \frac{\alpha T}{1 + \alpha T} R_f(0). \quad (8)$$

Попутно следует пояснить, почему оказалось возможным осуществлять поверку средств измерения давления в естественных условиях. Дисперсия показаний прибора $D_{\text{приб}}$ оказывается меньшей, чем дисперсия измеряемой величины процесса $D_{\text{проц}}$ и, например, для корреляционной функции упомянутого вида и прибора, представляемого инерционным звеном первого порядка

$$D_{\text{приб}} = \frac{D_{\text{проц}}}{1 + \alpha T}. \quad (9)$$

Если значение $D_{\text{проц}}$ само по себе невелико, а α и T имеют большие значения, то $D_{\text{приб}} < D_{\text{доп}} < D_{\text{проц}}$ (где $D_{\text{доп}}$ — допускаемое значение дисперсии при измерениях). Такой случай бывает при измерении давления, при этом нужно уточнить, что ртутные барометры могут представляться звеном второго порядка (колебательным или инерционным).

Помимо рассмотренных трудностей, возникающих при поверке в естественных условиях, преодоление которых направлено на увеличение ее точности, необходимо обеспечить и надежность результатов поверки, достигаемую обычно проведением ее согласно техническим условиям по всему диапазону измерения прибора.

Сличение барометров в условиях естественной атмосферы производят, например, при нескольких отличающихся значениях давления, которых приходится иногда ожидать длительное время.

Целью данной работы является рассмотрение возможности уменьшения погрешности поверки средств измерения всех метеорологических параметров в естественных условиях, т. е. в открытой атмосфере, непосредственно на местах их эксплуатации, и увеличение надежности поверки в таких условиях.

Указанная цель в первой своей части достигается следующим образом. Поскольку основной задачей поверки является определение статической погрешности, то, вместо того чтобы в формуле (5) при определении этой погрешности вводить поправку на отличие динамической погрешности поверяемого прибора от динамической погрешности образцового, можно потребовать выполнения равенства

$$\Delta_{\text{п дин}} - \Delta_{\text{о дин}} = 0. \quad (10)$$

Для выполнения этого условия необходимо и достаточно, чтобы на вход поверяемого и образцового средств измерения подавалось одно и то же значение величины и чтобы эти средства измерения имели идентичные функции динамического преобразования.

Наиболее эффективным средством удовлетворения этого требования был бы учет его в процессе разработки рабочих (поверяемых) и образцовых средств измерения, что на практике возможно лишь в ограниченном числе частных случаев, поскольку номенкла-

тура рабочих приборов намного шире, чем образцовых, и разработка их производится в разное время. Кроме того, в процессе эксплуатации может потребоваться произвести изменение функции динамического преобразования (в зависимости от диапазона измерения и некоторых влияющих факторов [13, 14, 15].

Отсюда следует, что практически необходимо предусмотреть средства для такого изменения (корректирующий элемент). Динамические свойства корректирующего элемента могут быть определены по известным функциям динамического преобразования поверяемого и образцового средства измерения, например, по их передаточным функциям. Тогда для корректирующего элемента, включаемого последовательно с образцовым средством, исходя из условия идентичности передаточных функций поверяемого и скорректированного образцового средств измерений $\omega_o(P) \equiv \omega_n(P)$, передаточная функция будет выражена так:

$$\omega_{к.э}(P) = \frac{\omega_n(P)}{\omega_{о.н.к}(P)}, \quad (11)$$

где $\omega_n(P)$, $\omega_{о.н.к}(P)$ и $\omega_{к.э}(P)$ — соответственно передаточные функции поверяемого, некорректированного образцового средства и корректирующего элемента. Располагая сведениями о $\omega_{к.э}(P)$, можно подобрать физическую реализацию корректирующего элемента, который может быть выполнен в виде устройства (демпфера) [15, 16, 17 и 18], устанавливаемого перед входом образцового средства измерения или в виде сглаживающего устройства на электрическом выходе того же средства измерения [19, 20].

Менее очевидной кажется, на первый взгляд, возможность корректирования передаточной функции образцового средства измерения, когда оно более инерционное, чем поверяемое. Однако имеются средства восстановления истинного хода измерения величины по результатам преобразования средством измерения (см., например, [21]). Рассмотрим наиболее распространенный случай, когда динамические свойства образцового средства измерения описываются дифференциальным уравнением первого порядка или, иначе говоря, его можно представить апериодическим звеном первого порядка

$$T \frac{dx_{\text{вых}}(t)}{dt} + x_{\text{вых}}(t) = kx_{\text{вх}}(t), \quad (12)$$

где $x_{\text{вх}}(t)$ — входная величина, $x_{\text{вых}}(t)$ — выходная величина, T и k соответственно постоянная времени и коэффициент передачи средства измерения.

Из уравнения (12) видно, что для получения истинного хода величины $x_{\text{вх}}(t)$ необходимо к результату преобразования входной величины средством измерения добавить произведение первой производной от выходного процесса на постоянную времени звена. Располагая же сигналом, пропорциональным мгновенному значению входной величины, нетрудно преобразовать его, подавая на вход корректирующего устройства с передаточной функцией, совпадающей с передаточной функцией поверяемого средства измерения.

При практическом приведении функции динамического преобразования образцового средства измерения к функции динамического преобразования поверяемого средства измерения нет необходимости в точных сведениях о передаточных функциях средств измерения и корректирующего элемента, поскольку окончательная идентификация производится экспериментально воздействием на орган регулирования корректирующего элемента до совпадения переходных функций или кривых разгона поверяемого и образцового средств измерения. Экспериментальное получение записей этих кривых переходного процесса широко используется в области исследования систем автоматического регулирования [22, 23].

Поставленная цель во второй своей части (увеличение надежности поверки) достигается следующим путем. Поверка в стационарных условиях предусматривает определение погрешности по всему диапазону измерения величины от начального до конечного его значения, указанного в технических условиях на прибор или датчик (обозначим его $x_{н\text{ту}} - x_{к\text{ту}}$). Этот диапазон охватывает практически все значения, которые может принимать величина, даже маловероятные. Однако реальные предельные значения изменения величины зависят от конкретного климатического режима, в котором данный экземпляр средства измерения используется. Действительно, например, каждый из экземпляров анемометра при выпуске из производства должен градуироваться, а в дальнейшем и поверяться в аэродинамической трубе до значения скорости 40 м/с. Это делать, однако, бессмысленно, если он предназначен для эксплуатации, например, на Северо-Западе СССР — в Ленинградской, Псковской, Новгородской областях и Карельской АССР, где, по данным [24] (вып. 3, ч. III), вероятность значений скорости ветра уже в пределах 18—20 м/с составляет десятки доли процента, а наиболее вероятными являются 2—5 м/с.

Очевидно, что этот диапазон измерения величины в естественных условиях годового хода метеорологического элемента для конкретного региона, ограниченный названными предельными значениями (обозначим его $x_{н\text{ег}} - x_{к\text{ег}}$) находится внутри диапазона $x_{н\text{ту}} - x_{к\text{ту}}$. Отсюда следует важный предварительный вывод об экономической целесообразности поверки средства измерения по всему диапазону, если известны конкретные климатические условия эксплуатации. Организация поверки в естественных условиях с охватом всего диапазона $x_{н\text{ег}} - x_{к\text{ег}}$, когда наименьшее и наибольшее значения величины (тесно связанные с ее годовым ходом) разделены временным промежутком в несколько месяцев, неприемлема. Возможен другой путь увеличения надежности поверки в естественных условиях, основанный на полном или частичном охвате указанного диапазона. Он базируется на том, что суточная амплитуда (обозначим ее $x_{н\text{ес}} - x_{к\text{ес}}$) изменения величины может быть весьма близкой по значению к годовой амплитуде для данного климатического района, т. е. $x_{н\text{ес}} - x_{к\text{ес}}$ находится внутри диапазона $x_{н\text{ег}} - x_{к\text{ег}}$, и есть определенная вероятность, что может быть даже совпадение $x_{н\text{ес}}$ с $x_{н\text{ег}}$, а $x_{к\text{ес}}$ с $x_{к\text{ег}}$, или иначе минимум суточного хода величины

как угодно близко приближается к возможному минимуму годового хода, а максимум суточного хода — к максимуму годового (для температуры это, естественно, исключено). Учитывая, что суточная амплитуда изменения величины неодинакова в течение года, следует выбрать такой период, в котором она принимает наименьшее значение. Для каждого конкретного пункта или района, пользуясь [24], можно найти такой период для любой метеорологической величины. Например, для приведенного климатического района наибольшая амплитуда суточного хода ветра приходится на летние месяцы. Так, средние многолетние для суточного хода скорости ветра в Ленинграде (аэропорт) дают наибольшее значение амплитуды 3,2 м/с (минимальная средняя в 23 ч 2,6 м/с и максимальная средняя 5,8 м/с в 15 ч), которое приходится на июнь ([24], вып. 3, ч. III, табл. 11, с. 254). Поверенный таким образом анемометр можно считать поверенным по всему диапазону измерения скорости ветра в данном месте, поскольку вероятность того, что скорость ветра будет иметь в течение года значение, не превышающее 7 м/с, составляет 97,6% при вероятности скорости от 8 до 9 м/с 1,9% и больших чем 9 м/с 0,5% (там же, табл. 5, с. 156).

Что касается температуры, то это — единственный метеорологический элемент, для которого, естественно, не существует месяца с диапазоном изменения в течение суток, совпадающим с диапазоном годовых изменений. Однако, принимая во внимание, что подавляющее большинство средств измерения температуры воздуха имеет линейные градуировочные характеристики, достаточно произвести поверку не по всему диапазону, а, по крайней мере, в точках, находящихся внутри диапазона $x_{н\text{ег}} x_{к\text{ег}}$ и отстоящих друг от друга на расстоянии $x_{н\text{ес}} x_{к\text{ес}}$, при этом желательно, чтобы $x_{н\text{ес}} x_{к\text{ес}}$ находился в районе середины $x_{н\text{ег}} x_{к\text{ег}}$ и по величине был бы достаточно большим. Последние же два условия выполняются аналогичным выбором по климатическому справочнику.

Поверка средств измерения влажности в естественных условиях может быть проведена практически по всему диапазону, причем оказывается, что для большинства районов СССР амплитуда суточного хода совпадает с амплитудой годового хода относительной влажности преимущественно в октябре.

Для наглядного сопоставления годового и суточного хода температуры и влажности была построена табл. 1, в которой представлены данные по климатическим областям, выделяемым по признакам, являющимся определяющими для рассматриваемой задачи, т. е. по степени увлажнения и температуре воздуха в течение года. Степень увлажнения и температура условно оцениваются по трем градациям: увлажнение — влажный (если средний многолетний минимум влажности больше 50%, а максимум 95%), умеренный (если минимум влажности больше 50%, а максимум меньше 95%), сухой (если минимум меньше 50%); температура — теплый (если максимум больше 25°C, а минимум больше -20°C), умеренный (если максимум меньше 25°C, а минимум больше -10°C), холодный (если минимум меньше -20°C). Затем брались сочетания этих

Амплитуда A температуры $t^{\circ}\text{C}$ и влажности $\varphi\%$

Станция	№ выпуска [24]	Климат	Годовые средние						Месяц		$t_{\text{ср. сут}}$	$A_{t_{\text{сут}}}$	$A_{t_{\text{сут}}}/A_{t_{\text{год}}}$
			t°			φ			охрана всего диапазона φ	Сопадения $t_{\text{ср}}$ с середи- ной диапазона			
			мин.	макс.	макс.	мин.	макс.	макс.					
Тикси	24	Холодный влажный	-33,4	9,4	90	90	любой	апрель	-18,0	-5,2	1/8		
Якутск	24	Холодный сухой	-43,9	23,3	50	78	октябрь	"	-7,5	11,2	1/6		
Кобулетти (Чер- номорское побе- режье Кавказа)	14	Теплый влаж- ный	2,6	25,5	70	92	"	октябрь	15,4	7,7	1/4		
Целиноград	18	Теплый сухой	-18,4	25,4	35	82	"	апрель	2,1	8,8	1/5		
Лопатка (Камчат- ка)	27	Умеренный влажный	-7,1	10,3	80	95	любой	октябрь	5,2	1,2	1/5		
Свердловск	9	Умеренный сухой	-16,3	20,9	45	85	октябрь	апрель	2,6	7,5	1/5		

градаций по температуре и влажности и подбирались климатические районы из справочника [24], отвечающие этим сочетаниям. Таким путем оказалось возможным охватить наиболее типичные районы СССР с точки зрения диапазона измерения температуры и влажности.

В табл. 1 минимальные и максимальные значения величин взяты из таблиц суточного хода как средние за много лет. Ввиду того, что эти средние значения получены в результате осреднения данных за одни и те же часы суток, реально могут встречаться значения, например, температуры, больше чем максимальные средние и меньше чем минимальные средние. Количество таких отклонений можно было бы оценить исходя из данных (в справочнике) о повторяемости (отражающей закон распределения) различных значений, что позволяет оценить вероятность разных значений суточных амплитуд, больших чем средние многолетние и, следовательно, оценить, как часто, например, в течение суток в октябре на мысе Лопатка амплитуда превысит $1,2^{\circ}\text{C}$.

Учет этой вероятности в сочетании с принятием во внимание прогноза погоды (т. е. синоптической информации) позволяет значительно увеличить эффект поверки в естественных условиях по диапазону измерения метеорологического элемента.

Поверка изложенным способом пригодна для средств измерений любых метеорологических параметров, а также средств измерений меняющихся во времени концентраций примесей в атмосфере [25]. Привлечение климатологических и синоптических сведений [26], как ясно из изложенного, позволяет оценить или непосредственно увеличить надежность поверки. Но в ряде случаев вследствие того, что оптимальные месяцы поверки для разных метеорологических элементов не совпадают, могут возникнуть организационные трудности. В таких случаях совсем не обязательно стремиться к выполнению поверки в сроки (месяцы), получаемые из климатических данных.

Согласно [27] все средства измерений при выпуске из производства подвергаются первичной поверке, а в дальнейшем в соответствии с установленными [28] межповерочными интервалами — периодической поверке. Периодическая поверка, проводимая в естественных условиях по предложенному способу, наряду с устранением существующих, упомянутых ранее, трудностей обеспечения единства измерений метеорологических параметров, способна дать большой экономический эффект, обусловленный исключением необходимости в сложных дорогостоящих труднотранспортируемых поверочных установках и демонтажа поверяемых средств измерения метеорологических элементов.

Еще ранее отмеченный другой технико-экономический эффект достигается благодаря следующей особенности системы поверки, основанной на описанном способе, которая, как и обычная система поверки, представляет собой совокупность образцовых средств измерения и методик поверки. Эта особенность заключается в том, что, в отличие от традиционной системы поверки, система,

основанная на предлагаемом способе, меняет свои параметры в зависимости от конкретных условий, настраивается на оптимум в смысле достижения максимальной надежности поверки и минимальной погрешности ее. Аналогичные по своему поведению системы называются адаптивными [29]. Таким образом, система поверки, основанная на предлагаемом способе, является адаптивной. Отмеченное свойство позволяет пользоваться при синтезе, анализе и оценке (в том числе и технико-экономической) такой системы поверки разработанными методами теории адаптивных систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Метрология. Термины и определения. ГОСТ 16263—70. М., изд. Стандартов, 1972. 52 с.
2. Руководство по поверке метеорологических приборов. Л., Гидрометеоздат, 1967, 419 с.
3. Алянчикова Г. Н. Об ошибках измерения температуры воздуха.— Труды НИИ ГМП, 1971, вып. 24, с. 48—59.
4. Фатеев Н. П. Методические основы поверки метеорологической аппаратуры.— В кн.: Методические основы автоматизированной системы метеорологических наблюдений. Л., Гидрометеоздат, 1971, 119 с.
5. Кавалеров Г. И., Мандельштам С. М. Введение в информационную теорию измерений. М. «Энергия», 1974, 374 с.
6. ГОСТ 8.009—72. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений. М., Изд. Стандартов, 1974. 16 с.
7. Эскин С. П. О методической погрешности приборов непосредственной оценки в динамическом режиме.— Тр. метрологических институтов СССР, вып. 97 (157), М.—Л., Изд. Стандартов, 1968, с. 30—33.
8. Резников Г. П. Динамический режим поверки первичных измерительных преобразователей с большой постоянной времени.— Тр. ГГО, 1972, вып. 280, с. 82—84.
9. Яглом А. М. Об учете инерции метеорологических приборов при измерениях в турбулентной атмосфере.— Тр. Геофизич. ин-та АН СССР, М., 1954, № 24, с. 112—162.
10. Каган Р. Л. К учету инерции прибора при метеорологических измерениях.— Изв. АН СССР, сер. геофиз., 1964, № 2, с. 37—41.
11. Шендерович И. М. Погрешности измерения гидрометеорологических элементов, представляемых случайными функциями.— Тр. НИИГМП, 1966, вып. 15, с. 40—58.
12. Персин С. М. Анализ погрешности нахождения средних по результатам дискретных опросов инерционного прибора.— Тр. ГГО, 1971, вып. 259, с. 149—176.
13. Рождественский Б. Г., Мануйлов К. Н. Некоторые вопросы развития методов метеорологических наблюдений.— В кн.: Информационные материалы по гидрометеорологическим приборам и методам наблюдений. М., Гидрометеоздат, 1972, № 49, с. 3—12.
14. Шендерович И. М. Анализ динамических характеристик метеорологических датчиков.— Тр. НИИГМП, 1973, вып. 29, с. 79—88.
15. Paul B., Mac Gready Jr. Dynamic response characteristics of meteorological sensors.— Bull. Americ Meteor. Soc., 1965, v. 46, No. 9, Sept., p. 533—538.
16. Луценко В. Ф. Коррекция динамических характеристик газоаналитического датчика с помощью быстродействующего устройства.— В кн.: Методы и приборы для анализа состояния вещества. Киев, «Техника», 1973, с. 79—89.
17. Вальковский В. Б., Каганов М. А. Способ автоматической корректировки динамических характеристик термометров сопротивления.— Авт. свид. № 463.012.— Бюл. «Открытия, изобретения, промышленные образцы и товарные знаки». 1975, № 9, с. 97.

18. Торочков В. Ю., Суражский Д. Я. Выбор постоянной времени демпфера для получения определенного направления ветра.— Тр. НИИГМП, 1968, вып. 18, с. 35—42.
19. Шукшунов В. Е. Корректирующие звенья в устройствах измерения нестационарных температур, М. «Энергия», 1970, с. 142.
20. Бесекерский В. А. Электрические сглаживающие устройства, Л., «Судостроение», 1964, с. 210.
21. Прол С., Хмурчик Л. Измерение мгновенных значений температуры.— Приборы для научных исследований, 1973, № 9, с. 219—220.
22. Балакирев В. С. Экспериментальное определение динамических характеристик промышленных объектов управления. М., «Энергия», 1967, 231 с.
23. Грановский В. А. Методы обработки экспериментальных данных при определении динамических характеристик средств измерений.— Метрология, 1975, № 1, с. 3—20.
24. Справочник по климату СССР. Ч. 1—5, вып. 1—34. Л., Гидрометеиздат, 1966.
25. Зайцев А. С., Ануфриев В. И. Статистический анализ результатов международных сравнений автоматических газоанализаторов.— Тр. ГГО, 1974, вып. 314, с. 72—81.
26. Гандин Л. С., Жуковский Е. Е. О рациональном использовании прогностической и климатологической информации при принятии решений.— Метеорология и гидрология. 1973, № 2, с. 18—26.
27. ГОСТ 8.002—71. Организация и порядок проведения поверки, ревизии и экспертизы средств измерений. М., Изд-во стандартов, 1971. 45 с.
28. Немировский А. С., Никонов В. В. Статистический метод установления межповерочных интервалов.— Измерительная техника, 1972, № 9, с. 29—32.
29. Цыпкин Я. З. Адаптация и обучение в автоматических системах. М., «Наука», 1968. 326 с.

ОБ ИМПЕДАНСАХ ГИГРОСТАТОВ И ГИГРОМЕТРОВ

Импеданс, существенно влияющий на корректность проведения процесса измерения и определения точностных характеристик результата измерения, является удобной обобщающей метрологической характеристикой. Его достоинства наглядно проявляются на примерах из области электрорадиоизмерений, в которой понятия входного и выходного импедансов используются с весьма давнего времени.

Обратимся к простейшему примеру — измерению э. д. с. E источника постоянного тока (меры э. д. с.) с помощью вольтметра (измерительного прибора). Как известно, одна из составляющих относительной погрешности измерений E в этом случае зависит от соотношения внутренних активных сопротивлений вольтметра R_v и источника R_n :

$$\delta = \frac{\Delta E}{E} = \frac{1}{1 + \frac{R_v}{R_n}}. \quad (1)$$

Этот пример является конкретизацией общей ситуации измерения значения меры измерительным прибором, в которой выходной импеданс меры $Z_{\text{вых}} = R_n$, а входной импеданс измерительного прибора $Z_{\text{вх}} = R_v$.

Таким образом, составляющая относительной погрешности определяется исключительно соотношением импедансов меры и измерительного прибора, что весьма существенно также и при построении многозвенной измерительной цепи, где выход предшествующего преобразователя нагружен на вход последующего.

Причина возникновения рассматриваемой погрешности заключается в принципиальной неизбежности затраты части энергии источника (меры) на получение информативного сигнала в процессе измерительного преобразования. Нетрудно убедиться, преобразуя, например, формулу (1), что δ прибора равна отношению суммарной мощности, рассеиваемой на всех компонентах измерительной цепи, к мощности, рассеиваемой на внутреннем сопротивлении источника.

В случае газоаналитических определений (измерения влажности воздуха можно рассматривать как их частный случай) концентрации какой-либо компоненты смеси газов и пара для формирования измерительного сигнала на выходе измерительного преобразователя неизбежно изменяется (увеличивается или уменьшается) масса анализируемой компоненты, аналогично затратам энергии в рассмотренном примере. Здесь имеются в виду измерительные преобразователи, действие которых основано на явлениях массо-переноса и массообмена.

Рассмотрим герметичную камеру гигростата, в которой расчетным методом (например, испарением известной массы воды в известный объем) задается значение абсолютной влажности. Тогда такая гигрокамера выступит в роли меры абсолютной влажности. Гигрометр, установленный в эту камеру, допустим, с целью его проверки, вследствие массообмена между его влагочувствительным элементом и гигрокамерой, будет изменять в ней влажность. При этом в зависимости от принципа действия гигрокамеры характер и степень этого влияния будут различными.

Так, гигрометр с сорбционно-деформационным влагочувствительным элементом увеличит или уменьшит количество водяного пара в гигрокамере в зависимости от влажности атмосферы, в которой он находился до установки в гигрокамеру. Психрометр вследствие непрерывного испарения воды, сопровождающего процесс измерения, естественно, будет увеличивать влажность в камере. Напротив, гигрометр кулонометрического типа, действие которого основано на непрерывном поглощении водяного пара из анализируемой атмосферы, будет уменьшать во времени влажность в камере.

Естественно, что результат измерения в этих случаях отягощен погрешностью, вызванной указанными явлениями. При этом из интуитивных соображений следует указание на связь между объемом камеры и массой пара, затрачиваемого на реализацию измерительного процесса в измерительном приборе. Пример численной оценки влияния гигрометра и гигрокамеры, основанный на анализе конкретных физических процессов, приведен, например, в [1].

Проведенные рассуждения показывают, что измерительные ситуации в случае газоаналитических измерений совершенно аналогичны, например, измерению э. д. с. источника с помощью вольтметра. А потому и для оценки составляющей относительной погрешности измерения влажности удобно использовать соответствующие характеристики, отражающие взаимное влияние меры (гигростата) и измерительного прибора (гигрометра), т. е. их импедансы. Сведения о значениях выходного импеданса гигростата и входного импеданса гигрометра позволили бы свести задачу оценки взаимного влияния этих измерительных устройств на погрешность измерения к расчету по приведенной ранее формуле.

Однако, несмотря на то, что в [2] даны стандартизированные определения входного и выходного импедансов, в теории и практике газоаналитических измерений отсутствуют работы по конкретизации этих понятий применительно к рассматриваемой области, по

размерности этой величины, размеру ее единицы, оценке численных значений. Такое положение, по-видимому, объясняется либо весьма абстрактным уровнем данного в [2] определения, либо с его направленностью на измерительные процессы, в которых используются потоки энергии, а не вещества.

Согласно [2], входной импеданс измерительного преобразователя — характеристика, определяющая реакцию входного сигнала на подключение измерительного преобразователя к источнику входного сигнала с фиксированным выходным импедансом.

Входной импеданс определяется как отношение обобщенной силы, действующей на входе измерительного преобразователя к обобщенной скорости, характеризующей процессы во входной цепи измерительного преобразователя. Выходной импеданс измерительного преобразователя (или меры) — характеристика измерительного преобразователя (меры), определяющая реакцию его выходного сигнала на подключение к его выходу фиксированной нагрузки. При этом ради строгости подхода следует отметить, что входы первичных измерительных преобразователей находятся не под воздействием сигналов об измеряемых величинах, а под воздействием самих величин.

Несмотря на установленный факт взаимного влияния параметров гигростатов и гигрометров на погрешность измерения, обращаясь к приведенным определениям, непосредственно трудно указать, что в этом случае принимать за обобщенную силу и скорость.

Для того чтобы раскрыть содержание понятия импедансов гигростатов и гигрокамер, обратимся к некоторым особенностям этих измерительных устройств.

С точки зрения оценки влияния гигрометра на влажность в гигростате, основным свойством последней следует считать его способность к самовосстановлению воспроизводимого значения параметра влажности. Поэтому все многообразие способов задания параметров влажности и основанных на них гигростатов, в которых воспроизведение этих значений достигается абсолютными (расчетными) методами, т. е. без использования образцовых гигрометров, можно объединить в две группы. Первая группа включает в себя гигростаты, в которых влажность задается путем полного испарения известной массы воды в предварительно полностью осушенную камеру известного объема. Гигростаты второй группы содержат элемент (конструктивно не всегда выделяемый отдельно) дозирования водяного пара в паровоздушную смесь, основанный на принципе термодинамического равновесия конденсированной и неконденсированной фаз воды или водных растворов.

В зависимости от принятой схемы связи гигрокамеры с устройством приготовления паровоздушного потока гигростаты второй группы образуют две подгруппы: с замкнутой и разомкнутой схемами. Примером гигростатов с замкнутой схемой может служить солевой гигростат или гигростат на методе двух температур с циркуляцией паровоздушной смеси, примером гигростатов с разомкнутой схемой служит гигростат на методе двух давлений.

Благодаря наличию устройства для непрерывного приготовления паровоздушной смеси гигростаты второй группы обладают (хотя и в разной степени) способностью к самовосстановлению заданного значения параметра влажности в гигрокамере, тогда как гигростаты первой группы таким свойством не обладают совсем. В связи с этим обозначим условно гигростаты первой группы КС (камеры статические), а второй — КД (камеры динамические). В дальнейшем для наглядности удобно будет воспользоваться электрическими аналогами (моделями) рассматриваемых объектов (гигростатов и гигрометров). Нетрудно убедиться в правомерности уподобления увлажненной статической камеры в установившемся режиме изолированному заряженному электрическому конденсатору. Тогда электрическим аналогом объема камеры является емкость C_k конденсатора, а электрическими аналогами общей массы, m_k водяного пара в камере и абсолютной влажности a_k в ней будут, соответственно, заряд q_k конденсатора и напряжение на нем U_k . Аналогом процесса увлажнения статической камеры путем испарения в ней известной массы воды или временной подачи в нее паровоздушной смеси от увлажнителя служит процесс зарядки конденсатора временным подключением его к источнику постоянного напряжения E_k . Естественной конечности процесса увлажнения во времени отвечает в электрической модели конечность процессов заряда, обусловленная наличием в цепи заряда активного сопротивления R_k . Природа неэлектрической величины, электрическим аналогом которой является R_k , связана, в частности, в процессах молекулярной или турбулентной диффузии водяного пара в атмосфере камеры. Из рассмотрения аналогии с очевидностью следует, что осушению камеры соответствует в ее электрической модели разряд конденсатора.

Группе динамических гигрокамер с точки зрения электрических аналогий отвечает схема, состоящая из C_k , R_k и E_k , образующих замкнутый контур.

Подобно тому, как способы абсолютного задания влажности оказалось возможным объединить в две группы, все многообразие типов гигрометров, действие которых основано на явлениях массопереноса, может быть подразделено также на две группы. Первая группа включает в себя гигрометры, действие которых основано на использовании обратимых процессов физической сорбции — десорбции водяного пара (гигрометры сорбционно-деформационные, сорбционно-резистивные, конденсационные и др.). В гигрометрах второй группы при измерении происходят необратимые процессы (в пределах системы влажочувствительный элемент — анализируемая среда за полный цикл измерения). Эти процессы выражаются в виде непрерывной конденсации, испарения, химической сорбции (соответственно, конденсационно-гравиметрические гигрометры, психрометры кулонометрические). Рассмотренная систематизация гигрометров произведена по признаку характера и степени влияния их на анализируемую среду. Поток пара между гигрометрами первой группы и анализируемой смесью не равен нулю только

в течение переходного процесса, тогда как он имеет всегда нулевое значение даже в установившемся режиме для гигрометров второй группы. Поэтому (условно) первую группу можно обозначить ГС (гигрометры статические), а вторую — ГД (гигрометры динамические).

Принимая во внимание ранее упомянутые свойства ГС и ГД, можно установить их электрические модели. Для ГС такой моделью служит цепочка из последовательно соединенного активного резистора R_T и конденсатора C_T . Емкость C_T в этой модели отражает способность гигрометра удерживать поглощенную массу водяного пара в установившемся режиме, а сопротивление R_T является аналогом параметра гигрометра, характеризующего интенсивность про-

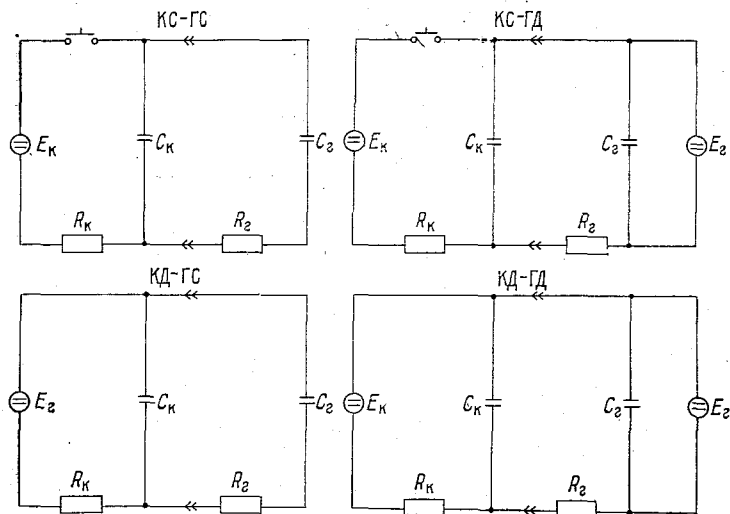


Рис. 1. Электрические аналоги гигростатов и гигрометров.

цесса сорбции—десорбции в переходном режиме. Попутно следует заметить, что произведение $R_T C_T$ отражает динамические свойства гигрометра. Отмеченные свойства гигрометров второй группы ГД создавать (генерировать) поток водяного пара и при установившемся режиме, в электрической модели, естественно, может быть отражено введением в нее генератора э. д. с. постоянного тока E_T .

Любой из гигрометров может быть установлен в гигрокамеру, принадлежащую к любой из двух групп. Этому соответствует присоединение к электрической модели гигрокамеры электрической модели гигрометра. В результате сочетаний электрических аналогов двух групп гигрокамер и двух групп гигрометров получается четыре схемы, приведенные на рис. 1. На них указаны все описанные элементы схем аналогов, при этом осушающему действию гигрометров КД соответствует встречное включение E_K и E_T .

Анализируя распределения потенциалов для установившихся режимов в этих четырех схемах, можно найти выражения для отно-

сительных погрешностей δ как отношение изменения напряжения на C_k , вызванного подключением схемы-аналога гигрометра, к первоначальному напряжению (до подключения). Для δ каждой из четырех комбинаций аналогов (схем) гигрокамера-гигрометр получены следующие выражения:

Гигрокамера	Гигрометр	
	ГС	ГД
КС	$\left(1 + \frac{C_k}{C_r}\right)^{-1}$	$\frac{1}{R_r C_k} \frac{E_r}{E_k} t$
КД	0	$\left(1 + \frac{R_r}{R_k}\right)^{-1} \left(1 - \frac{E_r}{E_k}\right)$

(Здесь t — время).

Из полученных результатов следует, что существует очень благоприятное сочетание КД—ГС, при котором погрешность из-за несогласования рассматриваемых параметров (импедансов) гигрокамеры и гигрометра в установившемся режиме тождественно равна нулю. Но имеется сочетание КС—ГД с противоположным неблагоприятным свойством, выражающимся в непрерывном увеличении погрешности δ во времени, что подчас делает такое сочетание недопустимым.

Остаются еще два сочетания, которые требуют дополнительного рассмотрения. В первом из них, более простом (КС—ГС), выражение для погрешности по форме совпадает с выражением (1). Сопоставляя эти выражения, получим, что $Z_{гс} = \frac{1}{C_r}$, а $Z_{кс} = \frac{1}{C_k}$, т. е. в электрической модели КС—ГС импедансами являются величины, обратные электрическим емкостям. Переходя от модели к оригиналу и принимая во внимание, что электрическая емкость принята в качестве аналога объема, можем сделать вывод, что импеданс КС и ГС есть величина, обратная объему.

Обратимся к физическому смыслу полученного результата. Импеданс гигрокамеры должен отражать ее свойство сохранять заданное значение абсолютной влажности a_k при искажающем влиянии гигрометра, установленного в нее, вследствие поглощения или выделения массы пара $\Delta m_k = \Delta m_r$.

Тогда количественно это свойство можно описать отношением

$$Z_{кс} = \frac{\Delta a_k}{\Delta m_k} = \frac{\Delta m_k}{V_k} \frac{1}{m_k} = \frac{1}{V_k}. \quad (2)$$

Таким образом, импеданс камеры из группы КС есть величина, обратная объему этой камеры.

Импеданс гигрометра должен выражать степени влияния его на абсолютную влажность в гигрокамере с определенным импедансом. С другой стороны, всякому изменению влажности в гигрокамере на Δa_k отвечает изменение сорбированной гигрометром массы на

Δm_r . Отношение Δa_k к Δm_r есть величина, обратная объему, т. е. импеданс гигрометра из группы ГС. С физической точки зрения этот объем можно истолковывать как то изменение объема гигрокамеры с единичным импедансом, которое было бы необходимо для того, чтобы восстановить первоначальное значение абсолютной влажности, до момента действия гигрометра.

Из выражений для импедансов КС и ГС следует, что размерность этой величины есть L^{-3} , где L — размерность длины, соответственно, единицей импеданса в системе СИ является 1 м^{-3} .

Таким импедансом обладает гигрокамера объемом 1 м^3 . Камера объемом 1 л имеет, следовательно, импеданс, равный 1000 м^{-3} .

Оценим размер импеданса для гигрометра ГС. По различным экспериментальным и теоретическим данным минимальное количество поглощенного пара активной частью влажочувствительного элемента эквивалентно нескольким десяткам молекулярных слоев воды.

Пусть изменению абсолютной влажности $\Delta a_k = 1 \text{ г/м}^3$ соответствует изменение массы воды, поглощенной гигрометром, $\Delta m_r = 10^{-6} \text{ г}$. Тогда в соответствии с изложенным

$$Z_{rc} = \frac{\Delta a_k}{\Delta m_r} = 10^6 \text{ м}^{-3}. \quad (3)$$

Оценим составляющую относительной погрешности измерения влажности в случае использования гигрокамеры вида КС при помещении в нее гигрометра вида ГС, приняв, что импеданс камеры 1000 м^{-3} , а импеданс гигрометра 10^6 м^{-3}

$$\delta = \frac{1}{1 + \frac{Z_r}{Z_k}} = \frac{1}{1 + \frac{10^6}{10^3}} = 0,001,$$

т. е. $0,1\%$.

Если в камеру помещается несколько гигрометров с известными импедансами Z_i , то вместо Z_r следует использовать суммарный импеданс $Z_{r\Sigma}$, выражение для которого следует из электрического аналога

$$Z_{r\Sigma} = \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{Z_i} \right)^{-1}, \quad (4)$$

где n — общее число гигрометров. В частности, когда все n гигрометров одинаковые, $Z_{r\Sigma} = \frac{1}{n} Z_r$. Для рассматриваемого конкретного случая ($Z_k = 1000 \text{ м}^{-3}$, $Z_i = 10^6 \text{ м}^{-3}$) при $n = 10$

$$\delta = \frac{1}{1 + \frac{10^6}{10^3 \cdot 10}} = 0,01,$$

т. е. 1% .

Последний численный пример достаточно убедительно показывает, какую роль играет качество согласования импедансов гигрометров и гигрокамер и вместе с тем иллюстрирует простоту процедуры оценки погрешности, если известны значения импедансов.

Рассмотрим второй случай — сочетание КД—ГД. Как следует из анализа электрической схемы-аналога, для этого случая в выражение δ не входят C_K и C_T , но δ зависит помимо R_T и R_K от E_K и E_T . Для пояснения физического смысла этих величин рассмотрим несколько подробнее взаимодействие КД и ГД.

В камеру объемом V_K , где находится гигрометр, подается с объемной скоростью v_K приготовляемая в специальном устройстве паровоздушная смесь с абсолютной влажностью a_y ; по условию неразрывности потока, паровоздушная смесь при выходе из камеры должна иметь ту же объемную скорость. Массу водяного пара, поглощенную или выделенную гигрометром в единицу времени, обозначим μ_T .

Пусть установившийся режим в гигрокамере характеризуется абсолютной влажностью $a_K = a_y$. Начиная с какого-либо момента функционирует гигрометр, выделяя или поглощая водяной пар с указанной скоростью μ_T .

Тогда изменение массы пара в гигрокамере за время dt составит

$$dm_K = \mu_T dt + a_y v_K dt - a_K v_K dt,$$

где $a_K = \frac{m_K}{V_K}$ — мгновенное значение абсолютной влажности в гигрокамере, следовательно, и выходящего из нее потока; m_K — мгновенное значение массы пара в гигрокамере. Преобразуя это выражение, получим однородное дифференциальное уравнение первого порядка

$$\frac{dm_K}{dt} + \frac{v_K}{V_K} m_K - a_y v_K - \mu_T = 0. \quad (5)$$

Решая его и принимая во внимание начальное условие (при $t=0$ $m_K = a_y V_K$), получим

$$m_K = a_y V_K + \frac{\mu_T}{v_K} V_K \left[1 - \exp\left(-\frac{v_K}{V_K} t\right) \right],$$

или после деления на V_K обеих частей последнего выражения

$$a_K = a_y + \frac{\mu_T}{v_K} \left[1 - \exp\left(-\frac{v_K}{V_K} t\right) \right]. \quad (6)$$

Из формулы (6) следует, что скорость перехода к новому установившемуся режиму не зависит от параметров гигрометра и целиком определяется отношением V_K к v_K , представляющим собой, по существу, постоянную времени гигростата. Но новое значение абсолютной влажности определяется как параметром μ_T гигрометра, так и параметром гигростата v_K . Таким образом, новое значение абсолютной влажности в гигрокамере при наличии в ней гигрометра отличается от задаваемого на величину $\frac{\mu_T}{v_K}$ со знаком, определяемым характером влияния гигрометра (поглощением или выделением пара). Следовательно, $\frac{\mu_T}{v_K}$ представляет собой

абсолютную погрешность, вызванную влиянием гигрометра. Эта величина, очевидно, не зависит от объема гигрокамеры V_K , что отражается также и электрической моделью.

Проведем рассуждение, аналогичное выполненному для случая КС—ГС.

Погрешность меры, какой является гигрокамера, воспроизводящая требуемое значение абсолютной влажности, должна уменьшаться с уменьшением ее выходного импеданса. Поэтому, исходя из уравнения, связывающего эту погрешность с воздействием измерительного прибора

$$\Delta a_K = \frac{\mu_T}{v_K},$$

получим, что роль импеданса меры (гигрокамеры) здесь выполняет величина, обратная объемной скорости потока в гигрокамере, т. е.

$Z_{KD} = \frac{1}{v_K}$. Размерность импеданса камеры вида КД, следовательно, $L^{-3}T$, где T —размерность времени, а единица в системе СИ, следовательно, $1 \text{ м}^{-3} \text{ с}$. Такой импеданс имеет гигрокамера любого объема с объемной скоростью потока $1 \text{ м}^3/\text{с}$. Гигрокамера, имеющая объемный расход в 10 раз меньший, обладает импедансом $10^3 \text{ м}^{-3} \text{ с}$.

Рассуждая аналогично, как и в случае рассмотрения гигрометра вида ГС, приходим к выводу, что импеданс гигрометра вида ГД

$$Z_{ГД} = \frac{\Delta a_K}{\Delta \mu_T} = \frac{1}{v_T}.$$

$Z_{ГД}$ здесь определяется изменением скорости массообмена гигрометра с анализируемой паровоздушной смесью, вызванным изменением абсолютной влажности этой смеси на одну единицу. По смыслу v_T —величина, равная изменению объемной скорости в гигрокамере, которое необходимо было бы сделать для того, чтобы восстановить первоначальное значение абсолютной влажности a_K .

Размерность $Z_{ГД}$, очевидно, одинакова с размерностью Z_{KD} , т. е., $L^{-3}T$.

Переходя к оценке погрешности δ в этом случае, обратимся к формуле, полученной из анализа электрической модели. Физический смысл аналогов R_T и R_K был только что выяснен. При построении электрической модели указывалось, что напряжения и э. д. с. являются электрическими аналогами абсолютной влажности. Следовательно, E_K —это аналог абсолютной влажности на входе гигрометра, равной по значению абсолютной влажности a_K в камере, а E_T —аналог абсолютной влажности a_T потока, выходящего из гигрометра. Таким образом, если $a_T = a_K$ (т. е. нет ни поглощения, ни испарения, как, например, со смоченного термометра психометра при относительной влажности 100%), то множитель

$(1 - \frac{a_T}{a_K})$ становится равным нулю, обращая в нуль δ . Это полностью соответствует действительности.

Вопросы экспериментального определения импедансов — предмет отдельного рассмотрения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Резников Г. П. Анализ физических процессов и погрешностей гигрометрического комплекса, основанного на термодинамическом принципе. — Тр. ГГО, 1973, вып. 300, с. 15—39.
2. ГОСТ 8.009—72. Нормируемые метрологические характеристики средств измерения. М., Изд-во стандартов, 1972. 15 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Н. П. Фатеев, Б. Л. Кожевников. Анализ состояния метеорологических измерений	3
Н. П. Фатеев. Передача размеров единиц физических величин и научно-технические мероприятия по разработке и внедрению локальных поверочных схем Гидрометслужбы для метеорологических измерений . .	9
Ю. В. Рогалев, Н. П. Фатеев. О выборе оптимальных условий при поверке и метрологической аттестации средств измерений . . .	20
В. А. Клеванцова, И. А. Покровская, Л. Е. Щебелина. О случайных погрешностях поверки термоэлектрических актинометров . .	27
Л. К. Веселова, В. А. Клеванцова. Об оценке мутности атмосферы при пиргелиометрических измерениях	33
Ю. В. Рогалев, Г. И. Тетерев. Методика поверки измерительных преобразователей атмосферного давления, работающих на деформационном принципе	37
Б. Я. Толстобров, Н. Н. Бердовский. Метеорологическая измерительная информационная система для исследования структуры пограничного слоя атмосферы	44
Б. Я. Толстобров. Дистанционный электрический психрометр с самоувлажнением	52
Л. И. Леонова, Л. А. Ядова, Н. Н. Климин, Н. П. Фатеев, Г. П. Резников, Б. В. Куров, Т. П. Доманькова. Экспериментальные исследования аспирационных психрометров	58
Л. И. Леонова, Л. А. Ядова, Н. Н. Климин, Н. П. Фатеев, Г. П. Резников, Б. В. Куров, Т. П. Доманькова. Метрологический анализ результатов экспериментальных исследований аспирационных психрометров	82
Г. П. Резников, Ю. В. Рогалев. Адаптивная система поверки средств измерения метеорологических элементов	95
Г. П. Резников. Об импедансах гигростатов и гигрометров . . .	106

Труды ГГО, вып. 414

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ВОПРОСЫ ПОВЕРКИ
МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ

Редактор М. М. Ясногородская. Технический редактор В. И. Семенова.
Корректор И. В. Жмакина

ИБ № 921

Сдано в набор 21.03.78. Подписано в печать 11.08.78. М-31505. Формат 60×90/16. Бум. тип. № 1.
Лит. гарн. Печать высокая. Печ. л. 7,5. Уч.-изд. л. 8,2. Тираж 650 экз. Индекс МЛ-285.
Заказ № 124. Цена 55 коп. Заказное.
Гидрометеиздат. 199053. Ленинград, 2-я линия, 23.

Ленинградская типография № 8 «Союзполиграфпрома» при Государственном комитете
Совета Министров СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
190000, Ленинград, Прачечный пер., 6.

УДК 551.501+551.508

Анализ состояния метеорологических измерений. Фатеев Н. П., Кожевников Б. Л. Труды ГГО, 1978, вып. 414, с. 3—8.

В статье приведены некоторые результаты анализа состояния метеорологических измерений в системе Главгидрометслужбы и предложения к проекту плана научных и организационно-технических мероприятий по их улучшению. Библ. 4.

УДК 681.208—551.508

Передача размеров единиц физических величин и научно-технические мероприятия по разработке и внедрению локальных поверочных схем Гидрометслужбы для метеорологических измерений. Фатеев Н. П. Труды ГГО, 1978, вып. 414, с. 9—19.

В статье рассматриваются усовершенствованные поверочные схемы гидрометслужбы и указываются необходимые мероприятия по их внедрению. Илл. 1. Библ. 7.

УДК 551.508.824

О выборе оптимальных условий при поверке и метрологической аттестации средств измерений. Рогалев Ю. В., Фатеев Н. П. Труды ГГО, 1978, вып. 414, с. 20—26.

В статье анализируются вопросы выбора образцовых средств измерений, определения числа поверяемых точек и распределение их по диапазону, количество отсчетов на точке поверки, а также вопросы нормирования погрешности измерения при поверке автоматических метеорологических станций и при аттестации средств измерений.

Библ. 9.

УДК 551.508.2

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

Приводятся результаты экспериментального определения случайных погрешностей поверки актинометров в естественных и в лабораторных условиях при использовании их с потенциометром ПП-63 и с гальванометром ГСА-1-МА.

Табл. 7. Библ. 4.

УДК 551.508.2

Об оценке мутности атмосферы при пиргелиометрических измерениях. Веселова Л. К., Клеванцова В. А. Труды ГГО, 1978, вып. 414, с. 33—36.

Приводятся материалы по оценке случайных погрешностей определения мутности атмосферы — коэффициентов мутности Ангстрема (β) и Шюппа (B) по синхронным измерениям двумя актинометрами Линке—Фейснера с наборами интерференционных светофильтров. Показано, что для оперативных оценок мутности атмосферы при пиргелиометрических измерениях возможно использовать один фильтр вблизи 500 нм для оценки B и четыре фильтра, разнесенные по спектру для оценки β .

Табл. 2. Илл. 1. Библ. 5.