

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ

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

Выпуск 529

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
И ВОПРОСЫ ПОВЕРКИ
МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ

Под редакцией
канд. техн. наук Б. Л. Кожевникова
канд. техн. наук Ю. В. Розалёва

ЛЕНИНГРАД ГИДРОМЕТЕОИЗДАТ 1990

718

УДК 551.501+551.508.824:389

Представлены работы по актуальным задачам метрологии метеорологических измерений и, в частности, применения энтропии Колмогорова и теории необратимости динамических систем.

Приведены результаты метрологических исследований в области надежности метеорологических средств измерений и их метрологического обеспечения, анализа методов поверки средств измерений параметров ветра, атмосферного давления и влажности воздуха, исследования по поддержанию единицы скорости воздушного потока рабочим эталоном.

Часть работ посвящена вопросам влияния климатических нагрузок на метеорологические приборы и их метеорологические характеристики.

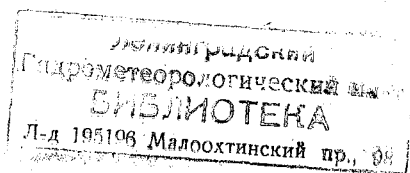
Предназначен для специалистов-метеорологов, занимающихся разработкой метеорологических средств измерений и их метрологическим обеспечением, а также для преподавателей и учащихся высших и средних учебных заведений.

This book contains papers on topical problems in metrology of meteorological measurements including, in particular, the papers dealing with the use of Kolmogorov's entropy and the theory of irreversibility of the dynamic systems.

Results of metrological studies on the reliability of meteorological means of measurement and their metrological provision are presented. Calibration of instruments used for measuring the parameters of the wind, atmospheric pressure and air humidity is discussed. Studies aimed at maintaining the velocity unit of the air flow with the help of a working reference instrument are analyzed.

Several papers are devoted to the problems associated with the influence of climatic load on meteorological instruments and their meteorological characteristics.

The book is intended for meteorologists engaged in the development of meteorological instruments and their metrological provision as well as for the teaching staff and students of the higher and secondary educational establishments.



М 1805040400- 27-90(1)
069 (02)-90

ISBN 5-286-00571-3

© Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова (ГГО), 1990 г.

АКТУАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ МЕТРОЛОГИИ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

В метеорологии наука об измерениях — метрология традиционно занимала видное место, хотя зачастую в неявном виде. Это объясняется тем, что метрология как отрасль знаний обособилась позже, чем начались регулярные метеорологические наблюдения. Однако естествоиспытатели при организации метеорологических наблюдений подходили к ним как к физическим опытам, ценность которых определялась воспроизводимостью. Поэтому еще тогда для метеорологических измерений применялись первоклассные (даже по современным оценкам) приборы, например термометры класса 0,01, а также стандартизованные методики измерений, изложенные в Наставлениях. Кроме того, на сети метеорологических станций была налажена система обеспечения единства средств измерений; когда эти средства в Бюро поверок были проградуированы в узаконенных единицах, а их свойства соответствовали принятым тогда нормам.

Впоследствии бурное развитие промышленности, а вместе с ней метрологии и теории измерения в целом позволило к настоящему времени накопить большой опыт измерения физических величин и параметров и закрепить его в стандартах, нормах и правилах. Причем этот опыт кристаллизовался не только из практики достижения единообразия средств измерений, но также из обеспечения единства самих измерений и наблюдений. В 1975 г. в системе Госкомгидромета СССР была создана ведомственная метрологическая служба, задача которой состояла в приведении традиционного метрологического обеспечения измерений и наблюдений на гидрометеорологических станциях (постах) в соответствии с правилами и нормами, отработанными по большей части в промышленности. Благодаря пятилетним программам совершенствования метрологического обеспечения, создаваемым на основе анализа состояния метеорологических измерений, были достигнуты существенные успехи в решении этой задачи: узаконены многие метеорологические термины и определения, аттестованы нестандартизованные средства измерения, разработаны методические указания по поверке практически всех метеорологических приборов и автоматических станций. На очереди стоит решение такого сложного вопроса, как стандартизация требований к точности методик выполнения метеорологических измерений и наблюдений и связанная с ней аттестация.

Этот вопрос стал особенно актуальным из-за появления качественно новых систем сбора, обработки и представления метеорологической информации — систем типа наукастинга. Такие системы содержат разветвленную сеть автоматических метеорологических станций, включая специальные (аэродромные, шоссейные и др.), и автономных приборов. Кроме того, источниками метеорологической информации для подобных систем являются радиолокаторы и спутники. Информация от всех источников поступает по линиям связи в мощную ЭВМ, где сшивается и выда-

ется на автоматизированное место синоптика или климатолога, а также напрямую по безбумажной технологии потребителям, в частности через аппараты цветной печати в виде карт и цветных диаграмм. На основании этой информации принимаются ответственные решения, от которых зависит жизнь и здоровье людей, сохранность больших материальных ценностей. Так, по запросу экипажам воздушных судов, отправляющихся в рейс, выдаются карты и диаграммы.

Последнее обстоятельство приводит к повышенным требованиям по надежности к исходной измерительной информации, поступающей от наземной сети метеорологических станций и постов. В то же время системы наукастинга, работающие в реальном масштабе времени, включающие в состав современные быстродействующие ЭВМ, обширные банки данных, средства отображения и регистрации метеорологической информации, открывают принципиально новые возможности перед метрологами по контролю качества измерительной информации. Так, например, исходя из синоптической ситуации, верифицируемой спутником, можно выделять зоны и территории со сравнительно ровными полями метеорологических элементов. При правильном выборе времени суток, учете рельефа местности и особенностей средств измерений атмосферные условия и, как следствие, условия измерений в пределах этих зон можно считать квазистационарными. Это позволит осуществить по специальной программе взаимный контроль источников наземной метеоинформации с привлечением сведений о предыстории, полученных из банков данных системы.

Однако подготовка подобных программ и их математическое обеспечение — дело сложное и длительное, поэтому их разработка должна вестись одновременно с созданием самих систем наукастинга. Кроме того, параллельно должны быть продуманы организационно-технические мероприятия, направленные на выявление и устранение источников погрешностей в пунктах наблюдений. К их числу следует отнести такие, как инспекция и контрольные синхронные метеоизмерения в местах эксплуатации обслуживаемых автоматических метеостанций. Для этих операций необходима соответствующая образцовая аппаратура, вспомогательные устройства ввода контрольной информации в каналы связи системы, а также определенная нормативно-правовая основа. На все это потребуется время, а следовательно, начинать подготовку надо уже сейчас.

В свете изложенного представляет интерес более подробный анализ некоторых моментов, касающихся физико-математического обеспечения подобных контрольных метеорологических программ.

Так с гносеологической точки зрения цель метеорологических наблюдений, как и самих метеорологических исследований, состоит в познании процессов и закономерностей явлений погоды для ее предсказания по предшествующим изменениям. Как правило, значение метеорологического параметра требуется для области, находящейся в достаточно большом отдалении от места установки средства измерений. Это — относительно пространства, а для прогноза это положение существует относительно времени — требуется значение, достаточно удаленное в будущем. Поэтому для решения такой сложной задачи необходим не только спе-

циальным образом организованные измерения, но и модель происходящего процесса, в которую можно было бы ввести полученное значение. В идеале такая модель должна обеспечивать требуемую точность прогноза метеопараметра в данной точке и в данный момент времени. Путь к этому лежит через учет взаимосвязей параметров, характеризующих состояние воздушной среды приземного слоя. Говоря об измерениях в метеорологии, исследователи, как правило, имеют в виду нахождение значения одноименной физической величины или в лучшем случае построение ее поля. В современном толковании под термином измерения должна пониматься операция установления того или иного состояния взаимодействия разнообразных полей метеопараметров. Такой подход определяет взгляд метрологов на измерения в метеорологии и на их метрологическое обеспечение. В противном случае игнорирование такого подхода и рассмотрение измерений метеопараметров как обычных статистических измерений создают иллюзию возможности выполнения высокоточных измерений и повышения на этой основе качества обслуживания народного хозяйства. Эта иллюзия ведет к неоправданному повышению требований к точности метеорологических средств измерений, к удорожанию этих средств и их поверки.

При подготовке метрологических контрольных программ следует исходить из того, что объектом метеорологических измерений является комплекс взаимодействующих физических полей атмосферного давления, температуры и влажности воздуха, скорости ветра и т. д. Причем метеоролога, как отмечено выше, должна интересовать не столько информация об отдельных параметрах, сколько обо всем комплексе метеопараметров. Более того, в зависимости от масштаба интересующего явления или объекта состав изучаемого комплекса может меняться. По определению такие измерения относят к системным [3]. Авторы публикации [1] выделяют следующие особенности измерений такого вида: большое количество измеряемых величин; необходимость синхронизации измерений во времени (в метеорологии это требование выражается в одновременности проведения измерений); протяженный или объемный характер изучаемого объекта. В отношении метеорологических измерений, по выше изложенным соображениям, к этим особенностям следует добавить необходимость оценок связности измеряемых величин.

Из сказанного очевидно, что в метеорологии на протяжении всей ее истории производили системные измерения. Однако это делалось недостаточно целеустремленно, так как метрологическое обеспечение, по крайней мере идеологически, было ориентировано на измерения статистических величин. Попытаемся сравнить метрологическое обеспечение статистических и системных измерений.

Прежде всего отметим, что статические измерения в основном проводятся там, где решается задача управления, т. е. задача удержания контролируемого процесса на заданном уровне в допустимых пределах. Это требование можно сформулировать в термодинамическом аспекте: статические измерения проводятся с целью уменьшения скорости производства энтропии. Системные же измерения в метеорологии на современ-

ном этапе не ставят непосильной пока задачи управления в широком смысле слова атмосферными процессами. Поэтому задача наземной метеорологической сети пунктов наблюдений – измерение для выявления макро- и мезомасштабных неоднородностей [6] – может быть трансформирована в задачу определения скорости возрастания энтропии.

В итоге можно сказать, что статические измерения проводятся в случаях, когда область измерения позволяет ограничить действия второго закона термодинамики. Системные же измерения предполагают познаваемый объект для изучения в том виде, в каком он существует, но в пределах области, определяемой действием второго закона термодинамики.

Такой энтропийный термодинамический подход к метрологическим задачам накладывает определенные требования на точность как статических, так и системных измерений. Для статических измерений характерно то, что объект измерения не замкнут: в него постоянно идет поток энергии извне при осуществлении управления. Поскольку приток этой энергии в принципе неограничен, то и точность измерений может быть сколь угодно большой.

При системных же измерениях, во всяком случае в метеорологии, объект изучения замкнут, по крайней мере в пределах выбранного масштаба. Поэтому при исследованиях того или иного объекта необходимо оставаться в выбранных пределах, а следовательно, ограничивать точность измерений как сверху, так и снизу. Такой подход полностью согласуется с теорией субдинамик, предложенной группой Пригожина–Мисры [7].

Отсюда следует, что нормы точности метеорологических измерений и их метрологическое обеспечение обуславливаются масштабами исследуемого объекта. Это необходимо учитывать при составлении контрольных метрологических программ для систем по типу наукастинга.

Рассмотрим теоретические и практические вопросы организации самой поверки.

Для начала отметим, что в метеорологии в качестве результата измерения, как правило, используются средние значения. В этом специфика исследования полей и вместе с тем специфика метрологического обеспечения измерений метеорологических величин. С точки зрения теории алгоритмов [4, 5] результат измерений есть конструктивный объект, составляющими которого являются конечные элементы. В качестве таких элементов могут служить, в частности, результаты статистических измерений. При таком подходе эти результаты должны входить в конечный результат не как значения, полученные при измерениях (поскольку в этом случае их необходимо оценивать с привлечением понятий бесконечности), а как некое значение, полученное из некоторого конечного множества, элементы которого не пересекаются. Отсюда следует, что при алгоритмическом подходе информация о погрешности статических измерений не используется. Про такие измерения есть все основания говорить, что поверка средств измерений в статических условиях обеспечивает в лучшем случае только единство измерений. Подобная характеристика

достаточна только для изготовителя средства измерения.

Отсюда следует важный вывод: поскольку поверка в статических условиях, как это следует из вышеизложенного, не гарантирует требуемую точность измерений, средства измерений в метеорологии следует поверять в естественных условиях.

Это зачастую и делается для средств измерения атмосферного давления, энергетической освещенности солнечным излучением, количества озона. Стремление создать для каждого вида измерений эталон по этим соображениям представляется теоретически неоправданным и экономически невыгодным. Это задача Госстандарта, поскольку эталоны прежде всего разрабатываются в расчете на решение всех имеющихся и мыслимых в будущем задач. Эталоны в принципе не должны быть ориентированы на какого-либо конкретного потребителя. Поэтому, по нашему мнению, метрологическое обеспечение метеорологических измерений следует ориентировать на разработку образцовых средств при опережающей разработке теоретических основ сравнений метеоприборов и датчиков в естественных условиях атмосферы.

Вообще, говоря о специфике метрологического обеспечения измерений, представляется разумным в свете изложенного разбить их на две группы: статические и динамические [1]. Кроме того, приемлемым объяснением разбиения, по нашему мнению, могут служить две знаменитые теоремы Геделя. В частности, теорема Геделя о полноте [4] утверждает, что все истинные формулы логики предикторов первого порядка, т. е. все законы элементарной логики предикторов, могут быть порождены некоторым исчислением. Проводя аналогию с законами статистических измерений, можно сказать, что, используя эталоны физических величин, можно проверить (доказать) все мыслимые результаты статических измерений; в этом смысле система статических измерений полна.

Другая теорема Геделя [4] — о неполноте — утверждает, что множество всех истинных формул арифметики (а значит, и множество всех общезначимых формул логики предикторов второго порядка) не могут быть порождены никаким исчислением. Продолжая аналогию в соответствии с теоремой о неполноте, можно сказать, что не существует методов сконструировать при поверке приборов все мыслимые истинные результаты измерений. Под истинным результатом измерения здесь понимается отображение процесса на множество действительных чисел, в то время как обычно под результатом измерения понимают сжатие информации, содержащейся в отображенном множестве, до конкретного числа и границ множества. Таким образом, система динамических и системных измерений принципиально неполна.

Подобная параллель между теоремами Геделя и неопределенностью траектории движения динамической системы была проведена в работе Пригожина — Мисры [7].

Учитывая неполноту системных и динамических измерений, нам представляется, что и вся система их метрологического обеспечения должна опираться на теорию алгоритмов и на алгоритмическое определение индивидуальной случайной последовательности, в которых нет

необходимости закрывать глаза на неполноту.

Выше хотя и упоминались системные измерения, но в основном обсуждались статические и динамические измерения, а также некоторые вопросы их метрологического обеспечения. Системные же, вырастая из статических и динамических измерений, имеют ряд особенностей. Дело в том, что все измерения в принципе системные, но мы либо стабилизируем некоторые составляющие системы, либо минимизируем так называемые внешние факторы и вводим понятие дополнительной погрешности. Это довольно успешно удается делать для небольших систем, хотя собственно другого выхода и нет, поскольку рассмотрение таких объектов, как системы, ведет к значительному усложнению измерений, а следовательно, и к неоправданным экономическим потерям.

Для системных измерений в метеорологии характерна взаимосвязь всех измеряемых параметров. С целью наблюдения за метеорологическими явлениями и процессами развернута широкая сеть станций и постов. Оптимизация этой сети – один из главных моментов всей организации наблюдений и измерений. Основным недостатком существующей концепции оптимальной сети является то, что она базируется на чисто статистическом анализе метеорологических элементов, которые рассматриваются как случайные величины, не имеющие никаких закономерностей в изменении ни по территории, ни по времени. Не учитываются даже такие фундаментальные зависимости, как уравнение тепловлагообмена, уравнение переноса и т. п. Естественно, что по сравнению с сетью, в которой бы учитывались эти закономерности, существующая сеть станций и постов избыточна. Однако этот недостаток, приводящий в конечном счете к избыточности получаемой метеоинформации, оборачивается достоинством с точки зрения метрологического обеспечения, так как эта информация пригодна для использования в метрологическом обеспечении при выполнении определенных условий и при достаточной продолжительности самих измерений. До некоторой степени такой подход уже применяется при критическом контроле, но задача критического контроля отличается от задачи метрологического обеспечения, в частности, по строгости выводов. Согласно работе [1], метрологическое обеспечение сети метеорологических пунктов наблюдений может осуществляться одним из следующих способов:

- 1) демонтаж средства измерений и исследование его в бюро поверки;
- 2) исследование средства измерений на месте эксплуатации без демонтажа, например с использованием встроенных в систему средств контроля.

Таким встроенным средством контроля, по нашему мнению, должно быть образцовое средство, встраиваемое временно в сеть наблюдательных пунктов параллельно поверяемым рабочим средствам измерений.

В заключение отметим еще одну особенность метеорологических наблюдений. Говоря о сети метеорологических пунктов наблюдений и измерений как о системе, следует подразумевать при этом не механическое объединение пунктов, а качественно новое образование, имеющее свойства, отличающиеся от свойств каждой отдельной станции или поста.

В работе [2] появление этого свойства объясняется возникновением и исчезновением индивидуальных процессов того или иного масштаба. Учет качественно новых свойств систем требует исторического изучения процессов, а именно такой подход характерен для метеорологии. В этом основное различие в подходах к изучению свойств традиционной физики и метеорологии, так как в физике изучают свойства объекта — электрона, молекулы, кристалла — независимо от истории возникновения.

Следует также заметить, что системный подход к результатам метеорологических наблюдений и измерений позволяет рассматривать их как проявление бесконечного множества метеорологических процессов. Это в свою очередь вызывает согласно работе [2] необходимость применения принципа „дополнительности” при их описании. В квантовой физике дополнительность трактуется как соотношение неопределенностей, а в метеорологии это должно отражать неопределенность локализации в пространстве и во времени значения метеорологического параметра.

Последние из перечисленных особенностей метеорологических наблюдений никак не учитываются в существующей системе метрологического обеспечения, поэтому в предстоящей ее модернизации, вызванной появлением систем типа наукастинга, эти особенности должны быть учтены и использованы.

Выводы

В связи с развертыванием систем типа наукастинга метрологическое обеспечение метеорологических измерений следует рассматривать как проблему системных измерений.

По мнению авторов, математическое обеспечение метеорологических измерений должно строиться на термодинамическом, энтропийном подходе в сочетании с теорией алгоритмов, при этом необходимо учитывать принцип дополнительнойности описания и использовать историю развития метеорологических процессов.

К моменту ввода систем по типу наукастинга в эксплуатацию разумно не только подготовить их математическое и программное обеспечение, но и создать соответствующие технические, законодательные и организационные основы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бородатый В. И., Пличевский А. Д., Семенюк А. Л. Теоретические и прикладные проблемы системных измерений. — В кн.: Теоретические вопросы метрологического обеспечения ИИС. Львов. 1987, с. 4—13.
2. Волькенштейн М. В. Дополнительность, физика и биология. — УФН, 1988, т. 151, вып. 2, с. 279—297.
3. Орнатский П. П. Теоретические основы информационно-измерительной техники. — Киев. Вища школа, 1983. — 455 с.
4. Успенский В. А., Семенов А. Л. Теория алгоритмов: основные открытия и приложения. — М.: Наука, 1987, — 288 с.
5. Фомин В. Ф. Измерения и теория необратимости динамических систем. — См. наст. сб.

6. Bejaars A. C. M. The measurement of gustiness at routine wind stations. — A review WMO instruments and observing methods. Report, N 31, 1987.

7. Misra B., Prigogine J. Irreversibility and nonlocality. — Lett. Math. Phys., 1983, vol. 7, N 5, p. 421—429.

ПРИМЕНЕНИЕ ЭНТРОПИИ КОЛМОГОРОВА В МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЯХ

В [10] предложен способ применения энтропии Колмогорова для проверки метеорологических приборов в естественных условиях. При этом проверка рассматривалась как задача создания единой системы, состоящей из естественного процесса, образцового прибора и поверяемого прибора. Поверяемый прибор признавался годным, если при допустимом разбиении пространства состояний энтропия Колмогорова равна нулю.

В последнее время в технике распространяются методы, использующие энтропию Колмогорова [9]. В данной статье дается обоснование применения энтропии Колмогорова в метеорологических измерениях.

Излагаемое ниже основано на определении случайности, данном в работе [5]. Следуя этой статье, можно сказать, что случайные последовательности обладают тремя фундаментальными свойствами. Каждое из этих свойств может быть взято за основу некоторого определения случайности. Эти свойства называются: типичность, хаотичность и стохастичность [5].

В настоящее время широкое применение нашло свойство типичности. „В сущности, типичность означает принадлежность к каждому разумному большинству” [5]. В соответствии с этим свойством каждую конечную последовательность относят к одному из типичных законов распределения. Затем определяют случайные характеристики для бесконечной типичной случайной последовательности, которые присваивают исходной конечной последовательности.

В нашей теории мы используем свойство хаотичности. „Хаотичность означает сложность строения” [5] случайной последовательности. Согласно работе [5], пусть имеются объекты y и их описания x , в нашем случае объект описывается последовательностью показаний прибора. Естественно, что каждый объект имеет много описаний. Сложность объекта есть не что иное, как длина его наикратчайшего описания. В соответствии с работой [5] сложность объекта y при оптимальном способе описания называется энтропией объекта y .

В работе [6] установлено, что класс типических и класс хаотических последовательностей совпадают. Опираясь на свойство хаотичности, мы тем самым не сужаем класс исследуемых объектов.

В части I настоящей статьи мы излагаем понятие изоморфизма, следуя работе [2], и тем самым вводим понятие равенства двух вероятностных пространств, а значит, и классы изоморфных систем. В части II излагаем понятие сдвига Бернулли [18]; в дальнейшем в статье определение сдвига не используется и дается только в связи с тем, что доказательство изоморфизма двух динамических систем опирается на изоморфизм сдвигов Бернулли [7], в общем-то для понимания статьи достаточно принять, что интегральная кость есть система Бернулли. В части III излагается понятие энтропии [2], на основе которого в части IV вводится понятие энтропийно-

го инварианта Колмогорова. В части IV приводится метод вычисления неравновесной энтропии и энтропийного инварианта Колмогорова [17], основанного на введенной в работе [17] модели измерений. В части V, следуя работе [12], излагается обоснование изложенного в работе [7]. В части VI приводится предельная теорема [13], которая позволяет сравнивать энтропийные инварианты. В части VII предлагаются некоторые варианты применения энтропии Колмогорова.

В соответствии с ГОСТ 16263–70 измерением называется „нахождение значения физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств”. Оставаясь в рамках указанного определения измерения, можно дать следующее формализованное определение идеального измерения.

Идеальное измерение есть установление взаимно-однозначного соответствия между множеством состояний параметра исследуемого физического объекта и множеством наделенного мерой состояний другого объекта, имеющего одну степень свободы (прибор).

По сути измерение представляет собой отображение одного множества на другое, такое отображение называется гомоморфизмом, если каждому элементу первого множества соответствует один элемент второго. Поскольку в результате идеального измерения множество состояний параметра исследуемого объекта идентифицируется элементами множества, наделенного мерой, мы можем говорить, что обратное отображение – также гомоморфизм. Это означает, что указанное отображение, осуществляемое прибором, есть изоморфизм по определению.

Учитывая, что указанные множества являются измеримыми, их можно превратить в пространства Лебега [8] с мерой μ . Изложенное позволяет нам, говоря об измерениях, оперировать понятиями теории меры.

Важнейший принцип теории меры состоит в пренебрежении множествами меры нуль. В соответствии с этим принципом пространства с мерой и их изоморфизм должны изучаться лишь с точностью до множества меры нуль, или, как говорят, „по модулю нуль” ($\text{mod } 0$).

При реальных измерениях отображение не есть взаимно-однозначное, каждому состоянию параметра исследуемого объекта соответствует некоторое подмножество пространства состояний прибора, определяемого погрешностью прибора. Однако если мы пренебрежем этим подмножеством, т. е. присвоим ему меру, равную нулю, то отображение становится опять изоморфизмом, но по модулю 0.

В соответствии с ГОСТ 16263–70 погрешность измерения – „отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой величины”. Отсюда следует, что погрешность измерения в терминах теории меры есть диаметр множества меры нуль, т. е. диаметр множества, которое мы удаляем для того, чтобы отображение, осуществляемое прибором, оставалось изоморфизмом.

В излагаемой нами эргодической теории для целей измерений используются понятия, которые не нашли широкого применения в технических приложениях. Поэтому автор вынужден вначале напомнить некоторые определения.

Пусть (Ω, F, P) – вероятностное пространство, где Ω – пространство точек, F – σ -алгебра подмножеств из Ω , P – вероятностная мера на F .

В метеорологии вероятностное пространство – это все множество значений метеорологического параметра в интервале наблюдаемых экстремальных значений для какой-либо точки поверхности земли, σ -алгебра – это разбиение подмножества, удовлетворяющее условиям:

- а) объединение конечного числа подмножеств принадлежит интервалу;
- б) разность любых двух подмножеств принадлежит интервалу;
- в) объединение счетного числа подмножеств принадлежит интервалу;
- г) сам интервал является собственным подмножеством.

Кроме того, в σ -алгебру включены в качестве подмножества сам интервал и пустое множество, P есть вероятность попадания наблюдаемого значения в одно из подмножеств.

Существует T -преобразование, отображающее Ω в себя. Оно является измеримым в том смысле, что из $A \in F$ следует, что $T^{-1}A = \{\omega : T\omega \in A\} \in F$. Если, кроме того, T – взаимно-однозначное преобразование, $T\Omega = \Omega$, и из $A \in F$ следует, что $TA = \{T\omega : \omega \in A\} \in F$, то T называется обратимым. В случае когда $P(T^{-1}A) = P(A)$ для каждого A из F , говорят, что T – сохраняющее меру преобразование; если T обратимо, то эквивалентным требованием является $P(TA) = P(A)$.

Можно привести другой пример преобразования, сохраняющего меру. Пусть вероятностное пространство (Ω, F, P) то же, что и определенное выше, преобразование T есть преобразование пространства параметра состояний объекта в пространство показаний прибора, тогда T -измеримое, обратимое и сохраняющее меру преобразование. По сути T определяет неявно все характеристики прибора.

1. Изоморфизм

Существуют также пары сохраняющих меру преобразований, которые, будучи формально различными, по существу в статистическом смысле совпадают. Для рассмотрения таких пар преобразований вводится понятие изоморфизма для сохраняющих меру преобразований, подобное понятию изоморфизма, скажем, для групп.

Пусть T и $\tilde{T}$ – сохраняющие меру преобразования, определенные на вероятностных пространствах (Ω, F, P) и $(\tilde{\Omega}, \tilde{F}, \tilde{P})$ соответственно. В качестве предварительного определения возьмем следующее. Преобразования T и $\tilde{T}$ и изоморфны, если существует отображение φ пространства Ω на $\tilde{\Omega}$, удовлетворяющее условиям:

- 1) φ взаимно-однозначно;
- 2) если $\tilde{A} = \varphi A$, то $A \in F$ в том и только в том случае, когда $\tilde{A} \in \tilde{F}$, при этом $P(A) = \tilde{P}(\tilde{A})$;
- 3) равенство $\varphi T\omega = \tilde{T}\varphi\omega$ выполняется для всех ω .

Условия 1 и 2 требуют, чтобы отображение φ сохраняло структуру измеримых пространств (Ω, F, P) и $(\tilde{\Omega}, \tilde{F}, \tilde{P})$. Условие 3 требует, чтобы φ преобразовало T в $\tilde{T}$: один и тот же результат получается независимо от того, каким из двух путей совершается переход от верхнего левого Ω к нижнему правому $\tilde{\Omega}$ в диаграмме

$$\begin{array}{ccc} \Omega & \xrightarrow{T} & \Omega \\ \psi \downarrow & & \downarrow \varphi \\ \tilde{\Omega} & \xrightarrow{\tilde{T}} & \tilde{\Omega} \end{array}$$

Рассмотренные пары преобразований изоморфны в указанном смысле, но все же данное определение неудовлетворительно.

Неудовлетворительно оно в том смысле, что в дальнейшем оно применимо только для идеального случая, т. е. когда мы знаем абсолютное точное значение параметра состояния атмосферы или измерительный прибор имеет нулевую погрешность измерений. Поскольку даже теоретически невозможно соблюсти эти условия [18], нам нужно определение, которое было бы нечувствительно к множествам меры 0, т. е. такое определение, которое признавало бы преобразования T и $\tilde{T}$ изоморфными, если они становятся изоморфными после выбрасывания множества меры 0 из одного или из обоих пространств Ω и $\tilde{\Omega}$. Пусть теперь Ω_0 есть то, что остается после удаления из Ω некоторого множества меры 0, т. е. Ω_0 — множество из F меры 1. Тогда T может рассматриваться как преобразование, определенное лишь на Ω_0 , в том и только в том случае, если оно переводит Ω_0 в себя: $T\omega$ принадлежит Ω_0 всякий раз, когда ω принадлежит Ω_0 , или, что то же самое, $\Omega_0 \supset T\Omega_0$ (или $\Omega_0 \subset T^{-1}\Omega_0$). Будем теперь считать T и $\tilde{T}$ изоморфными, если, будучи суженными до преобразований, действующих на подмножествах Ω_0 и $\tilde{\Omega}_0$, удовлетворяющих соотношениям $\Omega_0 \subset T^{-1}\Omega_0$ и $\tilde{\Omega}_0 \subset \tilde{T}^{-1}\tilde{\Omega}_0$, они становятся изоморфными в смысле предварительного определения. Это понятие называют изоморфизмом по модулю 0, или изоморфизмом по модулю множества меры 0, или почти изоморфизмом. В дальнейшем мы всегда будем пользоваться изоморфизмом по модулю 0, поэтому мы не будем давать дополнительного уточнения.

Легко показать [2], что изоморфизм является аналогом эквивалентности, т. е. удовлетворяет условиям рефлексивности, симметричности и транзитивности.

Спроецируем изложенные понятия на метеорологию. Предположим, что мы имеем вероятностное пространство для некоего параметра. Его определение дано выше. Пусть это пространство связано неким преобразованием T с вероятностным пространством другого параметра. Знание преобразования T позволило бы по измерению одного параметра рассчитывать значение другого параметра. Если сдвинуть эти пространства во времени, мы можем по измерению одного параметра предсказать значение другого параметра. Это преобразование задает природа. Если мы построим модель этого процесса, т. е. построим преобразование T , то с его помощью мы будем предсказывать значения параметра в будущем. В этом случае заключение о том, насколько построенное преобразование соответствует реальности, можно сделать, ответив на вопрос: изоморфны ли преобразования T и $\tilde{T}$?

Приведем другой пример. Пусть два прибора установлены достаточно близко друг от друга, „достаточно близко” означает, что при небольшом времени осреднения показания приборов совпадают. Каждый прибор

преобразовывает значение параметра состояния объекта в показания прибора в соответствии с преобразованиями T_1 и T_2 . В этом случае ответ на вопрос, изоморфны ли T_1 и T_2 , есть ответ на вопрос, принадлежат ли приборы к одному классу по погрешности результата измерений.

Изложенное выше приводит к следующему определению. Пусть существуют множества Ω_0 из F и $\tilde{\Omega}_0$ из $\tilde{F}$, имеющие меру 1, и отображение множества Ω_0 на $\tilde{\Omega}_0$, удовлетворяющие следующим условиям:

- 1) взаимно-однозначно;
- 2) если $A \subset \Omega_0$ и $\tilde{A} = \varphi A$, то $A \in F$ в том и только в том случае, когда $\tilde{A} \in \tilde{F}$, при этом $P(A) = \tilde{P}(\tilde{A})$;
- 3) имеют место соотношения $\Omega_0 \subset T^{-1}\Omega_0$ (т. е. $\Omega_0 \supset T\Omega_0$),
 $\tilde{\Omega}_0 \subset \tilde{T}^{-1}\tilde{\Omega}_0$ (т. е. $\tilde{\Omega}_0 \supset \tilde{T}\tilde{\Omega}_0$).

Когда $\varphi T\omega = \tilde{T}\varphi\omega$ выполняется для любого ω из Ω_0 . В этом случае преобразования T и $\tilde{T}$ изоморфны, точнее изоморфны (Ω, F, P, T) и $(\tilde{\Omega}, \tilde{F}, \tilde{P}, \tilde{T})$. Мы говорим, что преобразования T и $\tilde{T}$ изоморфны относительно тройки $\Omega_0, \tilde{\Omega}_0, \varphi$.

Учитывая вышеизложенное, мы можем сказать, что основная проблема измерений, точнее метрологии, есть проблема изоморфизма. Проблема изоморфизма долгое время рассматривалась в связи с проблемой изоморфизма так называемого сдвига Бернулли. Поэтому, стремясь дать замкнутое изложение, остановимся на определении сдвига Бернулли. Причем, стремясь как можно полнее использовать достижения теории динамических систем, будем излагать сдвиги Бернулли в общем виде, только в необходимых случаях давая практическую иллюстрацию. В своем изложении мы следуем работе [18].

II. Сдвиг Бернулли – динамические системы сдвига

Для алфавитного множества $S = \{1, 2, \dots, s\}$, $s > 1$, определим пространство сдвига $X = S^Z$, наделенного метрикой $d(x, y) = \sum_{n \in Z} 2^{-n} d_S(x_n, y_n)$, где

d_S – дискретная метрика в S . (X, d) – компактное метрическое пространство, борелевская σ -алгебра. Вводим символ B – произведение σ -алгебр, $B = \bigotimes_{i \in Z} B_i$, где B есть дискретная σ -алгебра в S . Множество $B(k, m) = \{x \in X: x_1 = i_0, \dots, x_m = i_l\}$, $i_0, \dots, i_l \in S$, $k \leq m \in Z$, $l = m - k$, называется цилиндром и является открытым замкнутым множеством, класс цилиндров S есть полуалгебра, которая генерирована B . Преобразование сдвига $\sigma: X \rightarrow X$, $x_n \rightarrow \sigma x_n = x_{n+1}$ есть гомоморфизм и действует на множество вероятностных мер $\rho(X, B)$ как $(\sigma\rho)(B) = \rho(\sigma^{-1}B) = \rho(\sigma^{-1}B)$, для каждого $B \subset B$, $\rho \in (X, B)$. Вероятностная мера μ есть σ -инвариант, если $\sigma\mu = \mu$, в том случае (X, B, μ, σ) называется сдвигом динамической системы.

Класс σ -инвариантных мер есть меры Бернулли: пусть $\Pi = (\Pi_1, \dots, \Pi_s)$ есть вероятностный вектор ($\Pi_i \geq 0$, $\sum_{i \in S} \Pi_i = 1$) и определим $\mu_\Pi(B(k, m)) =$

$\Pi_{i_0} \dots \Pi_{i_l}$. Динамическую систему (X, B, μ_Π, σ) мы называем сдвигом Бернулли.

Долгое время была актуальна задача изоморфизма сдвигов Бернулли. Иаконец, Колмогоров разрешил эту проблему в отрицательном смысле,

введя новый численный инвариант — энтропию сохраняющего меру преобразования. Оказалось, что сдвиги Бернулли $(1/2, 1/2)$ и $(1/3, 1/3, 1/3)$ имеют различные энтропии и потому неизоморфны. Инвариант Колмогорова — это существенным образом измененное понятие энтропии, введенное ранее Шенноном в теории информации. Позднее Орнштейн [7] доказал теорему о том, что сдвиги Бернулли с одинаковой энтропией изоморфны. Эта теорема совместно с понятием изоморфизма является основополагающей всего нашего изложения.

III. Энтропия

Для нахождения энтропии преобразования T напомним несколько понятий. Везде далее мы будем обозначать буквами A, B, b конечные подполя F . Если $\{A_1, \dots, A_n\}$ есть F -разбиение пространства Ω , т. е. конечная совокупность непересекающихся непустых элементов поля F , объединение которых совпадает со всем пространством Ω , то класс всех конечных объединений элементов этого разбиения является конечным подполем поля F . Легко видеть, что и обратно любое конечное подполе получается таким образом из некоторого F -разбиения. Элементы такого разбиения будут называться атомами соответствующего конечного поля. Энтропия преобразования T определяется в три шага. Энтропия конечного поля A определяется формулой

$$H(A) = - \sum P(A) \ln P(A),$$

где суммирование производится по атомам A поля A .

Энтропия конечного поля A относительно преобразования T есть

$$h(A, T) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} H\left(\bigvee_{k=0}^{n-1} T_k A\right).$$

Наконец, энтропия преобразования T задается выражением

$$h(T) = \sup h(A, T),$$

где верхняя грань берется по всем конечным подполям A поля F .

Если T — сохраняющее меру преобразование, то $T^{-1}A$ — конечно поле с тем же числом атомов, что и поле A , и соответствующие атомы имеют равные вероятности. Так как поля A и $T^{-1}A$ имеют одинаковую вероятностную структуру, то их можно считать реализациями одного и того же эксперимента. Отметим, что эти реализации необязательно независимы; знание того, что точка ω лежит в некотором определенном атоме поля A , может помочь экспериментатору определить, какой атом поля $T^{-1}A$ ее содержит (т. е. какой атом поля A содержит точку $T\omega$).

Будем рассматривать поля A и $T^{-1}A$ как реализации эксперимента совершающиеся в последовательные моменты времени. В этой интерпретации конечное поле $\bigcup_{k=0}^{n-1} T^{-k}A$ соответствует сложному эксперименту, состоящему из n реализаций $A, T^{-1}A, \dots, T^{-(n-1)}A$ эксперимента, соответствующего полю A . Для того чтобы получить информацию, приходящуюся на одну реализацию эксперимента, разделим на n количество информации

$H\left(\bigcup_{k=0}^{n-1} T^{-k}A\right)$ сложного эксперимента. При $n \rightarrow \infty$ информация $n^{-1}H \times$
 $\times \left(\bigcup_{k=0}^{n-1} T^{-k}A\right)$, приходящаяся на одну реализацию, стремится к пределу
 $h(A, T)$, который мы рассматриваем как среднюю скорость создания
 информации при большом числе реализаций эксперимента A . Функция
 $h(T)$ есть верхняя грань этих скоростей по всем экспериментам A .

Возвращаясь к теореме, доказанной Орнштейном, укажем, что в ней
 имеется в виду именно энтропия $h(T)$, которая для сдвига Бернулли с
 конечным разбиением пространства событий равна

$$h(T) = h(A, T) = -\sum p_i \ln p_i,$$

и что для сдвига Бернулли это является не определением, а следствием
 эргодической теории.

IV. Энтропия динамической системы

Процесс измерения, или взаимодействия прибора с объектом измере-
 ния, есть процесс установления равновесия обмена энергией между при-
 ором и источником энергии. Практически при измерении мы наблюдаем
 неравновесный процесс и поэтому не можем использовать методы опреде-
 ления энтропии, пригодные для систем Бернулли, т. е. для систем с конеч-
 ным числом состояний. Система прибор — измеряемый объект образует
 неравновесную систему (неразрывные части).

Вопрос, как определить энтропию неравновесных систем, поставлен
 давно [15, 16]. Широкое признание (хотя и не всеобщее) получила точка
 зрения, что правильный путь определения неравновесной энтропии
 должен включать некое грубое разбиение. Однако произвольное разбие-
 ние в результате дает необязательно неубывающую функцию времени. В
 работе [12] предложен новый тип грубого разбиения для динамических
 систем, который естественным образом приводит к определению нерав-
 новесной энтропии, которая имеет свойства не убывать со временем и при
 соответствующих условиях, при увеличении времени, приближаться к
 равновесной энтропии.

Такое определение энтропии отличается от определения энтропий-
 ного инварианта Колмогорова. Однако существует связь между предло-
 женной в работе [12] неравновесной энтропией и энтропийным инвариан-
 том Колмогорова: энтропийный инвариант Колмогорова есть скорость, с
 которой неравновесная энтропия растет со временем.

Метод грубого разбиения зависит от особенности модели процесса
 наблюдения.

Состояние системы описывается положением фазовой точки ω ,
 которая может находиться во всех возможных точках фазового простран-
 ства Ω . По определению, две фазовые точки ω_1 и ω_2 наблюдаются как
 эквивалентные, если две системы, находящиеся в фазовых точках ω_1 и
 ω_2 , под действием идентичных воздействий обнаруживают идентичное
 поведение в последующие моменты времени. Предполагается, что если
 точка ω_1 наблюдаемо эквивалентна ω_2 , а точка ω_2 наблюдаемо эквива-

лентна ω_3 , то точка ω_1 наблюдаемо эквивалентна ω_3 . В этом случае наблюдаемая эквивалентность есть эквивалентность в математическом смысле. Таким образом, мы можем разбить фазовое пространство на семейство или представить его в виде разбиения Π непересекающихся множеств таких, что две фазовые точки принадлежат одному и тому же множеству разбиения Π , если и только если они наблюдаемо эквивалентны.

По сути мы имеем здесь дело с сопряженными системами [2]. Введение понятия сопряженности позволяет обойти некоторые трудности, именно: невозможность проводить бесконечно много измерений, фазовое пространство разбивать на бесконечно большое количество непересекающихся множеств, заменяя понятие изоморфизма понятием сопряженности. Грубо говоря, при этом игнорируют в значительной степени точечные преобразования и имеют дело с множествами и преобразованием множеств, для которых формируют соответствующие понятия одинаковости.

Следует указать, что понятия изоморфизма и сопряженности совпадают для большинства естественных пространств. В работе [2] доказано, что понятие сопряженности действительно совпадает с понятием изоморфизма определенных на некотором классе пространств.

Доказано, что если два преобразования T и $\tilde{T}$ изоморфны, то они сопряжены, однако обратное предположение, вообще говоря, неверно. Обращение справедливо при дополнительных предположениях, что Ω и $\tilde{\Omega}$ — сепарабельные полные метрические пространства, а F и $\tilde{F}$ являются σ -полями борелевских множеств, т. е. F и $\tilde{F}$ — это σ -поля, порожденные открытыми множествами, или, что то же самое в силу предположения сепарабельности, F и $\tilde{F}$ — это σ -поля, порожденные шарами.

Очевидно, что пространства, изучаемые нами, удовлетворяют этим условиям. Поэтому понятия изоморфизма и сопряженности совпадают на интересующих нас пространствах.

Поэтому изложенное выше понимание наблюдаемо эквивалентных систем позволяет нам в дальнейшем говорить не о сопряженности, соблюдая цельность изложения, об изоморфизме систем.

Теперь мы можем вновь вернуться к нашей модели. Для указанной модели вводим два естественных условия:

- 1) наблюдения возможны только через равные промежутки времени, обозначаемые $t = \dots, -2, -1, 0, 1, 2, 3, \dots$;
- 2) наблюдение, проведенное в любой момент времени, может дать только конечное множество результатов.

Эволюция системы во времени характеризуется семейством изменяющихся во времени трансформаций Φ_t (для систем Бернулли эквивалентно введенному выше преобразованию T), определенных для всех реальных t . Под действием преобразования Φ_t фазовая точка, находящаяся в момент времени $t = 0$ в точке ω , переходит в точку $\Phi_t \omega$.

Пусть P — разбиение фазового пространства на множество точек, которые являются неразличимыми при наблюдении в момент времени $t =$

Две фазовые точки ω_1 и ω_2 наблюдаемо эквивалентны, если и только если под действием преобразования Φ_t для каждого неотрицательного t точки $\Phi_t \omega_1$ и $\Phi_t \omega_2$ принадлежат одному и тому же множеству разбиения P . Другими словами, ω_1 и ω_2 должны принадлежать одному и тому же множеству разбиения $\Phi_t P$. Следовательно, множества, образующие разбиение Π , есть пересечение разбиений $P, \Phi_{-1}P, \Phi_{-2}P, \dots$ и, значит, σ -алгебра α включает все множества $P, \Phi_{-1}P, \Phi_{-2}P, \dots$ вместе с множествами, образованными счетным пересечением этих множеств. Эта σ -алгебра может быть определена как наименьшая σ -алгебра, которая содержит все разбиения $P, \Phi_{-1}P, \Phi_{-2}P, \dots$ и обозначается

$$\alpha = \bigcup_{t=0}^{\infty} \Phi_{-t} P.$$

Таким образом, мы определили процесс измерения. Теперь перейдем к вычислению энтропии.

Пусть μ — некоторая ограниченная инвариантная мера на фазовом пространстве Ω и пусть ν — другая мера, абсолютно непрерывная относительно μ , нормализованная, но необязательно инвариантная. Мы можем предполагать, что ν есть нормализованная плотность на фазовом пространстве Ω , образованная производной Родона-Никодима: $\rho = d\nu/d\mu$. Мы принимаем, что энтропия определяется как

$$h(\nu) = k \int \eta(\rho) d\mu > -\infty,$$

где

$$\eta(x) = \begin{cases} x \log x & (x > 0) \\ 0 & (x = 0), \end{cases}$$

k есть постоянная Больцмана.

Для проблемы предсказания наблюдаемого поведения системы в будущем указанная энтропия излишне детализирована, она содержит информацию, которая не влияет на будущие возможности наблюдаемых результатов. Эта ненужная информация может быть изъята, если мы заменим ρ дифференциальной плотностью вероятности ρ_a и получим среднее для каждого класса эквивалентности наблюдаемых состояний. Математическая формулировка этого „среднего“ дается условным математическим ожиданием относительно алгебры α :

$$\rho_a = E(\rho | \alpha).$$

Следовательно, определение энтропии грубого разбиения дается формулой

$$h(\nu, \alpha) = -k \int \eta(\rho_a) d\mu.$$

Подробнее с вышеизложенным можно ознакомиться в работе [12].

Для конечного разбиения в работа [12] дается следующее определение энтропии неравновесных процессов:

$$h(\nu, \alpha) = -k \inf_{\{A_i\} \in \alpha} \sum \mu(A_i) \eta[\nu(A_i)/\mu(A_i)],$$

где $\inf$ берется по всем конечным разбиениям Ω , элементы которых принадлежат a .

Как сказано выше, энтропийный инвариант Колмогорова связан с энтропией неравновесных процессов. Увеличение неравновесной энтропии в состоянии v после преобразования Φ_1 равно

$$\Delta^{\Phi}(v, a) = h(v_1, a) - h(v, a) = h(v, \Phi^{-1}a) - h(v, a).$$

Рост энтропии для Φ определяется равенством

$$\Delta^{\Phi}(a) = \sup_v \Delta^{\Phi}(v, a),$$

где $\sup$ берется по всем $v \ll \mu$. Положим, Φ эргодично с $n < \infty$. Тогда увеличение энтропии Φ равно

$$\Delta^{\Phi} = \inf \Delta^{\Phi}(a),$$

где $\inf$ берется по всей σ -алгебре $a = a_{\rho}$. Наконец, асимптотическая скорость роста энтропии для Φ равна

$$\Delta_{ac}^{\Phi} = \lim_{t \rightarrow \infty} (1/t) \Delta^{\Phi t}.$$

В работе [13] доказано, что $\Delta_{ac}^{\Phi} = kH(\Phi)$, где $H(\Phi)$ — энтропийный инвариант Колмогорова.

Для конечного разбиения энтропийный инвариант Колмогорова определяется следующим образом. Пусть разбиение $\{A_i^1\}$ меньше разбиения $\{A_i^2\}$, это означает, что каждое множество разбиения $\{A_i^1\}$ является объединением множеств разбиения $\{A_i^2\}$. Тогда

$$H(\Phi) = -\inf_{\{A_i^2\} \in \mathcal{a}} \sum \mu(A_i^2) \eta[v(A_i^2)/\mu(A_i^2)] + \\ + \inf_{\{A_i^1\} \in \mathcal{a}} \sum \mu(A_i^1) \eta[v(A_i^1)/\mu(A_i^1)].$$

Рассмотрим локальный инвариант Колмогорова. Вначале рассмотрим как вычисляется неравновесная энтропия в соответствии с изложенной выше теорией. Для этого мы должны наблюдаемый интервал изменения величины разбить таким образом на подмножества, чтобы сумма мер множеств, входящих в разбиение, равнялась единице. Это разбиение позволит задать нам в соответствии с изложенным выше инвариантную нормализованную меру μ на фазовом пространстве Ω . Мера v в первом приближении — отношение n_i/n , где n_i — число попаданий в i -й интервал разбиения мерой μ , n — общее число измерений. Эта мера нормализована, но не инвариантна. При $n \rightarrow \infty$ отношение n_i/n может изменяться. Очевидно, что мера v зависит от меры μ . Условие непрерывности меры v относительно меры μ означает, что мера μ осуществляет более мелкое разбиение, чем мера v ; или, иначе, мера $\mu \neq 0$ при всяком $v \neq 0$.

В соответствии с изложенным

$$h(v, a) = -\inf_{\{A_i\} \in \mathcal{a}} \sum d_i \eta(n_i/nd_i),$$

где d_i — мера μ разбиения наблюдаемого интервала. Отсюда

$$\begin{aligned} h(v, a) &= -\inf_{\{A_i\} \in a} \sum \frac{dn_i}{nd_i} \log \frac{n_i}{nd_i} = \\ &= \inf_{\{A_i\} \in a} \sum \frac{n_i}{nd_i} \log \frac{n}{n_i} + \inf_{\{A_i\} \in a} \sum \log d_i, \end{aligned}$$

— число множеств разбиений, $d_i = 1/i$ при условии, что μ равномерно.

Здесь мы выбрали равномерное разбиение наблюдаемого интервала. Если сравнить эту формулу расчета неравновесной энтропии с формулой, представленной в работе [17], то она отличается появлением знака $\inf$ и знака суммы у второго слагаемого. Знак $\inf$ обеспечивает однозначность разбиения. Знак суммы появляется в силу того, что даже теоретически [13] измерения имеют ограниченную точность и равномерное разбиение — незаконная идеализация, и мы должны принять утверждение, что $d_i \neq d_k$ при $i \neq k$. Поэтому в первом приближении, т. е. считая, что $d_i = \text{const}$, $i = 1, 2, \dots, m$,

$$h(v, a) = \inf_{\{A_i\} \in a} \sum_{i=1}^m \frac{n_i}{nd} \log \frac{n}{n_i} + m \log d.$$

Такое разбиение условно и практической ценности не имеет и приведено только для того, чтобы продемонстрировать неточность расчета в работе [14]. Кроме того, эта формула иллюстрирует смысл энтропийного инварианта Колмогорова, при возрастающем m мера множеств d_i стремится к постоянной. Раскроем предыдущее выражение:

$$h = \inf \sum_{i=1}^{m+1} \frac{n_i}{nd} \log \frac{n}{n_i} + (m+1) \log d - \inf \sum_{i=1}^m \frac{n_i}{nd} \log \frac{n}{n_i} + m \log d.$$

Первое и третье слагаемые есть неопределенность закона распределения, вызванная конечным числом измерений, и при большом n они становятся близкими, т. е.

$$\inf \sum_{i=1}^{m+1} \frac{n_i}{nd} \log \frac{n}{n_i} - \inf \sum_{i=1}^m \frac{n_i}{nd} \log \frac{n}{n_i} \approx 0,$$

$$h = (m+1) \log d - m \log d = \log d$$

Кроме того, вышеизложенное подтверждает, что равенство

$$h(T) = h(A, T) = -\sum p_i \log p_i$$

является не определением, а следствием эргодической теории [2]. В частности, сдвиги Бернулли $(1/2, 1/2)$ и $(1/3, 1/3, 1/3)$ имеют энтропию соответственно

$$h(T) = \log 2, \quad h(T) = \log 3.$$

Таким образом, из изложенного можно сделать вывод, что инвариантом случайного процесса является энтропийный инвариант Колмогорова.

V. Символическая динамика

Вначале изложим математический факт, разъясняющий наши дальнейшие рассуждения и способствующий широкому применению в практике энтропийного инварианта. Лемма: пусть заданы действительные числа $a_1, \dots, a_n$, тогда величина

$$F(p_1, \dots, p_n) = \sum_{i=1}^n (-p_i \log p_i) + \sum_{i=1}^n p_i d_i$$

достигает своего максимального значения $\log \Delta e^{a_i}$ на симплексе

$$\{(p_1, \dots, p_n) : p_i \geq 0, p_1 + \dots + p_n = 1\}$$

в единственной точке $p_j = e^{a_j} (\sum_i e^{a_i})^{-1}$. Величина $H(p_1, \dots, p_n) = \sum_{i=1}^n (-p_i \log p_i)$ называется энтропией распределения $(p_1, \dots, p_n)$. Член $\sum_i p_i d_i$ есть среднее значение функции $a(i) = a_i$.

Рассмотрим простую бесконечную систему. Поставим в соответствие каждому целому числу физическую систему с n возможными состояниями $1, \dots, n$, связывая с каждым i некоторое $x \in \{1, \dots, n\}$, получаем одну из конфигураций системы: $\dots x_{-2} x_{-1} x_0 x_1 x_2 \dots$ Таким образом, конфигурация — это точка

$$x = \{x_i\}_{i=-\infty}^{\infty} \in \prod_Z \{1, \dots, n\} = \Sigma_n.$$

В частном случае предположим, что мы наблюдаем за системой, регистрируя показания некоего прибора, который, обладая ограниченной точностью, может показывать только конечный набор значений $1, \dots, n$, другими словами, фазовое пространство, на котором действует динамическая система с дискретным временем, есть $X = \bigcup_{i=1}^n E_i$ и при $x \in E_i$ прибор показывает значение i . Множества E_i могут, вообще говоря, пересекаться, т. е. стрелка прибора стоит между делениями. Таким образом, бесконечное число наблюдений образует конфигурацию системы.

Для непрерывной функции $\varphi : \Sigma_n \rightarrow R$ положим, что по определению,

$$\text{var}_k \varphi = \sup \{ |\varphi(x) - \varphi(y)| : x_i = y_i \ \forall \ |i| \leq k \},$$

так как функция φ равномерно непрерывна, $\lim_{k \rightarrow \infty} \text{var}_k \varphi = 0$. Обозначим через F_{Σ_n} семейство всех непрерывных функций $\varphi : \Sigma_n \rightarrow R$, удовлетворяющих условию $\text{var}_k \varphi \leq b \alpha^k$ (при всех $k \geq 0$) с некоторыми положительными константами b и $\alpha \in (0, 1)$.

Определение. Пусть $\mu \in M_0(\Sigma_n)$, где $M_0(\Sigma_n)$ — множество подмножества инвариантных относительно сдвига множества борелевских вероятностных мер, $U = \{U_1, \dots, U_n\}$ — разбиение на цилиндры $U_i = \{x \in \Sigma_n : x_0 = i\}$. Тогда $S(\mu) = h_\mu(0, U)$ называется энтропией по мере μ .

Обозначим

$$\sup_{a_0 \dots a_{m-1}} S_m \varphi = \sup \left\{ \sum_{k=0}^{m-1} \varphi(\sigma^k x) : x \in \Sigma_n, x_i = a_i \right\},$$

$$Z_m(\varphi) = \sum_{a_0 \dots a_{m-1}} \exp(\sup_{a_0 \dots a_{m-1}} S_m \varphi).$$

Оказывается для функции φ существует предел

$$p(\varphi) = \lim_{m \rightarrow \infty} \frac{1}{m} \log Z_m$$

(число $P(\varphi)$ называется давлением, соответствующим φ). В работе [12] доказано, что существует единственная мера $\mu \in M_0(\Sigma_n)$, для которой $S(\mu) + \int \varphi d\mu = P(\varphi)$.

В соответствии с работой [12] $\log Z_m(\varphi)$ может быть разложен на два слагаемых:

$$\log Z_m(\varphi) \cong mS(\mu) + m \int \varphi d\mu,$$

$$\log Z_{m+1}(\varphi) \cong (m+1)S(\mu) + (m+1) \int \varphi d\mu.$$

При $m \rightarrow \infty$

$$m \int \varphi d\mu \cong (m+1) \int \varphi d\mu,$$

отсюда

$$\log Z_{m+1}(\varphi) - \log Z_m(\varphi) = S(\mu).$$

Учитывая, что $S(\mu) = h_\mu(T, D)$, сказанное выше объясняет изложенный в работе [17] метод вычисления энтропийного инварианта Колмогорова.

Фактически $\log Z_m(\varphi)$ — сумма энтропийного инварианта и среднего по мере μ выбранной функции φ , которая каждой последовательности показаний прибора ставит в соответствие некое число из множества рациональных чисел.

VI. Центральная предельная теорема

Для использования на практике изложенной теории необходима доказанная в работе [13] центральная предельная теорема: для всякой функции $\psi \in F_A$ существует такая константа $\sigma = \sigma(\psi) \in [0, \infty]$, что

$$\mu\{x \in \Sigma_A : n^{-1/2} (S_n \psi(x) - n\mu(\psi)) < \tau\} \rightarrow \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\tau} e^{-x^2/2\sigma^2} dx.$$

При $\sigma = 0$ сходимость имеет место для $\tau \neq 0$, а правая часть берется равной 0 при $\tau < 0$ и равной 1 при $\tau > 0$. На основании этой теории и изложенного выше можно записать

$$\mu(n^{-1/2} h_\mu(T, D) > \tau) \rightarrow \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\tau} e^{-x^2/2\sigma^2} dx,$$

где n — число измерений в выборке; σ — дисперсия приращения энтропии на одно измерение; $h_\mu(T, D)$ — среднее значение энтропии за выбранный интервал вычисления.

Эта теорема позволяет оценивать значимость отклонения энтропии, заданной при известном разбиении и известном числе измерений.

VII. Применение энтропийной теории

1. Контроль метрологических характеристик. С этой целью устанавливают рядом с контролируемым прибором два заведомо исправных прибора. При этом один из них используют для задания инвариантной меры разбиения пространства наблюдаемых значений параметра. По этому прибору производят серию синхронных измерений через равные интервалы времени. По полученным рядам наблюдений вычисляют энтропийный инвариант наблюдаемого процесса по контролируемому прибору и второму исправному. И с помощью предельной теоремы при данном уровне значимости определяют, значимо ли расхождение энтропийных инвариантов. При незначимом разбиении контролируемый прибор признается годным. При этом надо иметь в виду, что разбиение пространства в обоих случаях должно быть одинаковым.

2. Нормы точности для заданных станций. Для каждой станции определяют энтропийный инвариант по инвариантной мере задаваемого прибора. При этом разбивают пространство наблюдений на равное число частей. При варьировании числа частей добиваются таких значений энтропийного варианта, чтобы они для обеих станций различались незначимо; размер этого интервала и задает точность, с которой нужно мерить процесс, который наблюдают обе станции.

3. Обнаружение связи между параметрами. Ставится задача обнаружения связи между двумя параметрами. Эта задача аналогична задаче 2.

Все эти задачи объединяет то, что энтропийный инвариант определяет внутреннюю неопределенность по заданной мере, что значит, что при как угодно точных измерениях эту неопределенность не устранить. Для процессов одинаковой внутренней неопределенности можно установить четкую функциональную связь. Учитывая [11], что энтропийный инвариант есть сумма характеристических показателей Ляпунова, значение которого больше 0, можно сказать, что энтропийный инвариант задает скорость приращения неопределенности на одно измерение. Поэтому, если параметры описывают один процесс, энтропийные инварианты по каждому параметру равны. Кстати, именно поэтому в работе [13] указано, что для многомерного процесса нет необходимости определять энтропийный инвариант для каждого параметра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аносов Д. В. Геодезические потоки на замкнутых римановых многообразиях отрицательной кривизны. Труды Математического института им. В. А. Стеклова. — М.: Наука, 1967. — 210 с.
2. Биллингслей М. Эргодическая теория и информация. — М.: Мир, 1969. — 350 с.
3. Боуэн Р. Методы символической динамики. — М.: Мир, 1979. — 352 с.
4. БСЭ. Изд. 3-е. Т. 10. Советская энциклопедия. — 1972. — 592 с.
5. Колмогоров А. Н., Успенский В. А. Алгоритмы и случайность. — В кн.: Теория вероятностей и ее применение. 1987, т. XXXII, вып. 3, с. 425—455.
6. Левин Л. А. О понятии случайной последовательности. — ДАН СССР, 1975, т. 212, № 3, с. 548—556.
7. Орнстейн Д. Эргодическая теория, случайность и динамические системы. — М.: Мир, 1978. — 175 с.

8. Рохлин В. А. Лекции по энтропийной теории преобразований с инвариантной мерой. — Успехи математических наук. — 1967, т. XXII, вып. 5 (137), с. 4—51.
9. Саркисов С. Д. Условия изоморфизма физических систем, заданных границами областей и их возможных состояний. — Изв. АН ЛатвССР. Серия физических и технических наук. — 1983, № 6, с. 79—83.
10. Фомин В. Ф. Метод проверки метеорологических приборов в естественных условиях. — Труды ГГО, 1988, вып. 476, с. 77—82.
11. Электрические измерения неэлектрических величин /Под ред. Н. В. Новицкого. — Л.: Энергия, 1975. — 520 с.
12. Goldstein S., Penrose O. — J. Statist. Phys., 1981, vol. 24, N 2, p. 325—343.
13. Grassberger P., Procaccia J. Phys. Rev., 1983, vol. 28, N 4, p. 2591—2593.
14. Martinez S., Tirapegni E. — Physica, 1983, vol. 182 A, N 3, p. 593—601.
15. Penrose O. — Rep. Prog. Phys., 1979, vol. 42, p. 1937—1997.
16. Prigogane J. — Nature, 1973, vol. 246, p. 67—71.
17. Ratner M. Israel. — J. Math., 1973, vol. 16, p. 181—197.
18. Wehrl A. — Rev. Mod. Phys., 1978, vol. 50, p. 221—260.

ИЗМЕРЕНИЯ И ТЕОРИЯ НЕОБРАТИМОСТИ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В литературе широко дискутируется вопрос об определении понятия „измерение” [2, 3]. В этой связи напомним, что К. Гедель [1], рассматривая вопрос определения вычислимости функции по Тьюрингу, указал, что вопрос, правильно ли определение, не имеет смысла, если понятие вычислимой функции не является интуитивно понятным априори. Соглашаясь с работой [6] о типичности подобной ситуации, можно сказать, что это характерно и для определения измерения. Очевидно, следует понятие „измерение” подобно понятиям множества и натурального числа отнести к числу понятий фундаментальных, которые не могут быть выражены через другие, а должны рассматриваться как неопределяемые.

Поэтому все существующие формулировки понятия измерения следует рассматривать лишь как пояснения, а не как определения. Это отнюдь не означает, что попытки формулирования этого понятия излишни. Нет, конечно, просто нужно иметь в виду, что все эти формулировки отражают более или менее существенные свойства понятия „измерение.”

Эти рассуждения нам необходимы для того, чтобы иметь право взглянуть на понятие измерения несколько в ином ракурсе, нежели это трактуется в нормативно-технической документации, и через понятие измерения выйти на нормы точности.

Для того чтобы говорить о точности измерений в метеорологии, необходимо понятие „измерение” и другие понятия, связанные с измерением, увязать с реальными процессами. Начнем с понятия физической величины. В работе [4] физическая величина определяется как количественная характеристика состояния, полученная в результате предсказуемого измерения. К предсказуемым относятся „измерения, для каждого результата которых существует состояние, в котором измерение приводит с достоверностью к данному результату”. Достоверность означает, что вероятность некоторого определенного результата измерения равна единице.

Хотя изложенное в работе [5] относится к квантовой механике, в статье [10] при рассмотрении второго закона термодинамики отмечено, что в классических системах в соответствии с этим законом существуют ограничения на физически наблюдаемые состояния. Причиной таких ограничений является сильная неустойчивость динамического движения, вследствие чего концепция траектории в фазовом пространстве физически бессмысленна. Это означает, что состояние системы не может быть представлено точкой в пространстве состояний, а обязательно некоторым интервалом.

Интервальные оценки естественным образом получают при оценке математического ожидания. Поэтому можно показать, что любое „состояние” описывается интервальной оценкой среднего значения величины некоторого множества условных для данной системы „мгновенных” значений.

Именно поэтому пространство состояний образует не бесконечное множество состояний, а только конечное множество возможных для данной системы, т. е. шкала прибора должна быть принципиально дискретна. В этой связи можно утверждать, что система может попасть в состояние, наблюдаемое в момент измерения, начав свое движение лишь из конечного числа состояний. Число и свойства начальных состояний определяют шкалу прибора.

Определение физической величины есть по сути количественная характеристика каждого состояния, в котором измерение всегда с достоверностью приводит к данному результату [4]. Задача состоит в том, чтобы идентифицировать состояние по количественным характеристикам, получаем с помощью технических средств. Такую идентификацию можно провести, воспроизводя данное состояние многократно, что в общем случае невозможно. Поэтому естественным представляется следующее определение: физическая величина есть количественная характеристика состояния, полученная в результате измерения в момент t_1 , которое с известной вероятностью в момент времени $t_2 = t_1 + 1$ ед. времени окажется в другом данном состоянии.

Если состояния в моменты времени t_1 и t_2 совпадают, то измерения называются статическими, а в противном случае, динамическими. Из данного определения физической величины следует понятие измерения. Измерение есть взаимно-однозначное отображение множества состояний на множество действительных чисел с применением технических средств. Это определение (без учета приведенного определения физической величины) в работе [8] называется арифметизацией, однако определение физической величины дает основание в соответствии с работой [8] назвать указанную процедуру измерением.

Из данных определений следует, что результат измерения должен быть последовательностью результатов, полученных при измерениях, проводимых через временные интервалы, равные единице времени. Грубо говоря, первое измерение — это обозначение состояния, а последующие служат для описания динамики системы, по которой идентифицируется начальное состояние, с которого мы начали наблюдать систему. Из сказанного выше следует, что погрешность результата измерения складывается из ошибки преобразования множества начальных состояний в числовые характеристики и ошибки идентификации по динамике системы.

Рассмотрим каждую ошибку в отдельности. Начнем с начальных состояний. Пусть мы имеем абстрактную динамическую систему (Γ, U, μ, S_t) [10], где Γ — фазовое пространство; μ — нормализованная мера на борелевой σ -алгебре U измеримых подмножеств Γ ; S_t — группа сохраняющих меру преобразований. Множество начальных состояний есть σ -алгебра $U_0 \subset U$, удовлетворяющая следующим свойствам:

$$1. S_t U_0 = U_t \subset U_{t'}, \text{ если } t \leq t'.$$

$$2. \bigcup_{-\infty}^{\infty} U_t = U.$$

Кроме того,

$$3. \bigcap_{-\infty}^{\infty} U_t = U_{-\infty} = U_0$$

есть тривиальная σ -алгебра, состоящая из всего пространства Γ и всех множеств меры нуль.

Множеством нулевой меры следует считать интервал между двумя отметками на шкале прибора. В этом случае показанием стрелочного прибора является ближайшая отметка слева или справа (по договоренности) от стрелки. Для цифрового прибора множества меры нуль – размер дискретности меньшего разряда.

Поэтому совокупность всех множеств меры нуль дает нам шкалу динамической системы. Разбиение пространства множествами нулевой меры задает неопределенность системы в каждой точке фазового пространства. Трудно назвать эту неопределенность ошибкой, поскольку по смыслу неопределенность именно определяет систему и делает одну динамическую систему отличной от другой. По этому поводу в работе [10] так сказано: „Классическое различие между начальными условиями и законами динамики во многом теряет смысл”. Эту неопределенность можно рассматривать в качестве ошибки нашего представления о динамике системы как траектории в сравнении с реальной. Поэтому борелевскую меру интервала неопределенности назовем ошибкой системы. Именно с этой ошибкой мы в идеальном случае можем описать динамику системы. Ошибка системы – предельная точность описания, допускаемая системой.

Итак, первое слагаемое погрешности – борелевская мера интервала неопределенности. Она никак не связана с измерением.

Рассмотрим второе слагаемое – ошибка идентификации. Для этого вернемся к нашему определению физической величины и измерения. Физическая величина есть численное обозначение состояния объекта, полученное при измерении в момент t_1 , q которым можно сказать, каким числом будет обозначаться состояние, в котором будет находиться объект в момент времени $t_2 = t_1 + 1$ ед. времени. При этом интервал, в который с заданной вероятностью попадет численное обозначение состояния объекта в момент t_2 , и есть ошибка, связанная с ошибкой идентификации.

Из этого определения следует, что результат измерения есть последовательность значений измеряемой величины, а математическое ожидание и дисперсия есть сжатие информации, содержащейся в результате измерений. Следует добавить, дисперсия разности между действительным и измеренным значениями есть не некое новое качество, это – свойство объекта. Погрешность – это свойство системы, состоящей из объекта измерений и средства измерения, позволяющее без проведения измерений утверждать, что числовая характеристика системы находится в интервале, равном погрешности с заданной вероятностью.

Итак, грубо говоря, измерить момент t_1 – это значит сказать без применения средств измерений значение измеренной величины в момент времени t_2 , где $t_2 > t_1$. Или сказать, сколько единиц времени объект находится в каждом состоянии, хотя более приемлемо определение

среднего времени пребывания во всех состояниях, поскольку такая характеристика существует и называется энтропийным инвариантом Колмогорова. Вариант вычисления воспроизведен в статье [7].

Рассматривая как результат измерений последовательность чисел в некоей шкале, получаемых в результате измерений через равные интервалы времени, обнаруживаем много общего в статических и динамических измерениях, по сути они отличаются только пространствами возможных состояний.

Итак, мы определили, что такое физическая величина и что такое измерение и погрешность измерений. Исходя из этих представлений, определим, что такое нормы точности измерений. При этом в качестве модели измерений примем модель, изложенную в работе [9].

В связи с поставленной задачей зададим себе вопрос, а насколько актуальна эта задача. В статье [5] актуальность этой задачи показана для случая, когда стоит вопрос: с какой точностью следует выполнить прямые измерения некоторых величин $l_1, l_2, \dots, l_n$, чтобы определить с заданной точностью функционально связанные величины $x_1, x_2, \dots, x_m, m \leq n$?

В нашей трактовке измерения вопрос, поставленный в работе [8], звучит так: с какой точностью следует выполнить измерение величины l_1 , чтобы определить точность функционально связанной величины l_2 , $t_1 < t_2$?

Наше понимание измерения и норм точности полностью основано на общей теории необратимости динамических систем, предложенной Мисра-Пригожин-Курбаж.

Любая динамическая система описывается системой дифференциальных уравнений. Движение этой системы описывается решением системы уравнений при заданных начальных условиях. В соответствии с нашим пониманием измерения нормы точности и есть задание начальных условий.

Наша задача на языке дифференциальных уравнений звучит так: как задать начальные условия $x_0 \in A$, чтобы решение дифференциального уравнения в момент времени t было бы задано x_t ? Грубо говоря, пространство состояний системы надо разбить таким образом, чтобы система, исходя из любого одного состояния, попадала в любое другое состояние с вероятностью, постоянной и характерной для данного состояния системы. Диаметры множеств, составляющих разбиение пространства, и будут нормами точности динамической системы.

Из этого следует, что норма точности не есть постоянное значение на пространстве состояний. В качестве нормы точности можно взять диаметр наименьшего множества либо среднего, либо средневзвешенного множества.

Указанные нормы точности — это так называемые точности самой исследуемой системы. Естественно, что точность, с какой нам следует отслеживать поведение системы (одним из показателей точности является погрешность прибора), должна быть выше точности исследуемой системы. Причем, если точность трактовать как вероятностные меры, вероятностная мера системы должна быть абсолютно непрерывна относительно

вероятностной меры измерительного прибора [9]. Построение такой меры излагается в работе [9].

Кратко остановимся на выводах, которые можно сделать из некоторых высказываний, изложенных в работе [10].

1. „Второй закон термодинамики на макроскопическом уровне требует, чтобы мера, которая ведет к равновесию при $t \rightarrow \infty$, либо наблюдаемая в природе, либо приготовленная в лаборатории, была единственная”.

Исходя из этого, можно сказать, что каждая реализация случайного процесса (для достижения максимальной точности описания) требует собственного прибора. Поэтому для описания процессов все измерения должны осуществляться дискретными приборами с простейшей схемой взвешивания сигнала на каждом дискрете с последующей обработкой результатов взвешивания на вычислительном устройстве; в этом случае обеспечивается максимум числа воспроизводимых мер при данном размере дискрета.

2. „... энтропия, связанная с растягивающим слоем, конечна, в то время как энтропия, связанная с сжимающим слоем, бесконечна”.

Это означает, что для точного описания динамики движения системы нужно бесконечное число измерений, а для описания области, определяющей погрешность измерений, достаточно конечного числа измерений.

В заключение укажем, что определение погрешности измерения свободно от привлечения достаточно туманного понятия „истинное значение измеряемой величины”; предложенное понимание этих терминов дает возможность увязать как неразрывное целое понятия физической величины, измерения и погрешности измерений; основной вывод заключается в том, что система эталонов физических величин для развития каждой отрасли познания и во всяком случае для поддержания достигнутого уровня отражения действительности, вообще говоря, необходима. Система эталонов необходима для формирования познания как целостного процесса, где каждая отрасль познания развивается за счет внутреннего самопознания и, кроме того, является движущей силой для развития других отраслей познания. Поэтому и значение системы эталонов в той или иной отрасли определяется источниками развития самой отрасли.

Именно поэтому наиболее подходящими способами передачи единицы измерения, поддержания парка средств измерений в должном состоянии является сравнение в естественных условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гедель К. Математическая теория логического вывода. — В кн.: Сб. переводов под ред. А. В. Идельсона. М., Наука, 1967.
2. Гносеологические основы исходных положений метрологии /В. А. Грановский, Л. М. Гутнер, Л. И. Довбета, В. В. Лячев. — Измерительная техника, 1988, № 1.
3. Земельман М. А. К вопросу о понятии „измерение”. — Измерительная техника, 1988, № 2.
4. Ландау Л. Д., Лившиц Е. М. Квантовая механика. — В кн.: Нерелятивистская теория. М., Наука, 1977, т. 3.

5. Пицык В. В. Многомерная задача обоснования требований к точности прямых измерений. — Метрология, 1988, № 1.
6. Успенский В. А., Семенов А. Л. Теория алгоритмов: основные открытия и приложения. — М.: Наука, 1987.
7. Фомин В. Ф. Применение энтропии Колмогорова в метеорологических измерениях. — См. наст. сборник.
8. Фридман А. А. Мир как пространство и время. — М.: Наука, 1965.
9. Goldstein S., Penrose O. J. Statist. Phys. v. 24, no. 2, p. p. 325—343, 1981.
10. Courbage M., Prigogine I., Proc. Nat. Acad. Sci. USA, 1983, v. 80, no. 8, p. 2412—2416.

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПОВЕРКИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВЕТРА

Измерения характеристик ветра необходимы для улучшения атмосферных процессов и имеют исключительно важное прикладное значение. Данные о параметрах ветра нужны для проектирования и строительства народнохозяйственных объектов, для оперативного обслуживания авиации, промышленного и гражданского строительства, а также для обеспечения контроля промышленных выбросов в атмосферу.

Ветер представляет собой величину векторную, которая определяется как значением, так и направлением вектора в пространстве.

Для метеорологических целей определяется несколько характеристик ветра [4]: средняя скорость ветра за выбранный интервал времени (2, 10, 20 мин и т. д.); мгновенная скорость ветра – скорость, осредненная за 3–5 с; максимальная скорость ветра (при порывах) – наибольшее значение мгновенной скорости. За направление ветра принимается направление горизонтальной составляющей скорости воздушного потока, которая значительно превосходит вертикальную составляющую. Направление ветра определяется углом между меридианом и направлением на точку горизонта, откуда дует ветер. Этот угол отсчитывается по часовой стрелке от географического севера и измеряется в градусах плоского угла. Среднее направление ветра – среднее значение угла направления за выбранный интервал времени.

Средства измерения (СИ) параметров ветра могут быть квалифицированы с различных точек зрения. Во-первых, какими являются эти приборы: интегрирующими, вырабатывающими среднее значение скорости $v_{\text{ср}}$ за некоторый интервал времени T , или дающими мгновенные значения скорости ветра $v_{\text{мг}}$; во-вторых, какую форму имеет чувствительный элемент (ЧЭ), непосредственно воспринимающий скорость ветра. Классификация СИ может быть произведена по типу измерительного преобразователя (ИП). Интервал осреднения T выбирается из условия, чтобы среднее квадратическое отклонение $S(\Delta)$ было в пределах 10 %. Обычно этому условию удовлетворяет интервал осреднения $T = 10$ мин [1, 7].

Большинство рабочих СИ параметров ветра являются интегрирующими приборами, измеряющими $v_{\text{ср}}$ за $T = 10$ мин в диапазоне скоростей воздушного потока 1–60 м/с. Осреднение производится методом дискретного или скользящего осреднения [7]. К интегрирующим приборам относится группа анемометров, измеряющих только среднюю скорость ветра и различающихся конструкцией, диапазоном измерения $v_{\text{ср}}$, а также интервалом T , который может быть от 100 с до 5 мин. Часть рабочих СИ параметров ветра можно выделить в группу анемометров и анеморумбометров, измеряющих только $v_{\text{мг}}$.

Все СИ параметров ветра могут быть разделены еще на две большие группы по типу ЧЭ: чашечные и винтовые. Наиболее часто употребляются ветроприемники с тремя и четырьмя чашками. Чашечные анемометры в

основном измеряют $v_{\text{ср}}$ и $v_{\text{мг}}$. Недостатком чашечного анемометра является зависимость его градуировочной характеристики не только от постоянства сил трения $F_{\text{тр}}$ на оси вращения чаши (т. е. от порога реагирования ρ_0), но и от постоянства коэффициентов лобового сопротивления сторон чашек $R_{\text{лоб}}$. Изменение $R_{\text{лоб}}$ от степени турбулентности потока (даже при условии $v = \text{const}$) приводит к изменению коэффициента анемометра K и, как следствие, к нарушению выходной градуировочной характеристики при его работе в турбулентной атмосфере. Таким образом, градуировка чашечного анемометра при работе его в естественной турбулентной среде (атмосфере) становится крайне нелинейной и нестабильной. В случае мелкомасштабной турбулентности, когда размеры вихрей соизмеримы с размерами чашек, эти нарушения могут быть значительными.

В последние годы получили широкое распространение ЧЭ, выполненные в виде четырехлопастного винта (профильного), изготавливаемого из теплопластика. По сравнению с ЧЭ чашечного анемометра винт имеет меньшую инерционность, а момент трения, развиваемый им, будет постоянным в пределах одного оборота. Коэффициент винта K зависит от постоянства угла атаки α лопастей, т. е. от сохранности в конечном итоге геометрических размеров винта, и не зависит от скорости и турбулентности воздушного потока. Следовательно, выходная градуировочная характеристика винтовых СИ параметров ветра остается линейной и достаточно стабильной при работе в естественной турбулентной атмосфере.

По виду выходного сигнала рабочие СИ параметров ветра можно разделить на основные группы:

1. Механические СИ, у которых приемная и указывающие части и связи между ними основаны на механических принципах. Такие СИ имеют чашечный анемометр, закрепляемый на вертикальной оси. Так как механических СИ значение v_0 со временем может изменяться, то они требуют периодической проверки.

2. Средства измерения параметров ветра, основанные на преобразовании скорости вращения ЧЭ в электрические величины, т. е. $U_{\text{вых}} = f(v)$. Преобразователем зависимости $U_{\text{вых}} = f(v)$, обычно являются тахогенераторы переменного тока. Недостатком таких СИ является отклонение выходной градуировочной характеристики на больших скоростях воздушного потока от линейной зависимости.

3. Импульсные СИ, выходным сигналом которых являются последовательности электрических импульсов, пропорциональные по частоте f определенному числу оборотов ветроприемника N . Для преобразования скорости вращения ЧЭ в электрические импульсы применяются различного рода контактные устройства. Импульсные СИ параметров ветра обычно имеют линейную выходную градуировочную характеристику и широко используются на сети Госкомгидромета СССР.

Для определения направления ветра используются флюгарки, представляющие собой в упрощенном виде жесткую несимметричную (относительно вертикальной оси) систему из пластины и противовеса, которая свободно вращается вокруг вертикальной оси. Под воздействием воздушного потока флюгарка устанавливается в плоскость его и противо-

весом навстречу потоку. Угол поворота флюгарки относительно ориентира СИ (направленного на север) также преобразуется в электрический сигнал, поступающий на вторичный прибор, шкала которого отградуирована в градусах (иногда в румбах).

Большинство современных рабочих СИ скорости ветра позволяют измерять среднюю скорость ветра v_{cp} с допускаемой основной погрешностью Δ_d м/с, составляющей

$$\Delta_d \leq \pm (0,5 + 0,05 v_{cp}) \text{ м/с.} \quad (1)$$

Из выражения (1) видно, что нижнее предельное значение $v_{cp} = 1$ м/с измеряется с погрешностью $\delta = \pm 0,55 \%$.

Погрешность, нормируемая формулой (1), складывается из следующих составляющих:

Первая составляющая – погрешность за счет неточности (неидентичности) изготовления ЧЭ (чашек и винтов), что приводит к разбросу выходных характеристик.

Вторая составляющая – погрешность, вносимая ИП скорости ветра и элементами дистанционных передач.

Третья составляющая – погрешность за счет завышения значений v_{cp} пульсирующего потока при изменении его вращающимся ЧЭ (чашка или винт).

Четвертая составляющая – погрешность за счет моментов трения и нагрузки (начальный порог реагирования v_0).

Пятая составляющая – погрешность за счет выбираемого метода осреднения.

Первые четыре составляющие погрешности относятся в принципе к инструментальной погрешности, а последняя – к методической.

Первая составляющая погрешности (за счет неточности изготовления чашек или винтов) составляет 1,5–2 %.

Вторая составляющая погрешности зависит от конкретно выбранной схемы преобразования или дистанционной передачи.

Третья составляющая погрешности зависит от инерции (пути синхронизации) чашки или винта, степени пульсации (коэффициента турбулентности) потока $\Delta v_{cp}/v_{cp}$ и отношения пути, проходимого потоком за половину периода пульсации, к пути синхронизации, т. е. $v_{cp} \cdot \tau/L$, где Δv_{cp} – осредненная амплитуда пульсации скорости ветра относительно его среднего значения v_{cp} ; τ – время полупериода пульсации; L – путь синхронизации. Для винтовых анемометров средние значения погрешности измерения (завышения) v_{cp} при $\Delta v_{cp}/v_{cp} \approx 1,3$ составляют 5–6 %, для чашечных – до 11 %.

Четвертая составляющая погрешности зависит от значения v в нижнем пределе измерения D_n . Эта погрешность возрастает при возрастании отношения v_0 и D_n . Погрешность имеет отрицательный знак и, как показано в работе [6], это приводит к занижению малых значений скорости ветра.

Пятая составляющая погрешности зависит от выбранного метода осреднения (дискретного, скользящего и векторного). За счет дискрет

ного осреднения погрешность может достигать значения 8–10 %; при векторном осреднении – 10 % (при среднем квадратическом значении флуктуации угла направления, равном ± 25 %).

Поверка рабочих СИ скорости воздушного потока может осуществляться двумя методами. Первый метод основан на том, что СИ движется в спокойном воздухе и измеряется скорость перемещения самого СИ. Перемещение СИ скорости ветра может осуществляться на прямолинейном участке и по окружности. Для прямолинейного движения используются специальные тарировочные лотки, для кругового – ротационные станочки, представляющие собой рычаг, на одном конце которого устанавливается поверяемый прибор, на другом – противовес. Постоянство скорости движения СИ обеспечивается равномерностью вращения рычага, приводимого во вращение электродвигателем. Линейная скорость движения прибора определяется радиусом вращения рычага R и значением угловой скорости ω :

$$v = \omega R = 2\pi Rn, \quad (2)$$

где n – число оборотов рычага за 1 с.

С этим значением скорости сравниваются показания СИ. Скорость прямолинейного движения поверяемого СИ определяется длиной пути перемещения и временем, за которое СИ пройдет это расстояние. Описанный метод является абсолютным, но ввиду сложности оборудования, а также появления спутной струи при поверке на ротационной установке метод не получил широкого распространения и в основном использовался для поверки СИ скорости ветра на малых скоростях.

Второй метод основан на аэродинамических исследованиях и поверке рабочих СИ скорости ветра при создании искусственного воздушного потока, в котором неподвижно устанавливается поверяемое СИ. Основными требованиями, предъявляемыми к воздушному потоку, являются равномерное распределение скоростей в рабочей зоне трубы с различными сечениями, постоянство потока во времени как по значению, так и по направлению, минимальное значение пульсаций воздушного потока в рабочей зоне. Воздушный поток различной скорости создается в аэродинамических трубах с помощью вентилятора. Трубы имеют специальные устройства, обеспечивающие требования, предъявляемые к воздушному потоку. По характеру движения воздушного потока аэродинамические трубы делятся на два типа: замкнутые и прямого действия (с открытой или закрытой рабочей частью).

Измерение скорости потока в аэродинамических трубах (АТ) может быть осуществлено двумя принципиально различными методами: абсолютным и косвенным, основанным на различных физических эффектах, вызываемых движением среды, или на связи скорости с другими параметрами потока, поддающимися измерению.

Анализ существующих методов и средств измерения скорости ветра указывает, что в качестве абсолютного метода может быть использован метод меток потока или ультразвуковой метод. Для измерения скорости потока методом меток в поток необходимо ввести инородное тело,

которое увлекалось бы со скоростью этого потока, или как-то выделить группу частиц воздуха. В качестве таких частиц (меток) могут использоваться ионы, α -частицы, флюоресцирующие или отражающие свет механические частицы. Измерительная схема состоит из элемента, формирующего метод, и регистрирующего элемента. Скорость потока определяется в этом случае временем перемещения частицы (метки) на известное расстояние или расстоянием, пройденным частицей (меткой) за известное время. Погрешность измерения скорости воздушного потока методом меток не превышает 2 %. При очевидных преимуществах этого метода его применение связано с рядом ограничений, накладываемых свойствами меток. К их числу следует отнести короткое время существования меток, которое определяется в случае ионных – временем рекомбинации, в случае тепловых – скоростью выравнивания температур. Следствием этого является необходимость повышать мощность формирования меток и уменьшать расстояние между излучателем и регистратором.

К абсолютному методу измерения скорости следует также отнести измерения ультразвуковым анемометром, принцип действия которого основан на измерении скоса луча ультразвуковых колебаний потока, времени прохождения ультразвуковых колебаний, сдвига фазы ультразвукового колебания в зависимости от скорости потока и частоты следования ультразвуковых импульсов. В работе [2] показано, что усовершенствованный прибор позволяет измерять скорость потока в газе с погрешностью, не превышающей 1 %. Выше был описан принцип действия одноканального ультразвукового анемометра (один излучатель ультразвуковых колебаний).

Недостатком одноканальных систем является постоянство скорости звука при изменении параметров окружающей среды (температуры и влажности воздуха, давления газа). Недостатки, присущие одноканальным системам, могут быть в значительной мере или полностью исключены в двухканальных системах, представляющих собой объединение двух одноканальных систем, в одной из которых направление распространения звука совпадает с направлением потока, а в другой – противоположно. Система двухканального ультразвукового анемометра, основанная на измерении разности частот импульсно-модулированных ультразвуковых колебаний, направленных одновременно по потоку и против него, позволяет исключить влияние непостоянства скорости звука на измерение скорости потока. Скорость потока может быть вычислена по формуле

$$v = \frac{(F - F_1)L}{2} = \frac{1}{2} L \frac{n - n_1}{t}, \quad (3)$$

где n, n_1 – число импульсов в каждом канале за время осреднения t ; L – база между излучателем и приемником.

Регистрация разности частот ΔF может быть осуществлена импульсными счетчиками, установленными в одном и другом каналах, с последующим вычитанием их показаний либо с помощью специального счетчика с двумя входами, автоматически осуществляющего вычитание. Максимальная погрешность определения скорости потока будет опреде-

ляться погрешностью измерения длины базы ΔL , числа импульсов $\Delta(n - n_1)$ и времени осреднения Δt :

$$\frac{\Delta v}{v} = \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta t}{t} + \frac{\Delta(n - n_1)}{n - n_1}. \quad (4)$$

Если время осреднения с помощью реле времени определяется с погрешностью 0,5 %, длина базы может быть измерена с точностью до 1 мм и пересчетное устройство может дать ошибку ± 1 импульс на каждые 100 импульсов разности, то при $L = 0,2$ м и $t = 10$ мин максимальная погрешность измерения скорости потока равна 2 % измеряемой величины. Излучатель и регистратор, установленные непосредственно в потоке, вносят возмущения и искажают характеристики потока. С целью исключения этого влияния излучателя и приемные преобразователя устанавливают на границе струи под углом к направлению потока таким образом, что базы каналов пересекаются. В этом случае рабочая формула за время осреднения t и при угле наклона α осей каналов к нормали вектора скорости потока без учета асимметрии каналов имеет вид:

$$v = \frac{Nd}{t \cdot \sin 2\alpha}, \quad (5)$$

где N — разность числа импульсов в каналах; d — диаметр рабочего сечения АТ.

Суммарная относительная погрешность измерения скорости потока будет равна:

$$\frac{\Delta v}{v} = \frac{\Delta N}{N} + \frac{\Delta d}{d} + \frac{\Delta t}{t} + \frac{\Delta(\sin 2\alpha)}{\sin 2\alpha}. \quad (6)$$

При наиболее неблагоприятных условиях она составляет 2,5 %. Погрешность измерения увеличивается за счет асимметрии каналов по длине базы и углов наклона.

Недостатком ультразвуковых анемометров является сложность аппаратуры: рассеивание энергии ультразвука на неоднородностях турбулентного потока.

В практике аэродинамики для измерения скорости воздушного потока широко используются косвенные методы, которые основаны на зависимости скорости потока от температуры T , давления p или плотности ρ . Из всех этих трех статистических параметров лишь давление может быть измерено непосредственно. Поэтому основным методом определения скорости потока является так называемый пневмометрический метод, основанный на измерении давлений. В рассматриваемой точке воздушного потока полное давление p может быть выражено уравнением Бернулли:

$$p = p_{ст} + p_{дин}, \quad (7)$$

где $p_{ст}$ — статическое давление, т. е. давление воздуха, находящегося в состоянии покоя; $p_{дин}$ — динамическое давление (скоростной напор),

зависящее от плотности воздуха ρ , скорости его движения v .

Динамическое давление определяется соотношением

$$P_{\text{дин}} = \frac{\rho v^2}{2}. \quad (8)$$

Тогда выражение (7) можно записать в виде

$$P_{\text{дин}} = \frac{\rho v^2}{2} P - P_{\text{ст}}. \quad (9)$$

Из формулы (9) следует, что скорость воздушного потока равна

$$v = \sqrt{\frac{2(P - P_{\text{ст}})}{\rho}} = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}. \quad (10)$$

Таким образом, для определения скорости воздушного потока в формуле (10) необходимо найти разность между полным давлением P и статистическим $P_{\text{ст}}$. Разность эта может быть измерена устройством, состоящим из приемной и регистрирующей частей. Приемные части обычно представляют собой различные насадки: дифференциальные напорные трубки Пито-Прандтля (пневмометрические), цилиндрические и шаровые зонды. В качестве регистрирующих частей используются различного типа манометры. В общем случае в качестве приемной части устройства для измерения скорости воздушного потока может служить тело любой формы, в двух точках поверхности которого имеются отверстия, соединенные с регистрирующей частью устройства (манометром). Одно из отверстий обычно располагается в критической точке тела так, что на один из входов манометра, сообщенного с этим отверстием, воздействует полное давление P , а на другой вход манометра воздействует статическое давление $P_{\text{ст}}$ воздушного потока. Приемные части устройства имеют различную геометрическую форму и характеризуются коэффициентом ζ , значение которого определяется формой и расположением приемных отверстий. Коэффициент ζ в общем случае зависит от числа Рейнольдса и скорости воздушного потока. Начиная со скорости воздушного потока 4 м/с и до 60 м/с коэффициент ζ практически остается постоянным и мало отличается от единицы.

Достоинством пневмометрических трубок является то, что изготовленные их геометрические копии имеют практически то же значение коэффициентов ζ . Пневмометрические трубки мало чувствительны к небольшим отклонениям их от оси воздушного потока. Например, для конусообразных пневмометрических трубок при угле отклонения $\Delta\alpha = 5^\circ$ погрешность в измерении скорости воздушного потока составляет менее 0,3 %, а для полусферических (оживальных) форм приемного отверстия трубки при $\Delta\alpha = 15^\circ$ погрешность в измерении скорости воздушного потока составляет 0,3–0,8 %. Рабочая формула для вычисления скорости воздушного потока с учетом коэффициента трубки (независимо от ее размеров и формы приемной головки) имеет вид:

$$v = \xi \sqrt{\frac{2(p_2 - p_1)}{\rho}}, \quad (11)$$

где ρ — плотность воздуха; $p_2 - p_1$ — отсчеты чисел делений по манометру; ξ — коэффициент трубки.

В подавляющем большинстве случаев в аэродинамических трубах в качестве приемных частей используются специальные отверстия малого диаметра (0,5 мм), просверленные на входе и выходе сопла или диффузора. Они используются в том случае, если в рабочей зоне АТ нельзя одновременно разместить дифференциальную напорную трубку и поверяемое СИ скорости ветра без взаимного влияния их друг на друга в воздушном потоке. Эти отверстия (коллекторные) градуируются с применением аттестованной (образцовой) дифференциальной напорной трубки, устанавливаемой в центре рабочей зоны АТ. В этом случае скорость воздушного потока измеряется по перепаду статических давлений в двух сечениях сопла АТ. Отсюда полное давление воздушного потока в сечениях входа и выхода сопла будет отличаться, согласно уравнению Бернулли, на величину потерь между ними:

$$p_{\text{вх}} + \frac{\rho v_{\text{вх}}^2}{2} = p_{\text{вых}} + \frac{\rho v_{\text{вых}}^2}{2} + K \frac{\rho v_{\text{вых}}^2}{2}, \quad (12)$$

где K — коэффициент потерь; $p_{\text{вх}}$, $p_{\text{вых}}$, $v_{\text{вх}}$, $v_{\text{вых}}$ — статические давления и скорости воздушного потока на входе и выходе сопла АТ.

Скорость воздушного потока рассчитывается по формуле, аналогичной формуле (11). При использовании дифференциальных напорных трубок возникают источники дополнительных погрешностей измерения скорости воздушного потока. Основным из этих источников погрешности является зависимость плотности воздуха от температуры и атмосферного давления. Погрешность измерения скорости воздушного потока за счет изменения температуры воздуха и атмосферного давления в процессе поверки может быть рассчитана по формуле

$$\frac{\Delta v}{v} = \frac{1}{2} \left[\frac{\Delta t}{273 + t} + \frac{\Delta p}{p} + \frac{\rho \Delta t}{1 + \beta(t - 15)} \right] \cdot 100\%. \quad (13)$$

Для измерения в процессе поверки давления и температуры воздуха в АТ обычно используется чашечный барометр и ртутный (бывает спиртовой) термометр. Максимальная погрешность измерения давления $\Delta p = \pm 0,5$ гПа, а температуры воздуха $\Delta t = \pm (0,5 \dots 1,0)$ °С. При давлении 700 гПа и температуре воздуха 10 °С максимальная погрешность в измерении скорости воздушного потока в АТ составляет

$$\left. \frac{\Delta v}{v} \right|_{\text{max}} = \frac{1}{2} (0,4\% + 0,07\% + 0,1\%) = 0,3\%. \quad (14)$$

Кроме отмеченных выше источников погрешностей на погрешность измерения скорости воздушного потока оказывает влияние нестабильность потока во времени. Нестабильность потока в АТ связана не только с

колебаниями напряжения питающей сети, но и с конструкцией трубы. В трубах с открытой рабочей зоной иногда возникают пульсации потока, связанные с вихреобразованиями на выходе сопла и границах свободной струи. Оценить вклад этой составляющей погрешности бывает довольно затруднительно, так как имеет место инерционность манометрической системы при измерении перепада давления. Для исключения случайных ошибок за счет колебаний воздушного потока в рабочей зоне АТ на практике принято делать несколько отсчетов по манометру, поэтому влияние колебаний на измерение скорости воздушного потока незначительно. Необходимо учитывать еще один источник погрешности измерения скорости воздушного потока АТ. Этим источником является взаимное влияние поверяемого СИ и АТ. Известно, что в трубе с закрытой рабочей зоной воздух обтекает модель со скоростью, которая будет больше, чем скорость, измеренная вверх по потоку (например, на выходе из сопла). В трубе с открытой рабочей зоной скорость потока в месте расположения модели будет меньше. Этот эффект получил название загромождения потока моделью. Погрешность измерения скорости воздушного потока за счет загромождения является систематической и может быть учтена.

При поверке рабочих СИ скорости ветра, габариты которых позволяют установить в этом же сечении рабочей зоны пневмометрическую трубку без взаимного влияния, эта погрешность отсутствует. Так как большинство рабочих СИ имеют значительные размеры (диаметр винта 250...400 мм), а диаметры рабочего сечения труб бывают 0,6...1,0 м, скорость потока измеряется по градуированным коллекторным отверстиям входа и выхода сопла и при этом необходимо учитывать поправку на загромождение потока. Размер поправки зависит от соотношения размеров поверяемого СИ и рабочего сечения трубы.

Ранее проведенные исследования показали, что если площадь поверяемого СИ не превышает 5 % площади сечения трубы (рабочей зоны), то поправкой на загромождение потока можно пренебречь [11]. Например, для четырехлопастного профильного винта диаметром 400 мм, широко применяемого в качестве чувствительного элемента в анеморумбометрах типа М-63М-1, поправка на загромождение потока незначительна. Уменьшение поправки обусловлено хорошей обтекаемостью винта и прибора в целом.

Рассмотрим регистрирующие устройства, применяемые в практике поверки и подключаемые к выходу образцовых СИ скорости воздушного потока. При современных аэродинамических экспериментальных исследованиях для измерения перепада давлений Δp нашли широкое применение дифференциальные манометры механического типа с упругими чувствительными элементами (пружина Бурдо, сифон или мембрана); электрические датчики давления, преобразующие деформацию чувствительного элемента в электрический сигнал; жидкостные манометры.

Из разнообразия конструкций дифференциальных манометров механического типа следует отметить конструкцию манометра, состоящего из сифонов и автоматического рычажного весового элемента. Внутри сифонов подводятся давления P_1 и P_2 , разность которых необходимо

измерить. Разность давлений, кроме того, при равенстве плеч рычага и эффективной площади сильфонов можно вычислить по формуле

$$p = \frac{Gt}{aF} n, \quad (15)$$

где G – вес подвижного груза; n – число оборотов ходового винта; t – шаг винта; a – плечо рычага; F – эффективная площадь сильфона.

Такая конструкция манометра позволяет измерять давление и соответствующую ему скорость воздушного потока от 13 м/с и более.

Для измерения малых разностей давления представляют интерес емкостные компенсационные манометры, в которых сила давления на мембрану уравнивается электростатическими силами, т. е. перемещение мембраны под действием разности давлений по обе ее стороны компенсируется электростатическими силами, регулируемые при помощи тарировочного потенциометра. Погрешность манометров составляет 0,1 %. Такие манометры обеспечивают измерение скорости воздушного потока от 1,5 до 5,0 м/с с погрешностью 0,05 %.

Кроме емкостных манометров при аэродинамических измерениях используются индуктивные датчики и тензодатчики.

Следует отметить, что при выполнении аэродинамических измерений значения давления и скоростей потока меняются в очень широких пределах, поэтому ни один прибор не может работать во всем диапазоне измеряемых давлений с достаточной степенью точности.

Наибольшее распространение в качестве регистрирующих устройств получили жидкостные манометры, которые по принципу измерения можно разделить на две группы: манометры непосредственного отсчета и манометры нулевого типа.

В манометрах непосредственного отсчета обычно измеряется разность между двумя высотами поверхностей жидкости в сообщающихся сосудах. Каждая из высот определяется по отношению к неподвижной раме прибора. Высота столба жидкости, уравнивающая разность давлений $p_1 - p_2$, равна $h = h_1 + h_2$. Так как объем жидкости, вытесненный из резервуара с площадью сечения F_2 , равен объему жидкости, вошедшей в измерительную трубку с площадью сечения F_1 , то измеряемая разность давлений будет:

$$p_1 - p_2 = k_1 \gamma \left(1 + \frac{F_1}{F_2} \right), \quad (16)$$

где γ – плотность жидкости.

Отношение F_1/F_2 учитывает изменение уровня рабочей жидкости в резервуаре и определяют чувствительность K манометра

$$K = \frac{1}{1 + (F_1/F_2)^2}. \quad (17)$$

К манометрам такого типа следует отнести микроманометр с оптической системой измерения высоты столба жидкости и микроманометр

Прандтля с демпфирующим устройством. Для увеличения чувствительности манометра и точности измерения давления обычно его узкую трубку устанавливают под разными фиксированными углами в зависимости от диапазона измерения.

Действие микроманометров нулевого типа основано на компенсации уровня жидкости, вызванного измеряемой разностью давлений либо перемещением одного из резервуаров прибора, либо поворотом всего прибора. В настоящее время серийно выпускаются микроманометры компенсационного типа МКВ-250 (класс точности 0,02 %). В таких микроманометрах при измерении разности давлений один из сосудов перемещают вверх до тех пор, пока уровень жидкости в другом сосуде не придет в первоначальное положение, определяемое острием и его зеркальным отражением. Разность давлений отсчитывается непосредственно по шкалам и рассчитывается по формуле

$$\Delta p = p_1 - p_2 = h \rho g, \quad (18)$$

где h – высота по шкале; ρ – плотность жидкости (дистиллированная вода); g – местное ускорение свободного падения.

Суммарная погрешность измерения будет складываться из ошибки отсчета по шкале 0,01 мм и ошибки приведения острия в касание со своим зеркальным отражением 0,01 мм. Суммарная максимальная случайная погрешность измерения разности давлений рассчитывается по формуле

$$\frac{\Delta(\Delta p)}{\Delta p} = \frac{0,02}{h}. \quad (19)$$

Высокую чувствительность микроманометров и точность измерения ими можно получить, если измерение высоты столба жидкости в них заменить измерением сил с помощью рычажных весов. Такие приборы получили название колокольных микроманометров непосредственного отсчета. В качестве измерителя разности давлений в колоколах применяются еще гидростатические весы, работающие на компенсационном методе, когда разность давлений в колоколах уравнивается грузом, приводящим стрелку весов в исходное нулевое положение. Рабочая формула для измерения разности давлений гидростатическими весами имеет следующий вид:

$$\Delta p = p_1 - p_2 = g/F, \quad (20)$$

где g – вес груза, восстанавливающий равновесие; F – площадь сечения колокола.

Поскольку оба колокола нельзя сделать одинаковыми, уравнение (20) с учетом этого фактора можно представить в следующем виде:

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \frac{g}{F_1 [1 - (f_2 - f_1)/(F_2 - F_1)]}, \quad (21)$$

где F_1 – площадь внутреннего поперечного сечения правого колокола; f_1 , f_2 – кольцевая площадь поперечного сечения стенок правого и левого

колоколов соответственно; F_2 – суммарная площадь свободной поверхности жидкости в ванне и левом колоколе, которая вычисляется по разности

$$F_2 = a - (f_2 + C), \quad (22)$$

где a – внутренняя площадь ванны; C – внешняя площадь трубы, подведенной под колокол.

Подставив в формулу (21) значения площадей, можно получить простое выражение для расчета Δp :

$$\Delta p = p_2 - p_1 = K g. \quad (23)$$

Погрешность измерения Δp будет определяться погрешностью определения коэффициента K в формуле (23) и чувствительностью весов. Погрешность определения K составляет 0,2 %. Гидростатические весы позволяют измерять разность давлений, что соответствует скоростям воздушного потока $0,3 \div 12$ м/с.

Следует отметить, что микроанометры такого типа не получили широкого распространения при проведении поверочных работ. Наибольшее распространение в практике поверки СИ скорости ветра получили компенсационные микроанометры нулевого типа МКВ-250, а также микроанометры типа ММН-240 с наклонной измерительной трубкой, которая может устанавливаться под различными строго фиксированными углами. Ниже в процентах представлены рассчитанные значения допускаемой относительной погрешности для разных типов микроанометров и при различных скоростях воздушного потока, задаваемых в аэродинамических установках.

Тип (класс точности) микроанометров	Скорость потока, м/с					
	1	3	4	5	6	20
ММН-240 (1,0)	100,0	52,0	30,0	19,0	13,5	1,2
ММН-240 (0,6)	72,0	32,0	18,0	11,5	8,0	0,7
МКВ-250 (0,025)	12,5	5,6	3,1	2,0	1,4	0,12
МКВ-250 (0,020)	10,0	4,5	2,5	1,6	1,4	0,10
Рабочие СИ	30,0	22,0	17,5	15,0	13,0	7,0

Как видно из таблицы, погрешность в измерении скорости потока в диапазоне малых скоростей ($1 \div 5$ м/с) комплектом „напорная трубка – микроанометр” может достигать чрезмерно больших значений, поэтому требуется разработка более точных ОСИ. В качестве таких ОСИ можно рекомендовать термоанемометры. Аналогично могут найти применение и другие образцовые СИ скорости воздушного потока, основанные на различных физических эффектах, вызываемых движением воздушной среды или основанных на связи скорости с другими параметрами воздушного потока, поддающимися измерению. В качестве абсолютных методов используется метод меток или ультразвуковой метод, а также искровые и лазерные анемометры.

Чаще всего абсолютные методы измерения скорости воздушного потока применяются в государственных эталонах, эталонах-копиях, рабочих эталонах и в некоторых случаях в образцовых СИ 1-го разряда.

Перейдем к анализу методов поверки СИ параметров ветра. Эти методы можно разделить на две основные группы. К первой группе относятся методы поверки, осуществляемые в ламинарных воздушных потоках аэродинамических установок (трубах). Такая первичная поверка, проводится после выпуска СИ из производства или после капитального ремонта. Ко второй группе относятся методы поверки (контроль метрологических характеристик) СИ на месте эксплуатации.

Рассмотрим первую группу методов поверки. Независимо от типа чувствительного элемента рабочие СИ параметров ветра подвергаются первичной поверке в аэродинамических трубах. При поверке определяется начальная чувствительность СИ по скорости и направлению воздушного потока, а также по диапазону измерения скорости потока на различных отметках. Начальная чувствительность чашечных или винтовых анемометров определяется суммарными моментами трения и нагрузки преобразователей, приведенными к оси винта или чашки, а также скоростью воздушного потока, при которой момент аэродинамических сил будет равен моменту трения и нагрузки. При первичной поверке СИ в аэродинамической трубе за начальную чувствительность v_0 принимают значения скорости воздушного потока в момент начала вращения ветроприемника чашек или винта при установившихся его оборотах. В работе [6] показано, что с увеличением v_0 погрешность измерения скорости ветра возрастает на нижнем пределе диапазона измерения. Начальная чувствительность по направлению α_0 определяется по значению скорости, при которой флюгарка устанавливается по воздушному потоку в рабочей зоне аэродинамической трубы. Поверка СИ по диапазону измерения на определенных отметках сводится к определению разности между показаниями поверяемых и образцовых СИ. В аэродинамических трубах в качестве образцовых СИ воздушного потока в подавляющем большинстве случаев используются коллекторные отверстия на входе и выходе сопла, которые градуируются по измерителям рабочего эталона. В некоторых случаях образцовое и поверяемое СИ располагаются одновременно в рабочей зоне аэродинамической трубы и поверка осуществляется методом непосредственного сличения.

Конечным результатом поверки является нахождение разности Δv в пределах нормированной погрешности $\Delta_{дн}$ на поверяемых отметках диапазона, т. е.

$$\Delta v \leq \pm \Delta_{дн}, \quad (24)$$

где $\Delta v = \Delta_{обр} - \Delta_{пов}$; $\Delta_{дн} = \pm (0,5 + 0,05 v_{пов})$; $v_{пов}$ — скорость воздушного потока, измеренная поверяемым СИ.

Подавляющее большинство рабочих СИ скорости ветра имеют градуировочную характеристику, поэтому для этих СИ достаточно производить поверку не во всем диапазоне скорости ветра, а до отметки 20–30 м/с.

Проверка рабочих СИ по направлению ветра также производится в аэродинамических трубах с применением специального лимба, разделенного на 360° с оцифровкой через 5° (бывает 10°). Поверяемое СИ устанавливается на лимбе в рабочей зоне аэродинамической трубы навстречу воздушному потоку и ориентируется на „север“ с помощью ориентира СИ (нулевая отметка на лимбе). Флюгарка, отведенная вправо и влево от направления воздушного потока на 15° , должна устанавливаться по потоку с погрешностью $\Delta\alpha \leq 10^\circ$. Аналогично производится проверка прибора при направлениях воздушного потока $\alpha = 90, 180, 270^\circ$. Для имитации этих направлений воздушного потока необходимо повернуть стойку флюгарки так, чтобы ориентир СИ показывал на соответствующие отметки на лимбе. При этом сама флюгарка будет направлена навстречу воздушному потоку. Основным источником погрешности проверки СИ по направлению таким методом является погрешность установки ориентира СИ на соответствующую отметку лимба. Максимальная погрешность установки ориентира составляет $\Delta\alpha \leq 1 \div 1,5^\circ$.

Рассмотрим методы контроля метрологических характеристик СИ параметров ветра на месте их эксплуатации. При контроле этими методами можно выделить три основных направления:

- 1) сравнение поверяемого СИ скорости ветра с разнотипными или однотипными СИ непосредственно в атмосфере;
- 2) поэлементная проверка, в основу которой положена зависимость градуировочной характеристики винта от его геометрических размеров и определения моментов трения в осях винта и флюгарки;
- 3) смена винтов.

Максимальная погрешность измерения мгновенной и средней скоростей ветра для большинства рабочих СИ составляет 5 % независимо от типа ветроприемника (винт или чашка). Поэтому ни один из приборов в принципе не может служить в качестве образцового СИ относительно другого прибора. Иногда на практике для контроля измерения средней скорости винтовым СИ используют чашечный анемометр, который устанавливают в непосредственной близости (обычно 2–3 м) от контролируемого СИ. По обоим СИ производят несколько серий синхронных измерений за определенный интервал времени. Если разность показаний контрольного и поверяемого СИ находится в пределах нормированной погрешности последнего, то такое поверяемое СИ считается годным для измерения средней скорости ветра. В сущности такой метод нельзя считать полностью правомочным, поскольку средние скорости ветра в местах расположения винта и чашек в турбулентном потоке открытой атмосферы могут отличаться друг от друга. Кроме того, оба СИ завышают среднюю скорость в разной степени. Для чашечного анемометра это завышение достигает 11 %, для винтового – 5 %. Погрешность измерения средней скорости за счет ее завышения является систематической, расчет точного значения погрешности осуществить практически довольно сложно.

В последнее время получает распространение так называемый метод достаточного эксперимента [9, 12]. Сущность метода заключается в том,

что для получения достоверной информации об измеряемой физической величине (метеопарамetre) не обязательно многократно ее измерять одним СИ, а можно использовать несколько (достаточно 2–3) однотипных с контролируемыми СИ. При этом дается оценка метрологического состояния контролируемого СИ с заданной доверительной вероятностью. В этом случае точность измерений будет не хуже, чем при многократном измерении метеопарамetra одним прибором. Метод достаточного эксперимента особенно полезен, когда нестабильность во времени и пространстве поля скорости ветра становится соизмерима с погрешностью измерения непосредственно применяемого СИ. Методика проведения измерений при таком контроле метрологических характеристик заключается в том, что рядом с контролируемыми СИ скорости ветра устанавливаются 2–3 однотипных СИ, которые должны быть аттестованы. Проводят серии синхронных отсчетов показаний поверяемого (контролируемого) СИ и каждого из аттестованных СИ. Серия считается пригодной для дальнейшего анализа при условии, что дисперсия показаний группы однотипных аттестованных СИ в 3 раза меньше заданной дисперсии контролируемого СИ, т. е.

$$\sum_{i=1}^n D_i^2 < 3 |D_{\text{пов}}^2|. \quad (25)$$

При невыполнении условия (25) серия измерений бракуется. Практически необходимо иметь не менее 15 серий измерений, удовлетворяющих условию (25). В каждой из серий рассчитывается среднее значение измеренных скоростей ветра $\bar{v}_k$ по двум-трем аттестованным СИ:

$$\bar{v}_k = \frac{3}{\sum_{i=1}^3} \frac{v_{ki}}{3}, \quad (26)$$

где v_{ki} – показания i -го аттестованного СИ скорости ветра в i -й серии; $\bar{v}_k$ – среднее значение скорости ветра в k -й серии измерений.

Для дальнейшего суждения о метрологическом состоянии контролируемого СИ скорости ветра оперируют величинами $\bar{v}_k$ и $\bar{v}_{k_{\text{пов}}}$ и определяют разность между ними ξ :

$$\xi = \bar{v}_k - v_{k_{\text{пов}}}, \quad (27)$$

где $v_{k_{\text{пов}}}$ – показания контролируемого СИ скорости ветра в k -й серии измерений.

Затем методами математической статистики рассчитывают математическое ожидание $M[\xi_k]$ и среднее квадратическое отклонение (σ_{ξ_k}) по формулам:

$$M[\xi_k] = \sum_{k=1}^n \frac{\xi_k}{n},$$

$$\sigma_{\xi_k} = \sqrt{\frac{\sum (\xi_k - \bar{\xi}_k)^2}{n-1}}, \quad (28)$$

где n – число серий измерений ($n = 15$).

Контролируемое СИ скорости ветра признается пригодным для дальнейшей эксплуатации, если выполняется следующее условие:

$$\frac{M[\bar{\xi}_k]}{\sigma_{\xi_k} \sqrt{n}} < t. \quad (29)$$

В выражении (29) значение t выбирается из таблиц квантилей распределения Стьюдента при доверительной вероятности $p = 0,90$ и числе степеней свободы $n - 1$. Результаты сличений по методу достаточного эксперимента и обработка этих результатов подробно изложены в работе [9].

Редко, но иногда применяется методика контроля метрологических характеристик СИ скорости ветра путем сличения контролируемого СИ со штатными СИ скорости ветра метеостанции. Этот вариант методики не всегда обладает достаточной достоверностью, так как зачастую контролируемое СИ скорости ветра и штатные СИ метеостанции располагаются не в репрезентативных точках, гарантируемых необходимой достоверностью сличений. Однако, несмотря на это, эта методика используется и в ряде случаев позволяет выявить метрологический отказ СИ скорости ветра.

Рассмотрим методику поэлементной поверки СИ скорости ветра на месте эксплуатации. Как отмечалось выше, разброс градуировочных характеристик СИ скорости ветра обусловлен составляющей погрешности за счет неидентичности изготовления винтов (чашек). Погрешность за счет неточности изготовления чувствительного элемента (винта или чашек) составляет 1,5–2 %. Эта величина может изменяться в процессе эксплуатации вследствие деформации винта, чашек и изменения их аэродинамических свойств. Следует отметить, что винты из стеклопластика сохраняют свои геометрические размеры довольно длительное время. Для контроля метрологических характеристик СИ скорости ветра (винтовых) уже длительное время на сети применяются специальные поверочные приспособления. Методика контроля метрологических характеристик с применением таких поверочных приспособлений включает в себя определение моментов трения на оси винта и флюгарки, определение угла атаки лопастей винта в наибольшем поперечном сечении и имитацию значения скорости на оси винта с применением раскручивающего устройства.

Обоснование такой методики приведено в работе [10]. Многолетняя практика работы с применением контршаблона для измерения угла атаки лопастей винта показала, что зачастую отклонение угла атаки какой-либо лопасти (или лопастей) от нормированного значения приводит к изменению аэродинамических свойств и ветроприемника в целом. Продувка таких винтов в аэродинамических трубах показала, что погрешность измерения воздушного потока ими укладывается в нормированный допуск. Результаты исследования, приведенные в работе [8], показали, что угол атаки любой из лопастей винта может отличаться от нормированного значения на 1–1,5°, что не внесет существенной погрешности в выходную статическую характеристику винта в целом. Исходя из этого разработана методика контроля метрологических характеристик винтовых анемометров на месте эксплуатации, включающая только опреде-

ние моментов трения на оси винта и флюгарки и задание определенных (фиксированных) значений числа оборотов оси винта (и соответствующих этим оборотам скоростей) с применением раскручивающего устройства.

Рассмотрим третье направление по контролю метрологических характеристик СИ скорости ветра, основанное на смене винтов, ранее отградуированных в аэродинамической трубе и поставляемых в качестве резервных. Этот метод также предусматривает определение моментов трения на оси винта и флюгарки и задание с помощью раскручивающего устройства оси винта определенной скорости вращения. Частотомером измеряют частоту F и рассчитывают соответствующую этой частоте скорость на выходе СИ по формуле

$$F = K v_{\text{пов}}, \quad (30)$$

откуда

$$v_{\text{пов}} = F/0,9, \quad (31)$$

где F — частота следования электрических импульсов, Гц; v — скорость воздушного потока, м/с; K — коэффициент пропорциональности, равный 0,9 Гц·с/с.

Находят соответствующие значениям частоты F значения скорости $v_{\text{град}}$ по графику резервного отградуированного винта. Рассчитывают отклонения показаний контролируемого СИ скорости ветра от значений скорости по градуировочному графику резервного винта:

$$\Delta v = v_{\text{пов}} - v_{\text{град}}. \quad (32)$$

В случае когда $\Delta v \leq \pm \Delta_d$, контролируемое СИ скорости ветра признается годным для дальнейшей эксплуатации. В случае когда $\Delta v > \pm \Delta_d$, находившийся в эксплуатации винт снимается и устанавливается резервный винт.

Эта методика допускает построение графика поправок, когда $\Delta v < \pm \Delta_d$, который прилагается к поверочному свидетельству, но лишь в том случае, если абсолютное значение поправок не превышает половины нормированной погрешности Δ_d для контролируемого СИ скорости ветра.

В заключение следует остановиться на некоторых методических вопросах метрологического обеспечения СИ параметров ветра на сети Госкомгидромета СССР.

Метрологическое обеспечение СИ идет в двух основных направлениях. Первое направление — это разработка (или применение имеющихся в настоящее время) образцовых средств измерений. Второе направление — это выбор методов поверки на базе имеющихся ОСИ.

В настоящее время в системе Госкомгидромета СССР (на сети станций УГМ) находится в эксплуатации большое количество СИ параметров ветра (около 120 тыс. единиц), основанных на различных принципах измерения. Кроме этого значительное количество метеорологических СИ параметров ветра эксплуатируется в других ведомствах СССР. Следует отметить, что промышленностью ежегодно выпускается около 5 тыс. средств измерений скорости воздушного потока, большая часть которых (до 80 %) эксплуати-

уется в системе Госкомгидромета СССР. Имеется большое количество ОСИ, нуждающихся в периодической поверке (или аттестации). Применяемые в народном хозяйстве рабочие СИ параметров ветра зачастую существенно отличаются по принципу действия, диапазонам измерения, габаритам и весу, условиям применения.

Для успешного решения задач метрологического обеспечения парка СИ параметров ветра необходима разработка рабочего эталона единицы скорости воздушного потока, ведомственной поверочной схемы и соответствующего специального поверочного оборудования.

Ранее в системе Госкомгидромета СССР была разработана локальная поверочная схема для СИ параметров ветра, в которой в качестве исходного образцового средства передачи единицы скорости воздушного потока применялась дифференциальная напорная трубка Пито 1-го азряда. Эта трубка периодически аттестовывалась на аэродинамическом стенде НПО ВНИИМ им. Д. И. Менделеева. Однако единство измерений в той области полностью обеспечено не было, так как отсутствовал эталон единицы скорости воздушного потока и общесоюзная поверочная схема для данного вида измерений.

Для решения проблемы централизации воспроизведения и передачи размера единицы скорости воздушного потока в 1985 г. был создан и утвержден Госстандартом СССР государственный специальный эталон единицы скорости воздушного потока и разработан ГОСТ 8.542-86. „ГСИ. Государственный специальный эталон и государственная поверочная схема для средств измерений скорости воздушного потока в диапазоне 1...100 м/с.”

На базе государственного эталона и союзной поверочной схемы был разработан, исследован и утвержден [3, 5] Госстандартом СССР рабочий эталон единицы скорости воздушного потока (ВЭТ 150-1-86) и ведомственная поверочная схема для СИ скорости ветра для системы Госкомгидромета СССР. Ведомственная поверочная схема, возглавляемая рабочим эталоном, построена с учетом существующих и перспективных потребностей поверки образцовых и рабочих СИ.

Введение в действие рабочего эталона и ведомственной поверочной схемы в системе Госкомгидромета СССР позволило решить проблему метрологического обеспечения СИ параметров ветра и обоснованно переходить к вопросам разработки средств и методов поверки рабочих СИ, также выбора ОСИ воздушного потока, используемых при поверке СИ скорости ветра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев И. Д. Выбор оптимального интервала осреднения скорости ветра. — Труды ЦО, 1958, вып. 3, с. 38-47.
2. Заливадный В. С. Ультразвуковой измеритель нестационарных потоков. — Пристроение, 1983, № 1, с. 18-23.
3. Метрологические исследования рабочего эталона единицы скорости воздушного потока /А. В. Аверкин, С. Г. Ефимов, В. А. Кузьмин, Ю. В. Роголев, Н. П. Фатеев. —

Труды ГГО, 1986, вып. 510, с. 3—11.

4. Наблюдения на гидрометеорологической сети СССР. Определение понятий гидрометеорологических элементов и оценки точности наблюдений /Под ред. О. А. Городецкого. — Л.: Гидрометеиздат, 1970. —89 с.

5. Принципы построения рабочего эталона скорости воздушного потока /В. А. Кузмин, С. Г. Ефимов, Ю. В. Рогалев, Н. П. Фатеев. — Труды ГГО, 1985, вып. 491, с. 3—6.

6. Протопопов Н. Г. Влияние моментов трения и нагрузки анемометра на точность измерения скорости ветра. — Труды ГГО, 1969, вып. 240, с. 77—84.

7. Протопопов Н. Г. Проектирование ветроизмерительных приборов. — Л.: Гидрометеиздат, 1976. —192 с.

8. Расчет оптимального отклонения угла атаки винтов анемометров для оценки сохранности их градуировочных характеристик /П. Я. Никишов, В. Ю. Окоренков, Ю. В. Рогалев, Н. П. Фатеев. — Труды ГГО, 1985, вып. 491, с. 52—57.

9. Рогалев Ю. В., Фатеев Н. П., Фомин В. Ф. Поверка средств измерения скорости ветра на месте эксплуатации по методу достаточного эксперимента. — Труды ГГО, 1985, вып. 476, с. 70—77.

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

11. Фатеев Н. П. Исследование величины поправок на ограниченность потока при градуировке анемометров. — Труды ГГО, 1969, вып. 244, с. 32—36.

12. Фомин В. Ф. Метод оценки сохранности метрологических характеристик средств измерения в условиях эксплуатации. — Труды ГГО, 1981, вып. 452, с. 37—39.

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПОВЕРКИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ

В настоящее время для поверки средств измерений (СИ) атмосферного давления используются три различных метода поверки: поэлементный, в естественных условиях, по диапазону измерений.

Поэлементный метод поверки, как правило, используется для образцовых и эталонных СИ давления в случаях, когда отсутствуют эталоны, посредники или инспекторские образцовые СИ. Сущность указанного метода заключается в аттестации или поверке всех измерительных элементов поверяемых СИ. Существенным недостатком указанного метода является необходимость демонтажа эталонных и образцовых СИ, а следовательно, невозможность определения основной погрешности после сборки всех измерительных элементов. Для поэлементного метода основная погрешность определяется теоретически, суммированием предельных погрешностей поверки измерительных элементов. На практике указанный метод используется только для групповых эталонов давления, основная погрешность которых определяется по результатам сличений эталонов, входящих в группу. Например, рабочий эталон атмосферного давления в системе Госкомгидромета СССР включает в себя два эталонных ртутных барометра с интерференционным отсчетом, которые поверяются поэлементно. Основная погрешность рабочего эталона давления определяется сличением эталонов между собой в естественных условиях.

Рабочий эталон давления имеет диапазон измерений 730–790 мм рт. ст., основную погрешность не более $\pm 0,005$ мм рт. ст., точность отсчета атмосферного давления 0,6 мкм. Основная погрешность обеспечивается стабилизацией всех влияющих на нее факторов: температуры за время отсчета не более 0,01 °С, относительной влажности не более 60 %, скорости изменения атмосферного давления не более $\pm 0,01$ мм рт. ст. за 15 мин, уровня вибрации не более 5–10 мкм. Для стабилизации влияющих факторов используются специальные системы: терморегулирования, демпфирования и гашения вибраций (100-тонный фундамент с рессорными упорами и масляными демпферами), система выравнивания температурных градиентов (группа вентиляторов) [2].

Рабочий эталон давления Госкомгидромета СССР является региональным эталоном ВМО и обеспечивает передачу единицы атмосферного давления на регион Европа – Азия для образцовых и эталонных СИ давления. Для обеспечения воспроизведения единицы измерения давления в диапазоне 2–810 мм рт. ст. в состав рабочего эталона дополнительно включается грузопоршневой эталонный манометр типа МАД-3М, который сличается с ртутными эталонами непосредственно в естественных условиях при атмосферном давлении. Основная погрешность рабочего эталона в этом случае оценивается по результатам групповых сличений эталонов и не превышает для группового эталона Госкомгидромета СССР $\pm 0,05$ ГПа, что соответствует требованиям к рабочим эталонам ВМО.

Метод поверки в естественных условиях при атмосферном давлении используется, как правило, для ртутных барометров типов КР, ИР, СР-А, СР-Б, причем для двух последних типов используются комбинированные методы: первичная поверка барометров типа СР-А, СР-Б – по всему диапазону их измерений через каждые 10 отметок шкалы и периодическая поверка – по диапазону измерений только атмосферного давления.

Метод поверки в естественных условиях при атмосферном давлении применим только для СИ, имеющих сравнительно небольшой диапазон измерения давления (около 300 гПа), линейную функцию преобразования и линейность изменения во времени систематической и случайной составляющих основной погрешности в любой отметке шкалы. Этим требованиям удовлетворяют указанные выше ртутные барометры. Как показали исследования метрологической надежности датчиков давления типа КРАМС, имеющих диапазон измерения 130 гПа, модели дрейфа их основной погрешности также линейны в любой отметке шкалы, что позволяет использовать и для них комбинированный метод поверки: первичная – по диапазону измерений и периодическая – при атмосферном давлении.

Метод поверки по диапазону измерений наиболее распространенный и применяемый для СИ давления, имеющих большой диапазон измерения давления, нелинейность функции преобразования и нелинейность дрейфа во времени основной погрешности на различных отметках шкалы. К этой группе СИ давления относятся все деформационные барометры и манометры типов М-67, М-98, М-110, БАММ-1, МБЛ, а также барографы М-22. Указанный метод поверки обеспечивает наиболее точное определение систематической и случайной составляющих основной погрешности во всем диапазоне измерений, однако он требует, чтобы соотношение погрешностей образцового и поверяемых СИ составляло 1:4, что обеспечивает необходимую погрешность поверки. При реализации метода поверки по диапазону измерений, как правило, поверка осуществляется в барокамерах или специальных термобарокамерах, в которых задается определенный температурный режим и временной режим, которые обеспечивают необходимые условия поверки. Как правило, проводится не менее двух серий измерений при повышении и понижении давления, что позволяет уменьшить при обработке результатов влияние гистерезиса деформационных СИ давления.

К недостаткам метода поверки по диапазону измерений следует отнести: невозможность проведения на каждой отметке шкалы большого числа измерений (10–20), что не позволяет в достаточной мере уменьшить случайную составляющую основной погрешности, а следовательно, точно определить систематическую составляющую основной погрешности; необходимость использования высокоточных СИ давления, обеспечивающих соотношение погрешностей не менее 3:4; невозможность проведения поверки на местах эксплуатации поверяемых СИ. Для определенной группы приборов, не сохраняющих свои метрологические характеристики после транспортировки (например, датчики давления типа КРАМС) последний недостаток определяет необходимость применения метода поверки в естественных условиях при атмосферном давлении.

В качестве образцовых СИ давления, используемых для поверки по диапазону измерений, применяют грузопоршневые манометры типа ИАД-3, имеющие предел основной погрешности не более $\pm 0,06$ гПа и диапазон измерений 2–1100 гПа; грузопоршневые манометры типа МПА-15, имеющие предел основной погрешности не более $\pm 0,05$ мм рт. ст. для диапазона измерения 0–500 мм рт. ст., не более 0,10 мм рт. ст. для диапазона 500–1000 мм рт. ст. и 0,01 % измеряемого значения для диапазона 1000–1000 мм рт. ст.; инспекторские манометры типа ИМАД-4М, имеющие предел основной погрешности не более $\pm 0,10$ гПа для диапазона 670–100 гПа.

Практически в настоящее время рабочие эталонные барометры используются для поверки национальных эталонов гидрометеослужб социалистических стран, поверки образцовых барометров I разряда и грузопоршневых манометров I разряда УГМ. Образцовые барометры I разряда, имеющие предел основной погрешности не более $\pm 0,14$ гПа и диапазон измерения 790–1090 гПа, используются для поверки барометров типа КР УГМ; барометры типа КР, имеющие предел основной погрешности не более $\pm 0,20$ гПа, используются для поверки барометров типа ИР, имеющих предел основной погрешности $\pm 0,30$ гПа. Барометры типа ИР используются для поверки барометров типов СР-А, СР-Б, имеющих предел основной погрешности не более $\pm 0,50$ гПа. Грузопоршневые манометры типов ИАД-3М, МПА-15, ИМАД-4М используются для поверки измерительных преобразователей атмосферного давления станций типа КРАМС, АРМС, барометров-анероидов типов М-67, М-98, БАММ-1, М-110. Ртутные манометры типа МБП, имеющие предел основной погрешности не более $\pm 0,50$ г и диапазон измерений 2–1070 гПа, используются для поверки барографов типа М-22 и радиозондов типа РКЗ.

Количественную оценку эффективности изложенных выше методов поверки можно получить на основе анализа критериев качества поверки. Как известно [1], основными критериями качества поверки являются браки поверки I ($P(\overline{AB})$) и II ($P(\overline{AB})$) рода, определяемые в соответствии с методикой [1]. Результаты расчетов приведены для некоторых СИ давления в таблице. Анализ полученных данных позволяет сделать следующие выводы.

1. Браки поверки II рода, соответствующие вероятности того, что фактически годное СИ будет забраковано, значительно больше браков поверки I рода, когда фактически негодное СИ будет признано годным. Для образцовых СИ типов КР, ИР это нормально, так как они используются для поверки рабочих СИ, а для рабочих барометров типов СР-А, СР-Б это неоправданно.

2. Метод поверки по диапазону измерений, используемый для манометров типа МБП и частично для барометров типов СР-А, СР-Б (при первичной поверке), позволяет получить значительно меньшие браки поверки, что объясняется более высокими соотношениями пределов допускаемых погрешностей образцового и поверяемого СИ.

3. В целом браки поверки I и II рода для СИ давления находятся в пределах рекомендуемого допуска (5 %), а вероятность пропуска фак-

Таблица

Тип СИ	Метод поверки	Отношение пределов допускаемых погрешностей образцового и поверяемого СИ	Вероятность брака поверки	
			I рода	II рода
Барометры типа КР	При атмосферном давлении	0,70	0,0012	0,053
	То же	0,67	0,0011	0,052
	Первичная — по диапазону измерений, периодическая — при атмосферном давлении	0,60	0,0011	0,029
Ртутный манометр типа МБП	По диапазону измерений	0,26	0,008	0,003

тически негодного СИ мала и составляет не более 1,2 %.

Известный интерес представляет анализ методов поверки датчика станции КРАМС. Так, при поверке датчика на месте эксплуатации по образцовому барометру типа КР при атмосферном давлении вероятности браков поверки I и II рода соответственно составляют $P(\overline{AB}) = 0,02467$, $P(\overline{AB}) = 0,06195$, что указывает на значительный брак поверки II рода. Так, например, из 70 датчиков четыре будут забракованы напрасно, а два датчика, метрологически отказавших, будут признаны годными, что недопустимо. Поэтому для этого случая необходимо увеличить соотношение пределов допускаемых погрешностей образцового и поверяемого СИ, для чего необходима поверка не только самого датчика, а всего измерительного канала давления. В этом случае браки будут соответственно $P(\overline{AB}) = 0,01486$ и $P(\overline{AB}) = 0,02344$, что соответствует возможному бракованию (из партии 70 приборов, находящихся в эксплуатации) двух годных СИ и возможному пропуску одного метеорологически отказавшего СИ.

При поверке по диапазону измерений с помощью грузопоршневого манометра типа МПА-15 браки поверки будут $P(\overline{AB}) = 0,1076$ и $P(\overline{AB}) = 0,02310$, что соответствует случаю поверки по каналу давления. Таким образом, датчики давления автоматических станций целесообразно проверять не отдельно, а по измерительному каналу в целом, что и реализовано в существующих методах их поверки.

Для датчиков станции КРАМС были проведены исследования, которые подтвердили, что распределение погрешности по диапазону измерений равномерное и, следовательно, возможна поверка при атмосферном давлении даже при выпуске их из производства. Для обоснования метода периодической поверки датчиков были проведены исследования их долговременной стабильности, которые показали, что все отметки шкалы диапазона измерений изменяются (дрейфуют) во времени одинаково, т. е.

систематическая составляющая основной погрешности изменяется во времени линейно для всех отметок шкалы. Поэтому целесообразно для того типа датчиков использовать метод поверки при атмосферном давлении.

Для новых типов датчиков выбрать метод поверки целесообразно после их исследования как по диапазону измерений, так и на долговременную стабильность. Однако в качестве образцового СИ можно рекомендовать образцовые манометры типов МПА-15, МАД-3М, которые могут обеспечить минимальные браки поверки. Предпочтительно первичную поверку датчиков проводить по диапазону измерений, а периодическую — при атмосферном давлении. Это объясняется тем, что при выпуске СИ давления из производства будут установлены систематическая и случайная составляющие основной погрешности на каждой поверяемой отметке шкалы, а если дрейф составляющих основной погрешности для всех отметок шкалы одинаков, то при периодической поверке достаточно будет определить его в небольшом диапазоне шкалы, т. е. при атмосферном давлении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. МИ 83—76. Методика определения параметров поверочных схем. — М., изд-во станцартов, 1978. — 67 с.
2. Окоренков В. Ю. Определение функции влияния рабочих эталонных барометров Госкомгидромета по результатам исследования. — Труды ГГО, 1981, вып. 452, с. 64—71.

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПОВЕРКИ ДАТЧИКОВ ВЛАЖНОСТИ ВОЗДУХА

В метеорологии измерения влажности воздуха производят приборами, в которых информация представляется различными способами. Это шкаловые стрелочные приборы, цифровые, печатающие. Съем информации проводят как непосредственно на месте измерения, так и дистанционно. Приборы имеют разные точностные характеристики, диапазоны измерения и стабильности градуировок. Все это приводит к необходимости применять различные методы поверки.

Из литературных источников [6, 11] следует, что поверка – это способ признания средства измерений (СИ) пригодным к применению на основании результатов контроля соответствия его метрологических характеристик, определяемых экспериментально, установленным требованиям. Другая формулировка [5]: поверка – это определение метрологическим органом погрешностей средства измерений и установление его пригодности к применению.

Отсюда следует, что поверка заключается в подтверждении пригодности СИ к применению в основном через установление погрешности. Критерием пригодности является погрешность выше допустимой или ниже допустимой. При периодической поверке, когда установлен межповерочный интервал, т. е. срок вероятного выхода погрешности за пределы допустимой, поверка по вышеизложенному определению теряет смысл. Здесь уже необходимы действия по восстановлению метрологических характеристик. Следовательно, целесообразно совмещать градуировку с определением погрешности или проводить только градуировку в обоснованных случаях, когда заведомо известна погрешность градуировки.

Так, финской фирмой „Вайсала“, изготавливающей СИ влажности воздуха, поставляется простое приспособление, позволяющее восстановить градуировку СИ по двум реперным точкам, находящимся на краях диапазона измеряемой величины. Реперные точки по влажности воспроизводятся над растворами солей с конкретной концентрацией и измеренной температурой.

В данном случае производят корректировку градуировочной характеристики в двух точках по влажности и в одной по температуре. Необходимо отметить, что эта работа производится самим потребителем.

В СССР подобным образом в период между поверками производят юстировку гигрометров „Волна-1М“, „Волна-2М“, ДСВП, изготавливаемых в НПО „Эталон“. В комплекте гигрометра „Волна-1М“ поставляется приспособление, юстировочный стакан и соли (KCl , $MgCl_2$), для воспроизведения реперных точек по влажности. Относительная влажность воздуха над растворами солей зависит как от концентрации раствора, так и от температуры раствора. Зависимости приведены в работе [8]. Для исключения влияния погрешности концентрации растворов на погрешность определения относительной влажности над раствором растворы делают насыщенными и используют только зависимость от температуры.

Работу по юстировке выполняет сам потребитель, но тем не менее не исключается поверка гигрометров в генераторе влажного газа с периодичностью один год. При поверке определяют основную абсолютную погрешность гигрометров в четырех точках диапазон измерений: 10 ± 5 , 30 ± 5 , 60 ± 5 , 90 ± 5 %. Погрешность определяют как разность между показаниями поверяемого гигрометра и действительной влажностью, определяемой в соответствии с технической документацией на генератор: разность не должна превышать $\pm 1,5$ %.

Для поверки гигрометров могут использоваться отечественные динамические генераторы, например образцовые генераторы влажного газа „Родник-2” в диапазоне положительных температур, „Родник-3” и „Иней” в диапазоне отрицательных температур, и статические генераторы, например образцовые солевые переносные гигростаты типа ГП-501 и ГПТ-130 [7].

Таким образом, вопрос о пригодности СИ затрагивает и передачу размера единицы измерения (это градуировка) и контроль, или поверку (это определение погрешности). Сюда можно отнести также вопрос о распределении обязанностей между потребителем и контролирующей метрологической службой [6]. В Госкомгидромете СССР все эти функции выполняют бюро поверок и службы средств измерения (ССИ) территориальных управлений, общий надзор осуществляет Госстандарт.

Методы и порядок передачи размера единицы измерения и поверки устанавливает поверочная схема [4], которую и следовало бы называть схемой методов передачи размера единиц измерения и поверки. Сначала рассмотрим существующие методы поверки [1, 2, 6, 10, 12]. Они в равной степени относятся к контролю характеристик, юстировке и градуировке.

Метод, в котором участвует средство воспроизведения величины и средство измерения этой величины (в нашем случае — поверяемый прибор), причем средство воспроизведения дает значение этой величины и является образцовым, т. е. с помощью которого сравнивается значение величины с результатом ее измерения, называется методом прямого измерения. Пример применения такого метода был приведен выше при юстировке и поверке гигрометра „Волна-1М”. Основным недостатком указанного метода является чувствительность ко многим влияющим факторам первичных преобразователей, таким, как изменения температуры окружающей среды за счет применения тепловыделяющих источников, выделение влаги в среду с испаряющихся элементов и т. д. Средства для воспроизведения значения величины, как правило, имеют малые размеры небольшого объема (примерно $3-10 \text{ дм}^3$) и, следовательно, первичные преобразователи должны иметь небольшие габариты.

Вторым методом является метод непосредственного сличения. Здесь же участвуют средство воспроизведения среды и два средства измерения: одно образцовое, другое поверяемое. В этом случае производят измерение неизвестного значения или известного с большим допуском, одной и той же величины образцовым и поверяемым СИ и сравнивают их результаты измерения. За действительное значение величины прини-

мают результат измерения образцовым СИ. Отличительной особенностью этого метода является то, что сличение может проводиться как в камерах, так и в помещениях и открытой атмосфере. Требования к камерам упрощаются, так как нет необходимости в них обеспечивать точное задание влажности, камеры без средств точного задания дешевле.

Такой метод применен при поверке волосных гигрометров типов М-19, М-68 и гигрографов М-21. Это относительно крупногабаритные приборы со стрелочными указателями относительной влажности. Определение основной абсолютной погрешности прибора и вариации показаний производят сравнением при значениях относительной влажности 98–100, 90 ± 3 , 80 ± 3 , 70 ± 3 , 30 ± 3 %, определенных по психрометру и поверяемому прибору при последовательном понижении относительной влажности с 98–100 до 25–27 %, а затем повышении до 98–100 %. Погрешность определяют как разность между результатами по психрометру и поверяемому прибору – она не должна превышать ± 10 %, а вариация 6 %. Вариацию показаний определяют как разность значений погрешностей на одних и тех же поверяемых точках при подходе к точке при понижении и при повышении относительной влажности.

Для их поверки и градуировки используют полуавтоматический гигростат типа ПО-34, выпускаемый как и гигрометры, Рижским опытным заводом ГМП. Гигростат был разработан специально для массовой поверки волосных гигрометров и гигрографов. По своей конструкции гигростат прост, но по техническим характеристикам вполне удовлетворяет предъявляемым требованиям. Однако иногда простоту приборов и установок воспринимают как морально устаревшие конструкции, не поддающиеся автоматизации (хотя автоматизация не всегда дает оптимальное решение вопроса), основываясь на существующем парке приборов.

Для градуировки приборов, измеряющих влажность воздуха, итальянская фирма „СИАП” изготавливает установку (Test chamber for hygrometer) типа С1 5200 по конструкции и принципу действия еще проще гигростата ПО-34. Измерение влажности в камере производят аспирационным психрометром Ассмана со стеклянными термометрами и волосным гигрометром типа UM 7000. В гигростате ПО-34 в качестве образцового СИ (при поверке волосных гигрометров) используется аспирационный психрометр типа М-34. Таким образом, практика других стран указывает на то, что автоматизация процессов на современном уровне развития техники не всегда оправдана (это относится к нашему частному случаю).

В последнее время на сети метеорологических станций стали применяться сорбционные гигрометры типа ГС-210. Их поверка проводится в климатической камере производства фирмы „Feutron”, ГДР, сличением с тремя психрометрами типа М-34. В камере последовательно устанавливают относительную влажность 15, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 и 98 с погрешностью ± 2 % и одновременно снимают показания по шкалам гигрометра и психрометров. Погрешность определяется как разность между показанием гигрометра и средним из трех показаний психрометров, разность не должна превышать ± 3 % относительной влажности. Итак, метод сличения позволяет использовать простое оборудование или

вообще окружающую среду, т. е. производить поверку в условиях эксплуатации. Такая поверка допускается методикой поверки волосных гигрометров и гигрографов.

Третьим методом является метод поэлементной поверки, который заключается в поверке средств измерения других величин и составляющих СИ влажности, по результатам измерения которых определяют влажность воздуха. Например, поверка психрометров М-34 и МВ-4М состоит из поверки термометров и скорости аспирации. Такой поверке могут быть подвержены только приборы, основанные на абсолютных методах, связанных с природными законами явлений, обратимых и воспроизводимых, и имеющих между значениями измеряемых величин и влажностью функциональную связь.

Поэлементной поверке может быть подвергнут конденсационный гигрометр точки росы, в котором поверить необходимо только термометр. В электролитическом подогревном гигрометре с первичными преобразователями типа ПИТР и „ТОРОС” также необходима поверка только термометра аспирации. При этом не исключается возможность поверки этих приборов методом сличения и прямого измерения.

Во всех этих гигрометрах влажность воздуха выражается температурой [2, 12], в психрометре — температурой испаряющей поверхности, которая меньше температуры воздуха и только при относительной влажности 100 % значения температуры равны. Здесь использовано свойство воды потреблять при фазовом переходе (испарении) энергию, количество этой энергии пропорционально скорости испарения воды, которая, в свою очередь зависит от степени насыщения воздуха парами. В результате, чем меньше паров в воздухе, тем температура испаряющей поверхности меньше и тем больше разность между температурой этой поверхности и температурой воздуха.

В конденсационном гигрометре измеряют температуру поверхности, которая охлаждается до тех пор, пока на ней не начинает конденсироваться пар из воздуха, т. е. для каждого количества паров в воздухе и значения атмосферного давления существует своя температура, при которой начинается процесс конденсации. В электролитическом подогревном гигрометре использована зависимость влажности над поверхностью раствора от температуры этого раствора и соответственно его концентрации. Каждому значению влажности при динамическом равновесии между парами над поверхностью раствора и воздуха (когда не происходит только конденсация или только испарение) соответствует своя температура раствора. Температура раствора выше температуры воздуха. Для нагревания и поддержания динамического равновесия пара используют такую соль, при пропускании электрического тока через раствор которой происходит значительное изменение его электропроводности в зависимости от содержания влаги.

Принципы действия приведенных гигрометров основаны на фазовых переходах воды, которые широко осуществляются в природных процессах и могут быть теоретически описаны в соответствии с уравнением Клаузиуса-Клапейрона:

$$\frac{dE}{E} = \frac{L}{AR_{\Pi}} \cdot \frac{dT}{T^2}. \quad (1)$$

Если $L = \text{const}$, то интегрируя уравнение (1) в пределах,

$$\int_{E_0}^E \frac{dT}{E} = \int_{T_0}^{\tau} \frac{LdT}{AR_{\Pi}T^2}, \quad (2)$$

получим

$$\ln \frac{E}{E_0} = \frac{L}{AR_{\Pi}} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right), \quad (3)$$

где E – парциальное давление водяного пара; L – удельная теплота парообразования или сублимации; A – термический эквивалент работы; R_{Π} – удельная газовая постоянная водяного пара; T – температура; E_0 – парциальное давление водяного пара при температуре T_0 .

Если за T принять температуру точки росы τ (гигрометр точки росы), тогда $E = E_{\tau}$ – парциальное давление насыщенного водяного пара при этой температуре. В этом случае уравнение примет вид:

$$\ln \frac{E_{\tau}}{E_{T_0}} = \frac{L}{AR_{\Pi}} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{\tau} \right). \quad (4)$$

Так как $E_{\tau}/E_{T_0} = \varphi$ (относительная влажность), выражение (4) можно представить в виде:

$$\varphi = \exp \frac{L}{AR_{\Pi}} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{\tau} \right). \quad (5)$$

Аналогично, подставляя в уравнение (4) значения температуры смоченного термометра или значения температуры раствора и используя психрометрическую формулу или соответственно закон Рауля, можно вывести эмпирические уравнения определения влажности для психрометра и электролитического подогревного гигрометра.

Преимущество применения уравнения Клаузиуса-Клапейрона заключается в том, что оно позволяет представить выражение для определения относительной влажности в простом виде. Это объясняется исключением одинаково влияющих параметров на влагу в воздухе в насыщенном и ненасыщенном состояниях. Формула (4) наглядно показывает, какие параметры вносят погрешность при расчете относительной влажности. Для вычисления абсолютных значений величин эмпирические уравнения сложны и громоздки.

При рассмотрении представленных трех методов проверки видно, что первый пригоден для точных приборов, второй – для приборов менее точных и одновременно оба метода позволяют производить градуировку и определять погрешность. Третий метод пригоден только для приборов, воспроизводящих природные процессы и основанных на расчётных соотношениях.

Следующий этап при поверке — расчет погрешности. При поверке рабочих СИ погрешность определяют как разность между результатами измерения по образцовому и поверяемому СИ. При единичном измерении эта разность представляет собой абсолютную или полную погрешность. Абсолютная погрешность в свою очередь складывается из систематической погрешности и случайной погрешности. В тех случаях, когда необходимо проконтролировать только систематическую или только случайную погрешность, используют аппарат статистической обработки [11]. При контроле систематической составляющей погрешности проводят ряд одновременных измерений образцовым и поверяемым приборами. Ряд может содержать 3, 5, 10 и т. д. измерений. В большинстве случаев ограничиваются тремя измерениями. Погрешность определяют как разность между средними арифметическими результатами измерений по образцовому и поверяемому приборам.

Для контроля случайной составляющей погрешности используют оценку СКО результата измерения. Его проводят тогда, когда систематическая погрешность исключена, т. е. когда проведена градуировка прибора или корректировка градуировочной характеристики (определена и введена поправка).

Согласно изложенному можно выделить три способа расчета погрешности. Выбор способа расчета погрешности в каждом случае индивидуален.

При поверке могут рассчитываться и погрешности, возникающие за счет воздействия влияющих параметров, например температуры [3].

Необходимо отметить, что при поверке в статических условиях определяют погрешность самого прибора, а не результата измерения, так как при практических измерениях возникает еще погрешность за счет динамики измеряемой величины. Это объясняется тем, что результат измерения всегда будет отставать от действительного значения величины реального процесса в данный момент.

В открытой атмосфере измеряемая величина имеет как бы две составляющие — среднюю величину, которая изменяется медленно, т. е. постоянная времени ее намного больше постоянной времени применяемых для ее измерения приборов, и дополнительную величину, которая может как складываться со средней, так и вычитаться.

Постоянная времени дополнительной величины, как правило, всегда меньше постоянной времени применяемых приборов. Так как дополнительная величина переменна, то при суммировании ее во времени она стремится к нулю. Поэтому в измерениях практический интерес представляет средняя величина, а следовательно, и погрешность измерения этой величины (это утверждение относится только к обоснованию поверки в естественных условиях). Отсюда видно, что чем инерционнее измерительный прибор, тем ближе погрешность результата измерения приближается к погрешности самого прибора.

Таким образом, поверка в естественных условиях оправдана в тех случаях, когда образцовое и поверяемое СИ имеют постоянные времени

больше, по крайней мере, чем период дополнительной переменной величины.

Поверка в других случаях невозможна из-за того, что погрешность поверяемого прибора (даже если его погрешность в статических условиях в пределах допуска) будет завышенной и может выйти за пределы допуска. Поэтому погрешность СИ, используемых для измерения влажности воздуха в открытой атмосфере, должна определяться в этих же условиях.

Необходимо отметить, что перспектива метрологического обеспечения представляется в полном переходе этих работ на места эксплуатации, где сами наблюдатели, эксплуатирующие СИ, могли бы осуществить поверку и корректировку градуировочной характеристики. Контролирующие функции (имеется в виду достоверность измерений) и вопросы снабжения следует оставить за службой средств измерений УГМ, тогда бюро поверки стали бы выполнять работы в основном по ремонту приборов и поверке после ремонта.

В связи с этим перед научными метрологическими подразделениями должна стоять задача реализации этих вопросов, т.е. они должны с самого начала разработки метеорологических СИ учитывать возможность поверки на месте эксплуатации, разрабатывать оборудование, образцовые СИ и методики контроля и восстановления метрологических характеристик.

В заключение сделаем следующее обобщение: рассматривая методы поверки и градуировки, способы расчета погрешностей и классифицируя их по группам СИ влажности воздуха, можно лучше представить все возможности и необходимость в выборе того или иного подхода к поверке.

Приведенная формула (5) расчета относительной влажности показывает, какие параметры являются основными при определении погрешности поэлементным методом. Формула представлена впервые и будет развита в последующих работах.

Поверка в естественных условиях в литературе обсуждается давно, например [9], однако до сих пор в практике она не нашла широкого применения. Это можно объяснить тем, что предлагались трудоемкие методы и стремились приблизить естественные условия к статическим условиям камер созданием на входе измерительного преобразователя демпфирующих устройств. При исследовании этого метода пользовались сравнением случайных погрешностей.

Представленные в работе предложения относительно поверки на месте эксплуатации наиболее выполнимы и больше отвечают современным оптимальным решениям как с экономической, так и с технической точки зрения. Накладываемые условия о постоянной времени не создают трудностей, так как почти у всех СИ влажности воздуха она достаточно большая. Остается проблема — наличие образцовых гигрометров, позволяющих сличать рабочие СИ в естественных условиях при положительных и отрицательных температурах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бурдун Г. Д., Марков Б. Н. Основы метрологии. — М.: Изд-во стандартов, 1972. — 318 с.
2. Берлинер М. А. Измерения влажности. — М.: Энергия, 1973. — 400 с.
3. ГОСТ 8.472-82. Гигрометры пьезосорбционные. Методы и средства поверки. ГСИ. — М.: Изд-во стандартов, 1982. — 8 с.
4. ГОСТ 8.547-86. Государственный первичный эталон и государственная поверочная схема для средств измерений относительной влажности газов. — М.: Изд-во стандартов, 1986. — 4 с.
5. ГОСТ 16263-70. Метрология. Термины и определения. — М.: Изд-во стандартов, 1972. — 53 с.
6. ГОСТ 8.513-84. Поверка средств измерений. — М.: Изд-во стандартов, 1985. — 8 с.
7. Мандрохлебов В. Ф., Арутюнов Ю. В. Состояние и перспективы разработки и производства гигрометров и средств их метрологического обеспечения. — Измерительная техника, 1982, № 9, с. 46—50.
8. МИ 54-75. Методика поверки образцового солевого переносного гигростата типа ГП-501. — М.: Изд-во стандартов, 1976. — 8 с.
9. Резников Г. П., Рогалев Ю. В. Исследования по обоснованию возможности поверки автоматических метеостанций в естественных условиях методом непосредственного сличения по каналам измерения влажности и температуры. — Труды ГГО, 1977, вып. 392, с. 72—82.
10. Руководство по поверке метеорологических приборов /Под ред. И. А. Покровской. — Л.: Гидрометеиздат, 1967. — 419 с.
11. Селиванов М. Н., Фридман А. Э., Кудряшова Ж. Ф. Качество измерений. Метрологическая справочная книга. — Л.: Лениздат, 1987. — 295 с.
12. Спенсер-Грегори Г., Роурке Е. Гигрометрия /Пер. с англ. Л. А. Чарихова. — М.: ГНТ изд-во ЛЧЦМ, 1963. — 204 с.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ХРАНЕНИЮ РАБОЧЕГО ЭТАЛОНА ЕДИНИЦЫ СКОРОСТИ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА

Принцип построения рабочего эталона единицы скорости воздушного потока (ВЭТ 150-1-86) и предварительные метрологические исследования его изложены ранее в работах [1-3]. В статье [2] приведены физические принципы, положенные в основу работы измерителей скорости воздушного потока, входящих в состав рабочего эталона, а также дан частичный анализ погрешностей измерителей.

В настоящей статье приводятся результаты периодической аттестации рабочего эталона, проведенной в период 1986-1987 гг. при непосредственном сличении его с государственным специальным эталоном Госстандарта СССР (НПО ВНИИМ им. Д. И. Менделеева), результаты исследований поля скоростей компаратора воздушного потока (аэродинамической трубы, входящей в состав рабочего эталона), результаты исследования стыковки градуировочных характеристик измерителей, а также данные по исследованию их стабильности.

Вначале проанализируем результаты исследований характеристик поля скоростей компаратора, так как воздушный поток, создаваемый компаратором, должен удовлетворять определенным требованиям для поля скоростей.

К основным требованиям поля скоростей воздушного потока следует отнести:

1) неравномерность воздушного потока по сечению рабочей зоны аэродинамической трубы, характеризующая коэффициентом μ , который не должен превышать 4 %;

2) интенсивность турбулентных пульсаций воздушного потока в рабочей зоне аэродинамической трубы, характеризующая коэффициентом ϵ , который не должен превышать 4 %;

3) нестабильность воздушного потока в рабочей зоне аэродинамической трубы, характеризующая коэффициентом τ , который не должен превышать 3 %.

Характеристики поля скоростей компаратора определялись с применением измерителей скорости воздушного потока рабочего эталона.

Исследования неравномерности поля скоростей воздушного потока проводились по трем сечениям рабочей зоны компаратора (на срезе сопла $X = 0$, на расстояниях $X = 200$ мм и $X = 400$ мм от среза сопла). Измерения показали, что неравномерность воздушного потока в различных сечениях рабочей зоны компаратора и при различных задаваемых скоростях не превысила нормированного значения. Коэффициент μ изменялся в пределах 0-3 %.

Аналогичные измерения (в тех же сечениях рабочей зоны компаратора и при различных скоростях воздушного потока) проводились при определении интенсивности турбулентных пульсаций. Данные измерений пока-

ли, что воздушный поток рабочей зоны компаратора достаточно ламинарен, а коэффициент пульсаций ϵ изменялся в пределах 0,5–2 % в зонах высоких скоростей.

Нестабильность во времени скорости воздушного потока определяется за период времени $t = 30$ мин в двух сечениях рабочей зоны компаратора и при различных значениях задаваемых скоростей. Исследования показали, что нестабильность во времени скорости воздушного потока значительна и находится в пределах нормированного допуска. Коэффициент нестабильности τ изменялся в пределах 0–2,5 %. Погрешность от нестабильности на любой из задаваемых скоростей не превысила $1/3$ основной погрешности измерения скорости компаратора, т. е. $3\sigma < 1/3\Delta_{\text{АТ}}$.

Из экспериментальных исследований поля скоростей компаратора видно, что по своим характеристикам создаваемый воздушный поток отвечает требованиям по неравномерности, пульсациям и стабильности. Это позволяет с большой точностью передавать единицу скорости воздушного потока образцовым СИ путем непосредственного сличения их с измерителями скорости рабочего эталона в этом воздушном потоке.

Проанализируем результаты исследования рабочего эталона. Эти исследования проводились путем сличения его с государственным специальным эталоном на различных скоростях воздушного потока. Были определены метрологические характеристики рабочего эталона, проведены анализ и оценка составляющих погрешностей измерителей скорости, входящих в состав рабочего эталона.

1. Пневмометрический измеритель скорости воздушного потока рабочего эталона

При измерении скорости воздушного потока приемником полного и статического давления (ППСД) скорость потока определяется по формуле:

$$v_{\text{ППСД}} = \sqrt{\frac{2p_{\text{ст}}T\Delta p_{\text{пр}}\xi_{\text{пр}}(1-\epsilon')}{\rho_{\text{ст}}T_{\text{ст}}p(1-0,378p_{\text{нп}}\varphi/p)}}, \quad (1)$$

где $p_{\text{ст}}$, $\rho_{\text{ст}}$, $T_{\text{ст}}$ – стандартные значения статического давления, плотности воздуха и температуры воздуха соответственно; T , p – температура воздуха и атмосферное давление соответственно при проведении измерений эталонами; $\Delta p_{\text{пр}}$ – разность между полным и статическим давлением, измеряемая подключенным к ППСД дифференциальным манометром; ϵ' – поправка на сжимаемость; $p_{\text{нп}}$ – давление насыщенного пара при данной температуре; φ – относительная влажность воздуха во время измерений; ρ – коэффициент ППСД рабочего эталона.

Коэффициент ППСД рабочего эталона $\xi_{\text{пр}}$ рассчитывался по данным посредственного сличения ППСД с государственным специальным эталоном по формуле

$$\xi_{\text{пр}} = v_{\text{гз}}/v_{\text{рз}} = \xi_{\text{гз}} \sqrt{\Delta p_{\text{гз}}/\Delta p_{\text{рз}}}, \quad (2)$$

где $v_{\text{гз}}$ – скорость воздушного потока, измеренная по государственному специальному эталону; $v_{\text{рз}}$ – скорость воздушного потока, измеренная

ППСД рабочего эталона; $\xi_{гэ}$ – коэффициент эталонного приемника; $\Delta p_{рэ}$ – разность между значениями давления на приемнике государственного эталона и приемнике рабочего эталона соответственно.

Расчет по формуле (1) можно упростить, введя в него стандартные значения величин, представленные ниже:

Величина	$p_{ст}$	$T_{ст}$	$\rho_{ст}$	$\xi_{пр}$
Численное значение	1013,25 Па	288,15 К	1,225 кг/м ³	1,0044

Тогда выражение (1) примет вид:

$$v_{ППСД} = 23,961 \sqrt{\frac{T_g \Delta p_{пр}}{p (1 - 0,378 p_{нп} \varphi / p)}},$$

или окончательно

$$v_{ППСД} = A \sqrt{\Delta p_{пр}},$$

где A – коэффициент, определяющий зависимость измерения скорости давления, температуры и относительной влажности воздуха в момент проведения сличений.

Вариация коэффициента A в формуле (4) обычно составляет 4,04–4, В подавляющем большинстве случаев рабочий эталон находится в специальном помещении и при нормальных климатических условиях, тогда расчет скорости по ППСД производится при численном значении коэффициента $A \approx 4,05$.

При метрологических исследованиях пневмометрического измерения скорости воздушного потока (при сличении его с государственным специальным эталоном) расчет значений скорости проводился по формуле (4).

Суммарное среднее квадратическое отклонение результата измерения скорости воздушного потока с помощью ППСД пневмометрического измерителя скорости рассчитывалось по формуле

$$S_{\Sigma v_{рэ}} = \sqrt{S_{v_{рэ}}^2 + S_{\theta_{v_{рэ}}}^2},$$

откуда

$$S_{\theta_{v_{рэ}}} = \sqrt{(\theta_{\Delta p_{пр}}^2 + \theta_{\xi_{пр}}^2 + \theta_{T_0}^2 + \theta_{p_0}^2)/3},$$

где $\theta_{\xi_{пр}}$ – неисключенная систематическая погрешность определения коэффициента ППСД рабочего эталона ($\xi_{пр}$); $\theta_{\Delta p_{пр}}$ – неисключенная систематическая погрешность измерения разности давлений ППСД рабочего эталона $\Delta p_{пр}$; θ_{T_0} – неисключенная систематическая погрешность измерения температуры T_0 в момент сличений; θ_{p_0} – неисключенная систематическая погрешность измерения атмосферного давления p_0 в момент сличений.

Таблица 1

Составляющие погрешности, м/с	Значения скорости воздушного потока по государственному эталону, м/с						
	5	10	20	30	40	50	60
$\theta_{\Delta p_{пр}} \cdot 10^{-3}$	16,0	4,0	1,0	0,5	0,4	0,4	0,3
$\theta_{\xi_{пр}} \cdot 10^{-2}$	4,0	1,2	0,8	0,7	0,7	0,7	0,7
$\theta_{T_0} \cdot 10^{-3}$			3,0				
$\theta_{p_0} \cdot 10^{-3}$			2,0				
$S_{\theta v_{рз}} \cdot 10^{-3}$	3,4	9,2	5,1	4,6	4,6	4,6	4,5
$S_{\Sigma v_{рз}} \cdot 10^{-3}$	2,4	7,8	5,4	5,2	5,2	5,2	5,2

Значения составляющих погрешности в формуле (6) и рассчитанные значения $S_{\theta v_{рз}}$ и $S_{\Sigma v_{рз}}$ приведены в табл. 1.

Две повторные серии сличения пневмометрического измерителя скорости воздушного потока с государственным специальным эталоном при скоростях в диапазонах $5 \div 54,8$ и $4 \div 21$ м/с показали, что средняя квадратическая случайная погрешность S_v составила соответственно 0,046 и 0,035 м/с. Сличения проводились спустя 5 месяцев после первичной аттестации рабочего эталона. Доверительные границы (ϵ) случайной погрешности результата измерения при доверительной вероятности $P = 0,95$, числе измерений $n = 24$ и коэффициенте Стьюдента $t_C = 1,96$ составили

$$\epsilon = t_C S_v = 1,96 \cdot 0,046 = 0,09 \text{ м/с для диапазона } 5,0 \dots 54,8 \text{ м/с}$$

и при $P = 0,95$, $n = 17$ и $t_C = 2,12$

$$\epsilon = t_C S_v = 2,12 \cdot 0,035 = 0,07 \text{ м/с для диапазона } 4,0 \dots 21 \text{ м/с.}$$

2. Механический измеритель скорости воздушного потока рабочего эталона

Скорость воздушного потока, измеренная механическим измерителем рабочего эталона, определяется по формуле

$$v_{рз} = K_K F_K, \quad (7)$$

где F_K — значение преобразованной частоты вращения приемника механического измерителя, K_K — коэффициент передачи механического измерителя.

Коэффициент K_K определяется по государственному специальному эталону по формуле

$$K_K = v_{гз}/F_K \quad (8)$$

где $v_{гз}$ — скорость воздушного потока по государственному специальному эталону.

Обычно диапазон изменения коэффициента K_K незначителен и в среднем $K_K = 4 \cdot 10^{-3}$.

Оценку суммарного среднего квадратического отклонения скорости воздушного потока, измеренной механическим измерителем рабочего эталона, вычисляют по следующей формуле:

$$S_{\Sigma v_{гз}} = \sqrt{S_{v_{гз}}^2 + \Theta_{v_{гз}}^2 / 3}, \quad (9)$$

где $S_{v_{гз}}$ — среднее квадратическое отклонение результата измерения скорости воздушного потока механическим измерителем рабочего эталона, $\Theta_{v_{гз}}$ — неисключенная систематическая погрешность государственного специального эталона.

Значения $S_{v_{гз}}$ и $\Theta_{v_{гз}}$ приведены в табл. 2.

Таблица 2

Составляющие погрешности, м/с	Значения скорости воздушного потока по государственному эталону, м/с									
	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0
$S_{v_{гз}} \cdot 10^{-3}$	6,8	1,7	11,8	22,4	16,3	11,4	20,9	13,4	14,9	35,8
$\Theta_{v_{гз}} \cdot 10^{-3}$	2,3	4,3	6,3	8,3	10,3	12,3	14,3	16,3	18,3	20,3

Ниже приведен расчет значений $S_{\Sigma v_{гз}}$ по данным табл. 2:

$v_{гз}$ м/с.....	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0
$S_{\Sigma v_{гз}} \cdot 10^{-3}$	6,9	3,0	12,3	22,9	17,4	13,4	22,5	16,4	18,3	37,7

Были проведены исследования по определению относительной погрешности δ вариации частоты F на выходе блока преобразования (БП) механического измерителя для скоростей в диапазоне 0,3–6,08 м/с, задаваемых по государственному специальному эталону. На каждой из скоростей проводилось по 10 измерений выходной частоты F . Результаты исследований приведены в табл. 3.

Как показывают данные табл. 3, относительная погрешность вариации частоты на выходе БП при подключенном механическом измерителе скорости (МИС) воздушного потока рабочего эталона для исследованного диапазона скоростей незначительна.

С помощью государственного эталона была проведена градуировка

Таблица 3

Скорость воздушного потока по государственному эталону, м/с	Частота F на выходе БП рабочего эталона, Гц	σ Гц	δ %
0,30	12,14	0,1600	1,32
0,35	16,60	0,0558	0,34
0,98	57,87	0,1521	0,26
1,67	100,41	0,2401	0,24
1,88	114,04	0,2093	0,18
2,40	152,85	0,1294	0,08
2,96	187,81	0,2312	0,12
3,75	242,38	0,1781	0,07
6,08	387,28	0,2645	0,07

механического измерителя скорости рабочего эталона, а затем методом наименьших квадратов были составлены уравнения аппроксимации для расчета значений v_{pz} по выходной частоте F . Эти уравнения имеют вид:

$$v_{pz} = 0,46 + 0,94 \cdot 10^{-2} + 0,58 \cdot 10^{-6} F^2 \quad (10)$$

для диапазона $1,0 \div 6,0$ м/с,

$$v_{pz} = 3,17 + 0,22 \cdot 10^{-2} F + 0,50 \cdot 10^{-5} F^2 \quad (11)$$

для диапазона скоростей $6,0 \div 10,0$ м/с.

Погрешность вычисления скорости воздушного потока по уравнениям (10), (11), т. е. погрешность аппроксимации, не превышает 0,5 %.

Для определения единой погрешности измерения скорости воздушного потока во всем диапазоне $1-10$ м/с необходимо определить суммарную погрешность $S_{\Sigma v_{pz \max}}$ при наибольших ее составляющих. Суммарная погрешность рассчитывалась по формуле

$$S_{\Sigma v_{pz}} = \sqrt{S_{v_{pz \max}}^2 + (\Theta_{v_{pz \max}}^2 + \Theta_{\text{аппр} \max}^2)/3}, \quad (12)$$

где $S_{v_{pz \max}}$ — максимальное значение среднего квадратического отклонения результата измерения скорости воздушного потока по механическому измерителю рабочего эталона, $\Theta_{v_{pz \max}}$ — максимальное значение неисключенной систематической погрешности государственного специального эталона, $\Theta_{\text{аппр} \max}$ — максимальная погрешность аппроксимации.

Максимальные относительные значения составляющих погрешностей в уравнении (12) и рассчитанные значения $S_{\Sigma v_{pz}}$ для скоростей в диапазоне $1 \div 10$ м/с в процентах приведены ниже:

$S_{v_{pz \max}}$	$\Theta_{v_{pz \max}}$	$\Theta_{\text{АППР} \max}$	$S_{\Sigma v_{pz}}$
0,358	0,203	0,501	0,475

Повторная серия сличений МИС рабочего эталона с государственным специальным эталоном при скоростях воздушного потока в диапазоне $0,59 \pm 9,75$ м/с показала, что средняя квадратическая случайная погрешность S_v составила $0,006$ м/с или $0,6\%$. Доверительные границы случайной погрешности результата измерений при $P = 0,95$, $n = 29$ и $t_C = 1,96$ составили

$$\epsilon = t_C S_v = 1,96 \cdot 0,006 = \pm 0,01 \text{ м/с.}$$

Был проведен комплекс исследований по определению степени стыковки градуировочных характеристик на сопряженных отметках диапазона в случае пневмометрического и механического измерителей скорости воздушного потока рабочего эталона. Так как диапазон измерения скорости воздушного потока пневмометрическим измерителем составляет $5-60$ м/с, а механическим измерителем $0,5-10,0$ м/с, были проведены серии параллельных сличений по этим измерителям рабочего эталона на сопряженных отметках диапазона для скорости порядка 5 м/с ($5,2; 5,7; 5,5; 5,0$ м/с). Средняя квадратическая погрешность стыковки градуировочных характеристик изменялась в разных сериях сличений от $0,04$ до $0,09$ м/с.

Исследования по определению начальной чувствительности механического измерителя скорости показали, что $v_0 = 0,55$ м/с. Многократные измерения на стабильность во времени v_0 подтвердили это значение.

3. Термоанемометрический (вихревой) измеритель скорости воздушного потока рабочего эталона

Исследования вихревого измерителя скорости воздушного потока рабочего эталона (ВИС) проводились в два этапа. Первый этап – оценка погрешности измерения скорости воздушного потока термоанемометром непосредственно и второй этап – это оценка погрешности измерения скорости воздушного потока при сличении термоанемометра с государственным специальным эталоном, когда термоанемометр является измерителем частоты срыва вихрей за цилиндрическим телом, устанавливаемым перед чувствительным элементом термоанемометра.

Была также определена градуировочная характеристика ВИС рабочего эталона.

Рассмотрим результаты исследований ВИС в указанной выше последовательности.

Оценка суммарного среднего квадратического отклонения $S_{\Sigma v_{ps}}$ термоанемометра при сличении его с государственным специальным эталоном рассчитывалась по формуле

$$S_{\Sigma v_{ps}} = \sqrt{S_{v_{ps}}^2 + \Theta_{v_{rs}}^2 / 3}, \quad (13)$$

где $S_{v_{ps}}$ – среднее квадратическое отклонение результата измерения скорости воздушного потока термоанемометром рабочего эталона по результатам сличений с государственным специальным эталоном (%); $\Theta_{v_{rs}}$ – неисключенная систематическая погрешность государственного специального эталона (%).

же приведены рассчитанные в процентах значения $S_{v_{p3}}$, $\Theta_{v_{p3}}$ и $S_{\Sigma v_{p3}}$:

v_{p3} м/с	0,20	0,33	0,47	0,67	0,82	0,92	1,06	1,25
$\Theta_{v_{p3}}$	0,35	0,29	0,26	0,24	0,24	0,23	0,23	0,22
$S_{v_{p3}}$	1,78	0,40	1,00	0,58	0,62	0,58	0,65	0,64
$S_{\Sigma v_{p3}}$	1,80	0,44	1,01	0,63	0,67	0,63	0,69	0,67
v_{p3} м/с	1,51	1,85	2,14	2,39	2,62	3,02	3,38	3,70
$\Theta_{v_{p3}}$	0,22	0,22	0,22	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21
$S_{v_{p3}}$	0,55	0,54	0,50	0,50	0,48	0,43	0,40	0,38
$S_{\Sigma v_{p3}}$	0,59	0,58	0,54	0,54	0,52	0,48	0,42	0,40

Путем непосредственного сличения показаний термоанемометра и государственного эталона была определена градуировочная характеристика термоанемометра в виде функциональной зависимости $U_{та} = F(v_{p3})$, где U – выходное напряжение термоанемометра (мВ), v_{p3} – скорость воздушного потока по государственному эталону (м/с).

Данные градуировки приведены ниже:

v_{p3} м/с	0,00	0,20	0,33	0,47	0,67	0,82	0,95	1,06	1,26
$U_{та}$ мВ	753	793	817	836	861	876	886	894	908
v_{p3} м/с	1,51	1,85	2,14	2,39	2,62	3,02	3,38		3,70
$U_{та}$ мВ	924	944	958	970	981	997	1011		1022

Данные градуировки могут быть использованы при измерении скорости и пульсаций воздушного потока непосредственно термоанемометром. Использование термоанемометра в составе ВИС как регистратора астоты срыва вихрей требует такой же градуировки его по государственному эталону в функциональной зависимости $F_{ВИС} = f(v_{p3})$, где $F_{ВИС}$ – астаота срыва вихрей, регистрируемая частотомером ВИС; v_{p3} – скорость воздушного потока по государственному эталону. Данные градуировки следующие:

v_{p3} м/с	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$\bar{F}_{ВИС}$ Гц	50	75	100	125	150	175	200	225

Градуировочная характеристика ВИС линейна в измеряемом диапазоне скоростей воздушного потока.

Был проведен комплекс работ по определению стабильности измерений скорости воздушного потока рабочего эталона.

При различных значениях скоростей воздушного потока, создаваемых компаратором, исследовалась стабильность показаний по выходной частоте F (для вихревого и механического измерителей рабочего эталона) и напряжению U (для пневмометрического измерителя рабочего эталона) и средняя квадратическая погрешность S , нестабильности по скорости воздушного потока, измеряемая измерителями рабочего эталона.

Вихревой измеритель скорости воздушного потока исследовался при скоростях в диапазоне $0,28-0,91$ м/с. Значение S , для этого диапазон скоростей изменялось в пределах $0,01 \div 0,04$ м/с, что соответствует выходной частоте $S_F = 1,29 \div 10,40$ Гц. На рис. 1-4 представлены гистограммы распределения погрешности Δv от нестабильности для трех отдельных диапазонов скоростей и для диапазона в целом (w - частота распределения Δv).

$$v = 0,28 \dots 0,34 \text{ м/с}$$

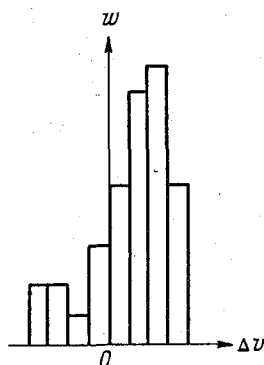


Рис. 1.

$$v = 0,46 \dots 0,48 \text{ м/с}$$

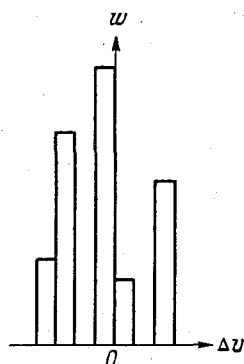


Рис. 2.

$$v = 0,81 \dots 0,85 \text{ м/с}$$

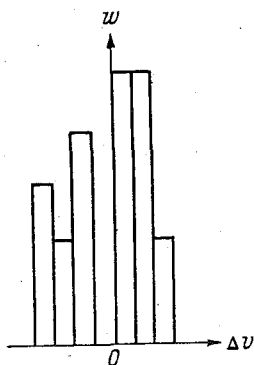


Рис. 3.

$$v = 0,28 \dots 0,91 \text{ м/с}$$

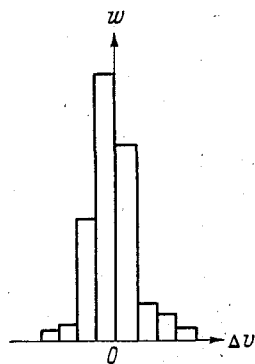


Рис. 4.

Анализ форм гистограмм для отдельных диапазонов скорости и в целом для диапазона показывает, что распределение погрешности Δv от нестабильности потока можно аппроксимировать нормальным законом распределения.

Механический измеритель исследовался на стабильность при скорости воздушного потока в диапазоне 0,5–10 м/с. На рис. 5–8 представлены гистограммы распределения погрешности Δv от нестабильности воздушного потока для трех отдельных диапазонов скоростей и по диапазону в целом. Анализ формы гистограмм показывает, что при скорости 0,5 м/с (рис. 5) и 5–6 м/с (рис. 6) наблюдается смещение вправо относительно центра распределения, т. е. этот вид гистограмм можно аппроксимировать релейевским распределением (усеченным) за счет систематической составляющей погрешности. При $v = 9 \div 10$ м/с распределение погрешности Δv аппроксимируется нормальным распределением. В целом по

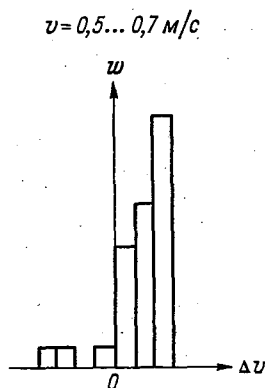


Рис. 5.

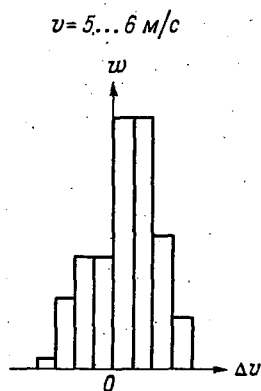


Рис. 6.

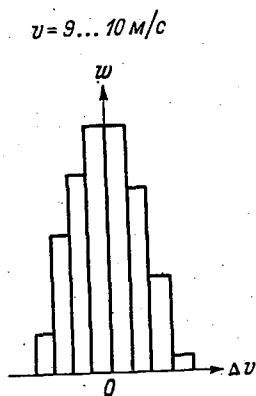


Рис. 7.

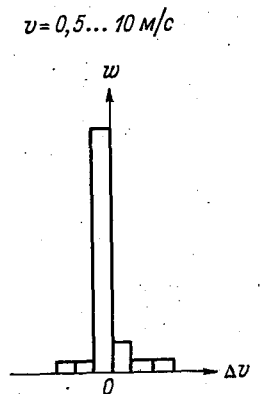


Рис. 8.

исследованному диапазону скорости воздушного потока функция распределения Δv может быть аппроксимирована островершинным нормальным распределением. Значение S_v в исследованном диапазоне скоростей изменялось в пределах $0,01 \div 0,06$ м/с, а значение S_F — в пределах $1,01 \div 4,41$ Гц.

Пневмометрический измеритель скорости воздушного потока исследовался на стабильность показаний при скорости потока от 5 до 13 м/с. На рис. 9–12 представлены гистограммы распределения погрешности Δv от нестабильности также для трех диапазонов скоростей и для диапазона в целом.

Анализ форм гистограмм показывает, что распределение погрешности Δv от нестабильности потока можно аппроксимировать нормальным распределением. Значение S_v в исследованном диапазоне изменялось в пределах $0,02 \div 0,09$ м/с, а напряжение U — в пределах $0,37 \div 3,94$ мВ соответственно.

Анализируя результаты на стабильность показаний по всем трем измерителям рабочего эталона, можно отметить следующее. Трансформа-

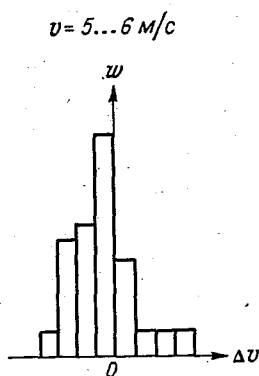


Рис. 9.

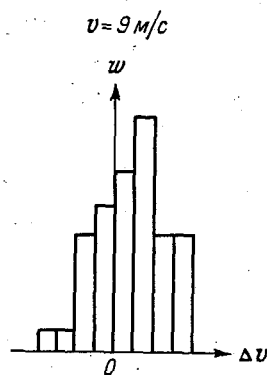


Рис. 10.

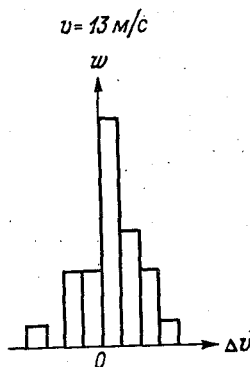


Рис. 11.

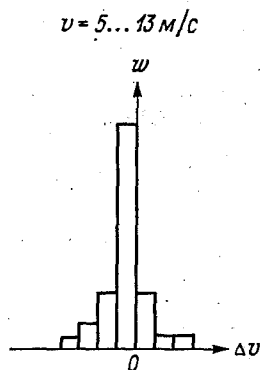


Рис. 12.

дия законов распределения во времени и в исследованных диапазонах скоростей происходит незначительно относительно центров распределения. В среднем значение контролируемого среднего квадратического отклонения показаний по нестабильности воздушного потока S_y по всем трем измерителям рабочего эталона составляет 0,03 м/с.

В целом рабочий эталон сохраняет свои метрологические характеристики по стабильности, стыковке градуировочных характеристик измерителей, а погрешность рабочего эталона составляет $S_{\Sigma} \leq \pm (0,003 + 0,005v)$ м/с.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузьмин В. А., Рогалев Ю. В., Фатеев Н. П. Метрологические исследования по выбору образцовых средств измерения скорости воздушного потока. — Труды ГГО, 1985, вып. 491, с. 28—33.
2. Метрологические исследования рабочего эталона единицы скорости воздушного потока /А. В. Аверкин, С. Г. Ефимов, В. А. Кузьмин, Ю. В. Рогалев, Н. П. Фатеев. — Труды ГГО, 1986, вып. 510, с. 3—11.
3. Принципы построения рабочего эталона скорости воздушного потока /В. А. Кузьмин, С. Г. Ефимов, Ю. В. Рогалев, Н. П. Фатеев. — Труды ГГО, 1985, вып. 491, с. 3—6.

ВЕДОМСТВЕННАЯ ПОВЕРОЧНАЯ СХЕМА ДЛЯ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ СКОРОСТИ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА

Ранее разработанная локальная поверочная схема для средств измерений (СИ) скорости воздушного потока включала в себя в качестве исходного образцового средства измерения приемник полного и статического давления (ППСД) первого разряда [2, 3]. Этот ППСД периодически сличался на образцовой аэрогидродинамической установке Госстандарта СССР (НПО ВНИИМ им. Д. И. Менделеева), а затем единица скорости воздушного потока передавалась через компаратор (аэродинамическую трубу) образцовым СИ низших разрядов и рабочим СИ параметров ветра.

Введение в действие государственного специального эталона единицы скорости воздушного потока и государственной поверочной схемы (ГОСТ 8.542-86 „ГСИ. Государственный специальный эталон и государственная поверочная схема для средств измерений скорости воздушного потока в диапазоне 0,1–100 м/с”) позволило создать рабочий эталон единицы скорости воздушного потока (ВЭТ 150-1-86) и ведомственную поверочную схему для средств измерений скорости воздушного потока в системе Госкомгидромета СССР [1].

Разработка ведомственной поверочной схемы обоснована большим количеством и разнообразием принципов действия средств измерений скорости воздушного потока, эксплуатируемых на сети метеорологических станций, постах и НИС в системе Госкомгидромета СССР.

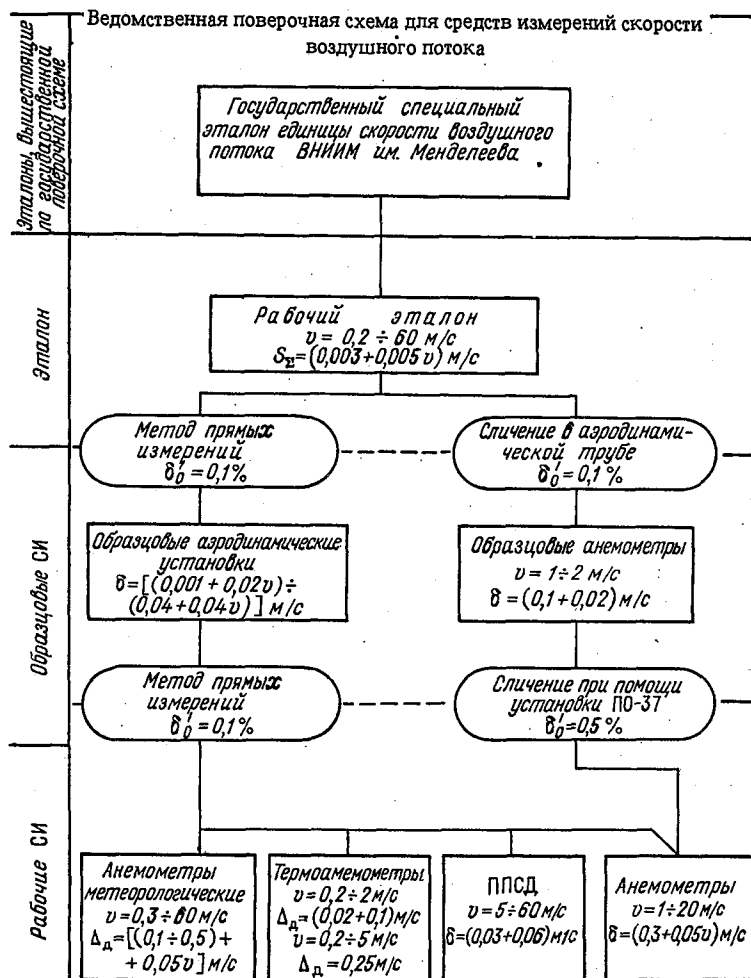
Целью разработки являлось обеспечение единства измерений скорости воздушного потока при поверке образцовых и рабочих СИ.

Задачей разработки являлось создание научно обоснованной системы передачи размера единицы скорости воздушного потока от государственного эталона рабочему эталону и далее образцовым и рабочим СИ.

Технико-экономическим эффектом от разработки рабочего эталона и ведомственной поверочной схемы является повышение точности образцовых СИ скорости воздушного потока и как следствие увеличение производительности поверочных работ за счет универсального применения образцовых средств поверки.

Во главе поверочной схемы (см. рисунок) стоит государственный специальный эталон единицы скорости воздушного потока, созданный на базе лазерного анемометра типа „MAIVERN-6200”. Размер единицы скорости воздушного потока передается рабочему эталону путем непосредственного сличения его с государственным специальным эталоном на аэродинамическом стенде АДС-700/100. Относительная погрешность передачи единицы скорости воздушного потока составляет 0,1 %.

Рабочий эталон представляет собой „групповой” эталон, включающий в свой состав три измерителя скорости воздушного потока в различных диапазонах. Вихревой измеритель скорости воздушного потока работает в диапазоне скоростей 0,2–0,7 м/с, механический измеритель скорости воздушного потока работает в диапазоне скоростей 0,5–10 м/с, пневмо-



метрический измеритель скорости воздушного потока работает в диапазоне скоростей 5–60 м/с. Суммарное среднее квадратическое отклонение рабочего эталона при его сличении с государственным специальным эталоном при скоростях потока 0,2–60 м/с составляет $S_{\Sigma} \leq \pm (0,003 + 0,005v)$ м/с, где v – скорость воздушного потока, измеренная рабочим эталоном.

Передача размера единицы скорости воздушного потока от рабочего эталона образцовым и рабочим СИ осуществляется по двум ветвям поверочной схемы. По правой ветви осуществляется передача единицы скорости воздушного потока для образцовых (в качестве таковых при отборе могут служить анемометры, например, типа МС-13) анемометров и для установок ПО-37, а затем для рабочих анемометров. Создание специальной ветви поверочной схемы для анемометров этого типа обусловлено тем, что как в системе Госкомгидромета СССР, так и в других ведомствах

находится в обращении большое количество ручных анемометров МС-13 и поверочных установок ПО-37.

Передача размера единицы образцовым анемометрам при их аттестации (градуировке) производится с относительной погрешностью 0,1 % методом непосредственного сличения анемометра с измерителями скорости воздушного потока рабочего эталона в аэродинамической установке (аэродинамической трубе) при скорости этого потока в диапазоне $1 \div 20$ м/с. При этом аэродинамическая установка является компаратором (только источником) воздушного потока, а аттестуемый образцовый анемометр устанавливается в рабочей зоне аэродинамической установки рядом с одним из измерителей рабочего эталона в зависимости от диапазона задаваемых скоростей. Предел допускаемой погрешности измерения скорости воздушного потока образцовым анемометром составляет $\Delta_d \leq \pm (0,1 + 0,02v)$ м/с, где v – скорость воздушного потока, измеренная образцовым анемометром.

Затем с помощью аттестованных по рабочему эталону образцовых анемометров осуществляется градуировка поверочных установок ПО-37 при выпуске их из производства и при периодической аттестации в соответствии с установленным межповерочным интервалом. Предел допускаемой основной погрешности измерения скорости воздушного потока Δ , непосредственно установкой ПО-37 не превышает $\pm (0,2 + 0,04v)$ м/с, где v – скорость воздушного потока, измеренная установкой. Градуировка поверочных установок ПО-37 осуществляется одним образцовым анемометром (вместо ранее применявшихся пяти анемометров) в соответствии с требованиями РД 52.04.64–86 „Методические указания. Установка для поверки ручных анемометров ПО-37. Методы и средства поверки”, 1986 г.

Далее передача размера единицы скорости воздушного потока рабочим анемометрам осуществляется путем их поверки в установке ПО-37. Относительная погрешность δ'_0 метода передачи размера единицы скорости воздушного потока установкой ПО-37 рабочим анемометрам составляет 0,5 %. Предел допускаемой погрешности рабочих анемометров Δ для скоростей $1 - 20$ м/с не более $\pm (0,3 + 0,05v)$ м/с, где v – скорость потока по рабочему анемометру при его градуировке в установке ПО-37.

Как видно из поверочной схемы, рабочие анемометры правой ветви могут поверяться также непосредственно в образцовых аэродинамических установках (аэродинамических трубах) методом прямых измерений.

По левой ветви поверочной схемы передача размера единицы скорости воздушного потока от рабочего эталона производится образцовыми аэродинамическим установкам и далее рабочим СИ скорости потока.

Образцовые аэродинамические установки представляют собой совокупность средств задания воздушного потока (аэродинамическая труба (АТ)) и средств измерения этого потока, входящих в состав АТ. Существует два варианта использования образцовых аэродинамических установок. Первый вариант – они служат компараторами (источниками воздушного потока), когда в них методом непосредственного сличения измерителей рабочего эталона с образцовыми и рабочими СИ скорости

воздушного потока производят поверку (градуировку) последних. Второй вариант – аэродинамические установки служат как образцовые для поверки рабочих СИ с помощью измерителей скорости воздушного потока, входящих в состав АТ и аттестованных по рабочему эталону.

Передача размера единицы скорости воздушного потока от рабочего эталона образцовым аэродинамическим установкам производится методом прямых измерений, т. е. когда один из измерителей рабочего эталона (в зависимости от диапазона измеряемых скоростей) устанавливается в воздушный поток АТ и по нему градуируют СИ воздушного потока, входящее в состав АТ. Относительная погрешность δ_0 метода передачи размера единицы скорости воздушного потока при скорости 0,2–60 м/с составляет 0,1 %. Предел допускаемой погрешности измерения скорости образцовой аэродинамической установкой в зависимости от ее характеристик (аэродинамических характеристик поля скоростей) может составлять $\Delta_d = [(0,001 + 0,02v) \div (0,04 + 0,04v)]$ м/с, где v – скорость воздушного потока, измеренная измерителем скорости АТ.

Далее с помощью образцовых аэродинамических установок единица скорости воздушного потока передается рабочим СИ при их поверке в этих установках. Передача размера единицы осуществляется методом прямых измерений, когда рабочие СИ устанавливают непосредственно в воздушный поток рабочей зоны образцовой аэродинамической установки. Относительная погрешность δ_0 метода передачи размера единицы в этом случае составляет 0,1 %. В качестве рабочих определены следующие СИ скорости воздушного потока: анемометры метеорологические с диапазоном измерения в пределах 0,3–60 м/с и абсолютной погрешностью измерения $[(0,1 \div 0,5) + 0,05v]$ м/с, где v – скорость воздушного потока, измеренная рабочим анемометром; термоанемометры с диапазонами измерения 0,2–2 и 0,2–5 м/с с абсолютной погрешностью измерения в пределах $(0,02 + 0,1v)$ и 0,25 м/с, где v – скорость воздушного потока, измеренная рабочим термоанемометром; приемники полного и статического давлений – пневмометрическая трубка Пито – с диапазоном измерения 5–60 м/с и абсолютной погрешностью измерения $(0,03 + 0,06v)$ м/с, где v – скорость воздушного потока, измеренная ППСД; анемометры метеорологические, например, МС-13 с диапазоном измерения 1–20 м/с и абсолютной погрешностью измерения $(0,3 + 0,05v)$ м/с, где v – скорость воздушного потока, измеренная рабочим анемометром.

В поверочной схеме не указаны конкретные типы рабочих СИ, так как она может быть распространена и на СИ скорости воздушного потока вновь разрабатываемые и модернизируемые.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Метрологические исследования рабочего эталона единицы скорости воздушного потока /А. В. Аверкин, С. Г. Ефимов, В. А. Кузьмин, Ю. В. Роголев, Н. П. Фатеев. – Труды ГГО, 1986, вып. 510, с. 3–11.
2. Образцовые средства измерения скорости воздушного потока, их исследование и аттестация /Н. П. Фатеев, Б. Л. Сушнянский, В. А. Кузьмин, Д. Я. Блантер. – Труды ГГО, 1977, вып. 392, с. 3–15.
3. Фатеев Н. М. Поверка метеорологических приборов. – Л.: Гидрометеиздат, 1975. – 311 с.

ОСНОВНЫЕ АСПЕКТЫ ТЕОРИИ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ ДЛЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

Как известно [3], основными задачами теории надежности являются установление закономерностей возникновения отказов, изучение влияния внешних и внутренних факторов на надежность, установление количественных характеристик метрологической надежности средств измерений (СИ). Решение именно этих задач применительно к средствам измерений метеорологического назначения является целью данной работы.

В настоящее время существует два принципиально различных направления решения поставленных выше задач. Первое направление основано на изучении физико-химических свойств и параметров элементов конструкции СИ, происходящих в них физико-химических процессов, физической природы и механизма отказов. При этом текущее состояние элементов и систем описывается уравнениями, отражающими физические закономерности.

Второе направление основано на изучении статистических и вероятностных закономерностей появления отказов множества однотипных СИ. При этом отказы рассматриваются как некоторые отвлеченные случайные события, а многообразные физические состояния элементов и СИ сводятся в основном к двум состояниям: исправности и неисправности (полной или частичной), которые описываются функциями надежности.

Сочетание указанных выше направлений решения основных задач надежности составляет существующую методологическую основу подхода к исследованию метрологической надежности метеорологических средств измерений.

Как отмечено в ряде работ автора [8, 13], более перспективное направление дальнейшего развития теории метрологической надежности метеорологических СИ – это сочетание алгоритмических, статистических и вероятностных методов исследования надежности с „глубоким проникновением в физическую (или физико-химическую) сущность процессов, протекающих в СИ”. Для этого необходимо установить непосредственную зависимость основных показателей надежности, во-первых, от физических свойств и параметров материалов и элементов, от физико-химических процессов изменения этих свойств и параметров и, во-вторых, от интенсивности эксплуатационных воздействий на состояние СИ с учетом случайного характера величин и процессов.

Изучение физических закономерностей изменения свойств и параметров элементов, кинетики процессов, вызывающих эти изменения, представляется особенно важным, если иметь в виду, что существо проблемы надежности заключается в конечном счете в изменчивости материалов и элементов во времени при заданных условиях эксплуатации.

Оценка надежности СИ, основанная на данных о физических свойствах материалов, характеристиках элементов и воздействующих факторов,

не только исключает, но и предполагает использование алгоритмических, вероятностных и статистических методов, поскольку эти характеристики представляют собой обычно случайные функции времени или случайные величины.

Отражением объективной необходимости комплексного подхода к исследованию метрологической надежности метеорологических СИ является разработанная на основе статистических данных о причинах и характере проявления метрологических отказов их классификация (рис. 1), полезная для решения задач количественной оценки и прогнозирования надежности.

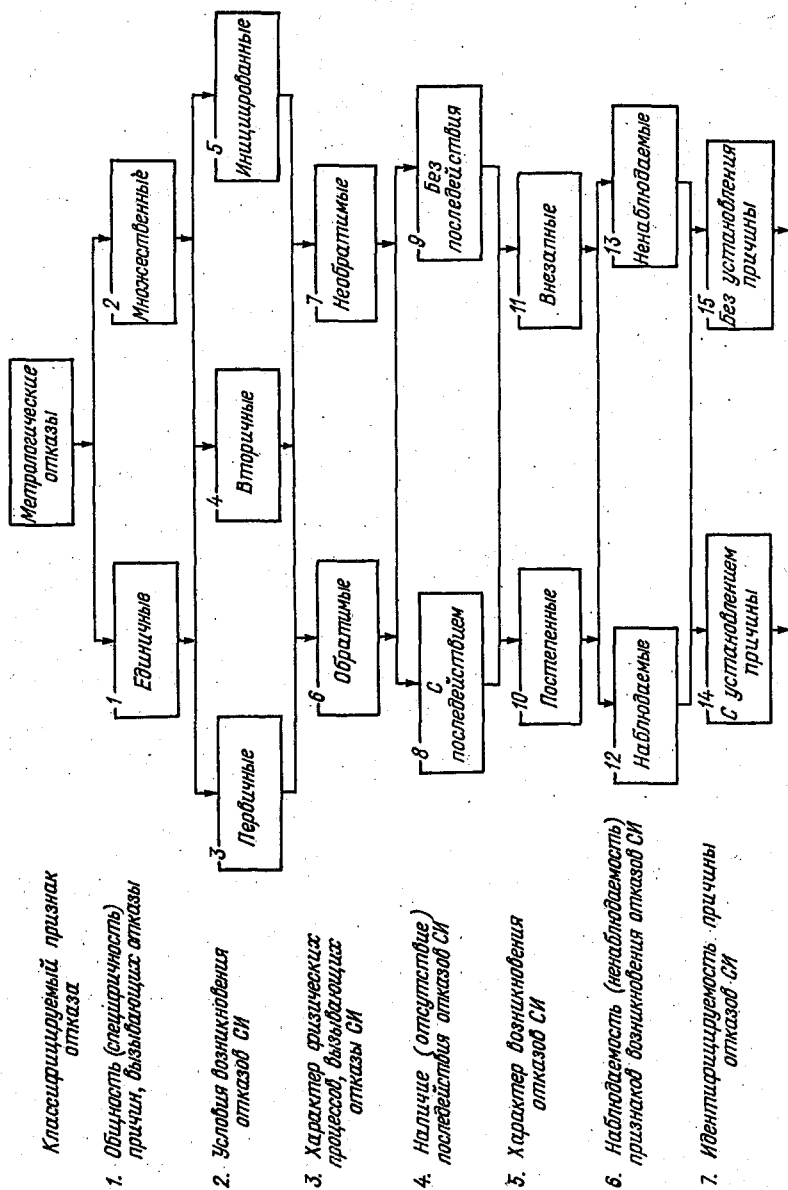
Определение вида отказа невозможно без применения физических методов исследований, а количественная оценка характеристик метрологической надежности и их прогнозирование невозможны без знания видов отказов, характерных для данного типа СИ.

Так, классификация отказов по признакам 1–5 позволяет построить вероятностную модель отказов и решать задачи количественной оценки и прогнозирования надежности, а учет признаков 6–13 позволяет существенно повысить точность и достоверность такой оценки.

Например, классификация отказов по условиям их возникновения на первичные, возникшие в условиях, предусмотренных нормативной документацией на СИ; вторичные, возникшие при отклонении условий эксплуатации от установленных, и инициированные, возникшие в условиях, вызванных целенаправленным изменением состояния СИ при их обслуживании или эксплуатации, и учет причин их появления позволяют установить причинноследственные связи отказов и возможность их устранения при существующих условиях эксплуатации СИ. Знание видов отказов позволяет правильно выбрать математический аппарат для их анализа, а физико-химические исследования причин их возникновения позволяют правильно построить модель отказа и на ее основе решать задачи оценки и повышения метрологической надежности.

Анализ состояния парка метеорологических СИ показал, что они значительно отличаются от всех исследованных в настоящее время СИ и систем. Специфика метеорологических СИ состоит в том, что они эксплуатируются в условиях значительной агрессивности внешней среды длительного периода (как правило, 10 лет и более) и функционирование их основано на таких физических принципах и явлениях, при которых в процессе их эксплуатации происходит „расходование” (перенос, перераспределение) материи и развитие необратимых процессов износа, старения, накопления усталостных явлений. Кроме этого, весьма важно то, что конструкция метеорологических СИ содержит относительно небольшое количество элементов, что объясняет их сравнительно высокую надежность и существенно ограничивает статистические эффекты компенсации и наложения друг на друга случайных процессов дрейфа во времени метрологических параметров, характерные для электроизмерительных и радиоэлектронных СИ. Поэтому эффект последствия случайных процессов дрейфа параметров отдельных элементов конструкции метеорологических СИ может проявляться в полной мере, что и подтверждают ре-

Рис. 1. Классификация метрологических отказов метеорологических средств измерений.



8. Устранимость причин отказов СИ

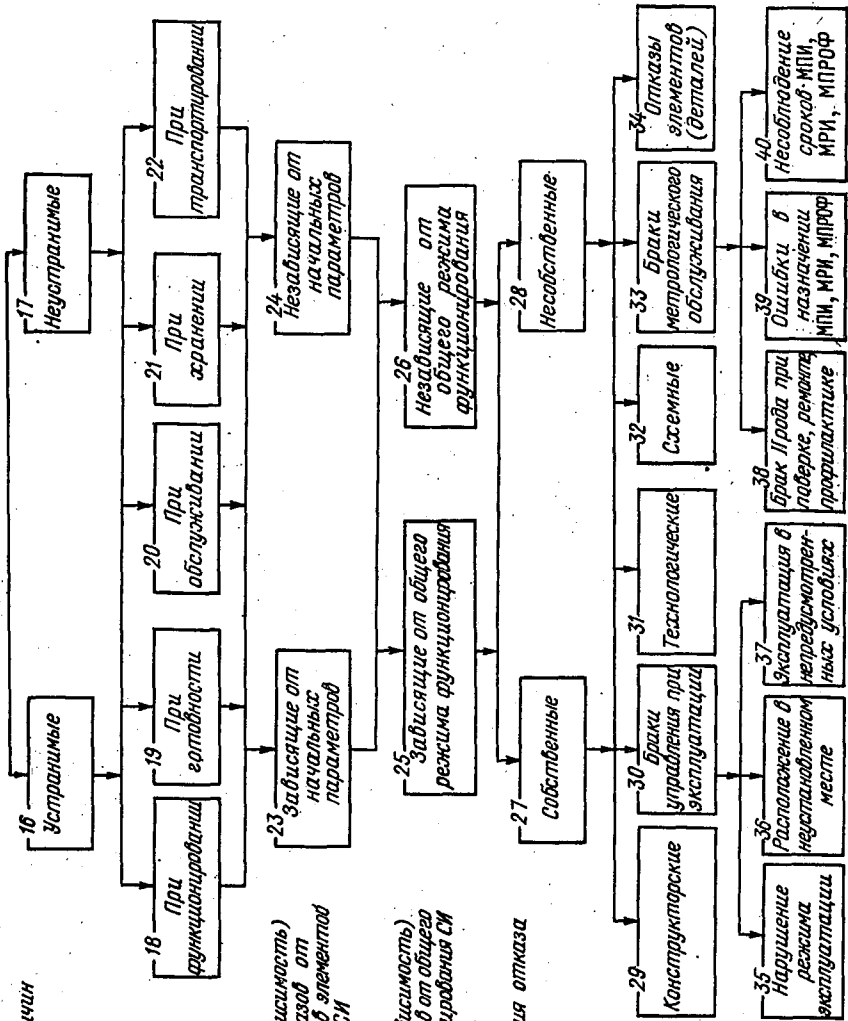
9. Фаза процесса эксплуатации, при которой возник отказ

10. Зависимость (независимость) возникновения отказов от начальных параметров элементов или в целом СИ

11. Зависимость (независимость) возникновения отказов от общего режима функционирования СИ

12. Место возникновения отказа

13. Причины возникновения отказов



зультаты исследований [11, 13].

В основном метеорологические СИ относятся к восстанавливаемым механическим, электромеханическим и термоэлектрическим приборам процессы износа и старения которых обладают ярко выраженным последствием (термометры, барометры, анемометры, СИ солнечной радиации и т. д.), вызванным, как правило, технологией их изготовления и условиями эксплуатации. Влияние указанных процессов начинает проявляться на определенном этапе эксплуатации метеорологических СИ, вызывая зависимость их будущих состояний от последовательности предыдущих а также и от начальных значений параметров, определяющих метрологическую надежность СИ.

Анализ результатов эксплуатации метеорологических СИ, проведенный автором [4, 5], показал, что основными причинами возникновения и метрологических отказов являются прогрессивности, вызванные

1) старением, износом, накоплением усталостных элементов конструкции СИ;

2) влиянием внешних факторов;

3) несовершенством конструкции и технологии изготовления;

4) градуировкой (поверкой);

5) субъективностью отсчета операторов, проводящих измерение.

Метеорологические СИ эксплуатируются в условиях агрессивности внешней среды и на их метрологическую надежность оказывают влияние известные климатические факторы [2]: температура, влажность и давление воздуха, солнечная радиация, ветер, а также песок и пыль.

Особенности применения СИ обуславливаются воздействием на них вибраций и ударов, линейными и центробежными перегрузками, температурой и влажностью в месте установки СИ, проникающей радиацией и пр.

К временным факторам относятся износ и старение СИ. Они занимают несколько особое положение среди воздействующих факторов. Износ - особый вид разрушения поверхности материала деталей и элементов вследствие их механического трения друг о друга или вследствие действия электрического тока. При износе наблюдаются изменения как размеров, так и физико-химических структур трущихся поверхностей. Износ форсируется под воздействием механических факторов: вибраций и ударов.

Старение - естественный процесс изменения физико-химических свойств материалов, деталей и сборных соединений в процессе эксплуатации с течением времени. Старение форсируется под воздействием климатических факторов.

Эксплуатационные факторы СИ зависят от действий обслуживающего персонала, который может нарушать работоспособность СИ в результате неправильной регулировки, некачественного ремонта и профилактики нарушения инструкций по эксплуатации, а также вследствие низкой квалификации.

Основным требованием к СИ, определяющим его работоспособность является его точность, характеризующаяся значением основной погреш-

ости показаний. Основная погрешность служит главным параметром СИ, выход ее за установленные пределы вызывает метрологический отказ.лучайный нестационарный процесс изменения основной погрешности $\gamma(t)$ во времени можно представить в виде

$$Y(t) = \xi(t) + \eta(t) + \kappa(t), \quad (1)$$

где $\xi(t)$ – необратимая составляющая, которая определяется в основном изико-химическими процессами старения и износа СИ; $\eta(t)$ – обратимая составляющая, которая определяется нестабильностью внутренних и внешних воздействующих факторов; $\kappa(t)$ – составляющая, определяемая огрешностью конструкции СИ и погрешностью измерения; $\xi(t)$, $\eta(t)$, $\kappa(t)$ – некоторые временные случайные процессы.

Преобладание той или иной составляющей определяет характер изменения $Y(t)$. Очевидно, составляющие $\eta(t)$ и $\kappa(t)$ вносят много случайного поведение $Y(t)$, что затрудняет определение и оценку тенденции изменения $Y(t)$, которая определяется составляющей $\xi(t)$. Таким образом, в случае $\xi(t) \gg [\eta(t) + \kappa(t)]$ закономерность изменения $Y(t)$ можно оценить методами аналитического прогнозирования. Для метеорологических И в ряде случаев составляющие соизмеримы или даже $[\eta(t) + \kappa(t)] > \xi(t)$. Очевидно, что в этом случае необходим статистический анализ случайных процессов $Y(t)$ и больший эффект достигается при вероятностном решении задачи. На процесс естественного изменения во времени погрешности $\gamma(t)$ средств измерения накладывается процесс целенаправленного правления этим параметром при их метеорологическом обслуживании. учетом процесса обслуживания, проверок (ремонтов), профилактик СИ при их эксплуатации случайный нестационарный процесс изменения огрешности $Y(t)$ средств измерения можно представить в следующем иде:

$$Y(t) = \xi(t) + \eta(t) + \kappa(t) - W_s(\bar{x}_0), \quad s = \overline{1, k}, \quad (2)$$

где

$$W_s(\bar{x}_s) = \delta(x_s)[Y(t)] + \xi\sigma_s(t)]$$

функция восстановления, при отсутствии коррекции состояния СИ
 $= 0$ при отсутствии коррекции состояния СИ при обслуживании s ,
 $= 1$ при коррекции состояния $(Y(t))$ СИ при обслуживании s ;
 $s = \{x_s^1, x_s^2, x_s^3, \dots, x_s^n\}$ – вектор периодичности обслуживания (МПИ, межремонтные, межпрофилактические интервалы); $s = \overline{1, k}$ – вектор метрологического обслуживания СИ (проверка, ремонт, профилактика и т. д.); $s[Y(t)]$ – систематическая составляющая коррекции (восстановления) состояния СИ, зависящая от величины $Y(t)$ и качества обслуживания s ; $\sigma_s(t)$ – случайная составляющая коррекции (восстановления) состояния СИ при обслуживании s , зависящая от случайной погрешности коррекции состояния $\sigma_s(t)$ обслуживания s ; ξ – случайная величина.

Знак минус перед функцией восстановления $W_s(\bar{x}_s)$ является условным и показывает обратную направленность восстановления СИ при

обслуживании s . С учетом составляющих зависимостей (1), (2) перейдем к анализу влияния каждой из них на метрологическую надежность конкретных типов метеорологических СИ.

Рассматриваемые при анализе метрологической надежности метрологические отказы заключаются прежде всего в превышении погрешности $Y(t)$ установленных пределов допускаемой основной погрешности.

Общее воздействие климатических факторов на надежность СИ известно [2], что позволяет непосредственно перейти к общему анализу физико-химических процессов, вызывающих метрологические отказы метеорологических СИ. Любые СИ могут характеризоваться некоторым набором метрологических параметров. Если каждый параметр СИ рассматривать как одну из координат n -мерного пространства, то состояние СИ в любой момент времени может быть представлено точкой в этом пространстве. Совокупность всех точек, для которых СИ выполняет свои функции, образует область работоспособности. В процессе эксплуатации СИ имеет место изменение метрологических параметров, которые можно представить в виде суперпозиции следующих развивающихся случайных процессов: $\xi(t)$, $\eta(t)$, $\kappa(t)$, $(W_s(t), s = \overline{1, n})$.

В результате воздействия указанных выше процессов происходит изменение метрологических параметров (погрешности СИ) и рабочая точка перемещается внутри области работоспособности.

В результате воздействия $\xi(t)$ происходит медленный монотонный дрейф рабочей точки внутри области работоспособности вызывающий постепенные метрологические отказы, а флуктуационные колебания формируемые $\eta(t)$, вызывают немонотонный дрейф рабочей точки внутри области работоспособности.

Как известно [11], изменение погрешности $\xi(t)$ для метеорологических СИ в большинстве случаев корректируется при проверке введением поправок, что нарушает монотонность дрейфа рабочей точки и вызывает зависимость состояний СИ от „истории” коррекций погрешностей в прошлом, что важно для обоснования приемлемых моделей процесса $Y(t)$.

Метеорологические СИ эксплуатируются в условиях быстро меняющейся агрессивности внешней среды, что вызывает значительное преобладание обратимой составляющей погрешности СИ над необратимой $\eta(t) \gg \xi(t)$, т. е. изменение внешних условий значительно сказывается на изменении состояния СИ. Вследствие этого при приближении достаточно близко рабочей точки средства измерения ($Y(t)$) к границе области работоспособности флуктуационные колебания $\eta(t)$ оказывают значительное влияние на интенсивность особого вида обратимых (самоустраняющихся) метрологических отказов – сбоев. Это приводит к появлению последствия в потоке указанного выше типа метрологических отказов (сбоев). В результате чего интенсивность сбоев становится случайной величиной зависящей от истории влияния изменения внешних условий [11]. В этом случае поток метрологических отказов значительно отличается от простейшего потока, следовательно, модели надежности без последствии (марковские, полумарковские, регенерирующие, пуассоновские и т. п. непригодны для метеорологических СИ, что очень важно для выбор

модели метрологической надежности. Отмеченный факт имеет важное значение для разработки моделей метрологических отказов СИ и, как известно, подтверждается конкретным анализом процессов, вызывающих отказы для различных типов метеорологических СИ в ряде работ автора [1, 4–14].

Кроме того, из-за наличия погрешностей при восстановлении метрологических параметров СИ возникают скачкообразные перемещения рабочей точки средств измерения ($Y(t)$), увеличивающие немонотонность дрейфа рабочей точки СИ внутри области работоспособности. Следовательно в некоторых случаях, описанных выше, возникают метрологические отказы, потоки которых обладают последствием. Таким образом, для метеорологических СИ характерным является наличие в общем случае немонотонного случайного процесса дрейфа погрешности $Y(t)$, обладающего ярко выраженным последствием, что является важным выводом, который позволяет выделить класс моделей случайных процессов, приемлемых для построения теоретически достоверных моделей метрологической надежности. Как известно из ряда работ автора, указанным выше свойством обладают укрупненные случайные процессы немарковского типа, модели которых, описывающие процессы изменения надежности как восстанавливаемых, так и невосстанавливаемых СИ, приведены в известных работах автора [1, 6, 8, 12, 14]. Так, например, на основе укрупнения множества типов отказов СИ в работе автора [13] получена универсальная модель укрупненного случайного процесса изменения надежности невосстанавливаемых СИ, задаваемая σ -алгеброй F пространства состояний вида

$$\{s_i^N\} = R \cup m \cup SB \cup Q \quad (3)$$

$$s_i \cap s_j = \emptyset \quad \text{для всех } i, j = 1, 2, 3, 4 \text{ при } i \neq j,$$

где R – укрупненное состояние работоспособности СИ, m – укрупненное состояние необратимого метрологического отказа СИ, SB – укрупненное состояние обратимого метрологического отказа типа сбоя, Q – укрупненное состояние явного (функционального) отказа СИ.

Вероятностная модель укрупненного случайного процесса изменения надежности, реализованная в виде ориентированного вероятностного графа, приведена на рис. 2. Матрица переходов укрупненных состояний

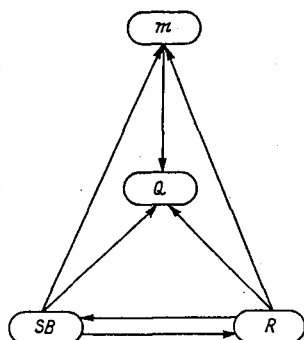


Рис. 2. Вероятностная модель укрупненного случайного процесса изменения надежности средств измерений.

Таблица 1

Исходное состояние	Конечное состояние			
	<i>R</i>	<i>m</i>	<i>SB</i>	<i>Q</i>
<i>R</i>		*	*	*
<i>m</i>				*
<i>SB</i>	*	*		*
<i>Q</i>				

модели вида (3) приведена в табл. 1.

Для восстанавливаемых СИ универсальная модель надежности строится на основе свертки двух укрупненных случайных процессов: процесса изменения надежности (рис. 2) и процесса метрологического и технического обслуживания.

В зависимости от существующих схем метрологического и технического обслуживания модель изменения надежности может модифицироваться, однако в любом случае процесс изменения надежности вида (3) сохраняется. Например, для описания процесса реального функционирования СИ при выпуске их из производства использована модель, задаваемая разбиением надежности следующего вида:

$$F = \{s_i\} = R \cup m \cup SB \cup Q \cup PP \cup REM \cup H \cup T, \quad (4)$$

$$s_i \cap s_j = \emptyset \text{ для всех } i, j = \overline{1, 8} \text{ при } i \neq j,$$

где PP – укрупненное состояние первичной поверки СИ на заводе-изготовителе, REM – укрупненное состояние ремонта СИ на заводе-изготовителе, T – укрупненное состояние транспортировки СИ, H – укрупненное состояние хранения СИ.

В общем случае число укрупненных состояний вероятностных моделей вида (3), (4) может быть при необходимости увеличено путем разбиения указанных укрупненных состояний на подмножества состояний, детализирующих случайный процесс формирования исходных укрупненных состояний. Например, состояние необратимого метрологического отказа (*m*) может быть детализировано на отказ при функционировании (*m_f*) или при простое (*m_p*), или при транспортировании и т. п., включая все возможные состояния процесса обслуживания СИ. При этом степень „вложения” подмножеств состояний друг в друга ограничивается их наблюдаемостью (возможностью фиксации), что является принципиальным положением для построения алгоритмических моделей вероятностного типа.

Для реализации подобных моделей автором разработано уже достаточно много специализированных комплексов и систем программного обеспечения, а также технических моделей узлов сетей для создания систем любой сложности [1, 6, 12, 14]. Поэтому применение модели укрупненных случайных процессов для исследования надежности СИ представ-

яет одно из современных направлений в теории метрологической надежности. Для практической реализации указанного направления кроме программных и технических разработок необходимы модели отказов СИ, вероятностные модели укрупненных случайных процессов изменения надежности эксплуатации СИ, они разработаны автором [13, 14]. Например, для метеорологических СИ модели наработки до обратимых и необратимых метрологических отказов, как правило, описываются лог-нормальным законом, усеченно-нормальным и распределением Вейбулла.

В некоторых случаях на завершающем этапе эксплуатации СИ, когда ресурс СИ исчерпан, могут наблюдаться распределения наработки до метрологического отказа, близкие к равномерному закону [11]. В общем виде, как известно [13], эволюцию моделей наработки до метрологического отказа для метеорологических СИ можно представить в виде свертки указанных типов законов распределения, последовательно доминирующих в определенной очередности, а именно: на начальном этапе эксплуатации (приработке) – лог-нормальный закон, на этапе нормального функционирования – усеченно-нормальный, на этапе износа и старения – распределение Вейбулла и на заключительном этапе – равномерное распределение. Для явных функциональных отказов метеорологических СИ наблюдается экспоненциальный закон наработки до отказа. Оценки редней наработки до метрологических и явных отказов основных типов метеорологических СИ приведены в табл. 2.

Исследование [14] типов законов распределения времени наработки СИ до поверки, профилактики, регулировки, хранения, транспортирования показало, что для метеорологических СИ в целом соблюдается усеченно-нормальный закон распределения уплотненного типа и лишь только для распределения времени наработки до ремонта соблюдается экспоненциальный закон. Объясняется этот факт существующей в настоящее время стратегией эксплуатации СИ, а именно ремонт СИ проводится, как правило, после их явного отказа, а во всех остальных случаях – регулировка и профилактика. Конкретные параметры законов распределения времени до переходов в укрупненные состояния процесса обслуживания известны [1, 2, 4–9, 11–14] и легко оцениваются по статистическим данным конкретных подразделений поверки и ремонта приборов с помощью специализированных комплексов программ [6, 14].

Для автоматизированного анализа состояния парка метеорологических СИ, управления их надежностью, процессом эксплуатации в Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова разработана специализованная система управления метрологическим обеспечением измерений УГМ. Первая версия указанной выше системы сдана в отраслевой фонд алгоритмов и программ (ОФАП) Госкомгидромета СССР в 1987 г. Для решения наиболее часто встречающихся в практике задач исследования и прогнозирования надежности и оптимального управления состоянием парка СИ в ГГО разработана и опробована для метеорологических СИ система программного обеспечения [14], включающая в себя 5 комплексов программ. Система реализована на ЭВМ типа ЕС-1061, имеет четырех-

Таблица 2
Показатели надежности метеорологических средств
измерений

Тип СИ	Наработка до отказа			Примечание
	метеорологического		явного	
	МО	СКО	МО	
Метеорологические СИ, эксплуатируемые на наземной сети				
Образцовые барометры типа КР	11,58	5,99	6,59	Годы
Барометры типа:				
ИР	7,07	4,38	4,20	"
СР-А, СР-Б	9,88	5,37	6,78	"
М-67, М-98	3,60	1,36	3,33	"
Манометры типа МБП	9,25	3,36	5,50	"
Барометры типа БАММ-1	2,93	1,32	2,06	"
Датчики давления:				
станции КРАМС	3,33	1,35	2,07	"
станции АРМС	2,56	1,06	2,01	"
Термометры типа:				
ТМ-1	6,42	5,00	6,02	"
ТМ-2	5,00	3,13	4,28	"
ТМ-3	4,80	3,26	5,21	"
ТМ-4	5,67	2,37	4,65	"
ТМ-5	3,89	4,37	4,80	"
ТМ-6	6,13	3,77	5,38	"
ТМ-7	6,60	2,65	4,30	"
ТМ-8	6,75	3,21	5,21	"
ТМ-9	3,15	1,92	5,00	Годы
ТМ-10	6,50	4,95	6,36	"
Анемометры типа:				
МС-13	3,57	1,26	1,01	Годы, скорость 1—15 м/с
	2,47	0,83	1,01	То же, 15—20 м/с
М-47	3,27	0,84	3,41	" 1—20 м/с
	1,91	0,40	3,41	" 20—30 м/с
Анеморумбометры типа:				
М-63, М-63М,	3,20	0,97	1,82	" 1—10 м/с
М-63М1	2,83	0,77		" 10—15 м/с
	2,29	0,59		" 15—20 м/с
Датчики ветра:				
станции М-49	3,21	0,97	3,40	" 1—20 м/с
	2,39	0,51		" 20—30 м/с
станции М-107	2,79	0,83	2,43	" 1—20 м/с
Гигрометры типа М-19	0,98	0,45	2,66	Годы
Гигрографы	1,18	0,58	3,25	"
Психрометры типа:				
М-34	4,18	1,39	2,09	"
МВ-4М	1,97	0,41	1,10	"

Продолжение табл. 2

Тип СИ	Наработка до отказа			Примечание
	метрологического явного			
	МО	СКО	МО	
Регистратор дальности видимости типа РДВ-3	2,19	0,85	2,30	"
Измеритель высоты облаков типа ИВО-1М	1,04	0,36	0,88	"
Актинометры типа М-3	27,60	24,88	20,90	Наработка до первого метрологического от- каза, мес.
	17,34	16,42		Наработка до второго метрологического от- каза, мес.
Балансомеры типа М-10-М	12,0	13,0	16,46	
Головки пиранометров типа М-115-М	11,20	12,16	20,43	Наработка до первого метрологического от- каза, мес.
	13,26	13,53		Наработка до второго метрологического от- каза, мес.
	9,45	8,44		Наработка до третьего метрологического от- каза, мес.
Плuviографы типа П-2			9,31	Годы
Осадкомеры типа:				
О-1			10,61	"
М-70			4,78	"
Метеорологические СИ, эксплуатируемые на НИС				
Анеморумбометры типа М-63М1	19,14	9,50	35,88	Мес
Анеометры типа:				
М-92	14,47	7,24	31,20	"
МС-13	21,60	7,80	35,04	"
Барометры типа М-67	22,24	13,83	22,20	"
Датчик давления -321	26,21	5,60	24,05	"
Датчик направления и скорости ветра MIDAS-321	24,25	12,36	31,44	"
Психрометры типа МВ-4М	10,66	5,41	10,68	"
Датчик влажности станции MIDAS-321	7,0	4,03	12,01	"
Пиранометры типа:				
М-115-М	16,01	7,62	18,02	"
М-80	16,68	7,86	18,00	"
Балансомеры типа М-10-М	17,50	7,68	12,00	"
Актинометры типа АТ-50	24,03	12,04	32,76	"

Тип СИ	Наработка до отказа			Примечание
	метрологического		явного	
	МО	СКО		
Альбедометры типа СМ-7 станции MIDAS-321	16,02	8,01	18,01	Мес
Пиранометры типа СМ-7 станции MIDAS-321	14,23	5,60	17,95	”
Балансомеры типа СМ-7 станции MIDAS-321	17,10	8,54	18,01	”
Датчик температуры станции MIDAS-321	21,82	7,50	24,05	”
Измеритель высоты облаков типа ИВО-1М	10,50	7,05	12,68	”
Датчик электропроводности воды типа М6500 станции MIDAS-321	12,05	6,12	4,12	”

областную оверлейную структуру и объем памяти 320 кбайт. Система позволяет провести достаточно полный цикл исследования метрологической надежности СИ на этапах испытаний, выпуска их из производства и эксплуатации.

Таким образом, для большинства типов метеорологических СИ решены основные задачи надежности, создана теоретическая и экспериментальная базы теории метрологической надежности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. с. 1254500 (СССР). Модель узла сети для исследования систем массового обслуживания /В. Ю. Окоренков. — Заявл. 10.07.84. Опубл. 30.08.86. — В кн.: Свод изобр. СССР, 1986, вып. 32.
2. Буловский П. И., Зайденберг М. Г. Надежность приборов систем управления. — Л.: Машиностроение, 1975. — 328 с.
3. Меламедов И. М. Физические основы надежности. — Л.: Энергия, 1970. — 152 с.
4. Окоренков В. Ю. Исследование метрологической надежности средств измерений скорости воздушного потока. — Труды ГГО, 1985, вып. 491.
5. Окоренков В. Ю. Исследования по обоснованию межповерочных интервалов для метеорологических приборов. — Труды ГГО, 1981, вып. 452, с. 72—99.
6. Окоренков В. Ю., Буроченко Т. А. Система моделирования функционирования парка метеорологических средств измерений (комплекс программ). — ОФАП Госкомгидромета ВЦ ВНИИГМИ—МЦД, 1987, инв. № Ж 051051086.
7. Окоренков В. Ю. Комплексный метод исследования метрологической надежности средств измерений. — Труды ГГО, 1982, вып. 465, с. 65—97.
8. Окоренков В. Ю. Новый подход к решению многоцелевых задач оптимального управления и прогнозирования метрологической надежности средств измерений. — Труды ГГО, 1985, вып. 476, с. 10—24.

9. Окоренков В. Ю. Оптимальные стратегии управления метрологической надежностью метеорологических средств измерений и их практическое применение. — Труды ГГО, 1982, вып. 465, с. 3—14.

10. Окоренков В. Ю. Повышение метрологической надежности метеорологических средств измерений. — Труды ГГО, 1982, вып. 465, с. 101—107.

11. Окоренков В. Ю. Разработка и обоснование теоретических моделей процессов, определяющих изменение метрологической надежности метеорологических средств измерений. — Труды ГГО, 1985, вып. 476, с. 24—40.

12. Окоренков В. Ю., Фатеев Н. П. Методика расчета оптимальных межповерочных интервалов с использованием ЭВМ для метеорологических средств измерений. — Труды ГГО, 1986, вып. 510.

13. Окоренков В. Ю. Численный прогноз и оптимальное управление метрологической надежностью средств измерений. — Труды ГГО, 1985, вып. 476, с. 40—66.

14. Окоренков В. Ю. Численный прогноз и оптимальное управление метрологической надежностью средств измерений (комплекс программ). — ОФАП Госкомгидромета. ВЦ ВНИИГМИ—МЦД, 1985, инв. № Ж 051050923.

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКИМ ОБЕСПЕЧЕНИЕМ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

В настоящее время как в СССР, так и за рубежом разработано достаточно много автоматизированных систем по организации метрологического обслуживания средств измерений (СИ) и управлению ими. Как показал анализ существующих разработок [1], известные системы решают комплексы задач по обеспечению автоматизации метрологического обслуживания СИ, и не решают главной задачи метрологического обеспечения – оптимального управления процессом эксплуатации парка СИ, без решения которой невозможно достижение требуемой метрологической надежности СИ, высокого качества измерительной информации. В связи с этим возникает необходимость решения специального класса многокритериальных задач оптимального управления процессом эксплуатации парка метеорологических СИ, который насчитывает более 800 тыс. приборов. Сложность и большая размерность указанного класса задач являются основными трудностями разработки систем управления метрологическим состоянием парка СИ.

Для решения указанной выше задачи в Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова разработано несколько специализированных систем: „Численный прогноз и оптимальное управление метрологической надежностью СИ (GPSR)“, „Система моделирования функционирования парка метеорологических СИ (SIMENS-F)“, „Автоматизированная система управления, контроля метрологической надежности парка средств измерений (комплекс программ)“ [5]. Создание указанных систем позволило решить проблему разработки более общей автоматизированной системы управления состоянием парка метеорологических СИ (ASUMO). Математическую постановку „некорректной“ многоцелевой задачи оптимального управления состоянием парка СИ, решаемую системой, можно представить в следующем виде.

Пусть в процессе реального функционирования многомерное пространство состояний парка СИ разбивается на счетное число (d) подпространств, взаимообусловленные переходы состояний которых образуют вектор состояний эксплуатируемых СИ. Состояние парка СИ в этом случае можно характеризовать множеством функций вида

$$\alpha_{s_i}(t) = \frac{n_{s_i}(t, \bar{s}_i, \gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_{29})}{N(t)}, \quad (1)$$

$$\bar{s}_i \in \Omega_i$$

где $i = \overline{1, d}$; d – множество одновременно анализируемых в момент времени t пространств Ω_i состояний парка СИ; n_{s_i} – количество СИ, находящихся в эксплуатации и принадлежащих в момент времени t подмно-

к-ству состояний s i -го пространства состояний СИ; $N(t)$ – общее количество СИ, находящихся в эксплуатации в момент времени t ; $\{s_i\} i = 1, d$ – случайные векторы укрупненных состояний СИ; γ_1 – множество значений дрейфа за предыдущий межповерочный интервал (МПИ) систематической погрешности парка СИ на момент времени t ; γ_2 – множество значений дрейфа случайной погрешности парка СИ на момент времени t ; γ_3 – множество значений календарных дат выпуска СИ из производства на момент времени t ; γ_4, γ_5 – множества значений календарных дат предпоследних проверок СИ на момент времени t ; γ_6, γ_7 – множества значений календарных дат предпоследнего и последнего ремонта СИ на момент времени t ; γ_8, γ_9 – множества значений календарных дат предпоследней и последней профилактики СИ на момент времени t ; $\gamma_{10}, \gamma_{11}, \gamma_{12}$ – множества значений количеств соответственно проверок, ремонтов, профилактики парка СИ, проведенных на момент времени t ; $\gamma_{13}, \gamma_{14}, \gamma_{15}, \gamma_{16}$ – стоимость соответственно проверки, ремонта, профилактики, самого СИ; γ_{17}, γ_{18} – пределы допускаемых случайной и систематической погрешностей для типа СИ; γ_{19}, γ_{20} – минимальное и максимальное значения случайной погрешности для типа СИ; γ_{21}, γ_{22} – среднее значение наработки до явного отказа СИ и ее среднее квадратическое отклонение; $\gamma_{23}, \gamma_{24}, \gamma_{25}$ – межповерочный, межремонтный и межпрофилактический интервалы для типа СИ; $\gamma_{26}, \gamma_{27}, \gamma_{28}$ – допускаемые доли СИ, находящихся в состоянии проверки, ремонта, профилактики в момент времени t ; γ_{29} – количество явно отказавших СИ на момент времени t . Пусть по результатам эксплуатации парка СИ заданы $\{N(t), \gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_{29}\}$.

Необходимо провести пространственно-временной анализ состояния парка СИ и определить:

1. Вектор укрупненных состояний в виде:

$$\{s_i \in \Omega_i\} \quad i = 1, 3,$$

где

$$\bar{s}_{i=1} = \{\bar{R}, \bar{m}, \bar{POV}, \bar{REM}, \bar{PROF}, \bar{WPOV}\}, \quad (2)$$

$R = \{1, L_2, \dots, L_N\}$ – вектор номеров СИ, находящихся в состоянии работоспособности в момент времени t ; по аналогии $\bar{m}, \bar{POV}, \bar{REM}, \bar{PROF}, \bar{WPOV}$ – векторы номеров СИ, находящихся соответственно в состояниях метрологического отказа (m), проверки (POV), ремонта (REM), профилактики ($PROF$), повторной проверки ($WPOV$);

$$\bar{s}_{i=1} = \{\bar{RF}, \bar{NRF}, \bar{R}_m, \bar{NR}_m\}, \quad (3)$$

– векторы номеров СИ, находящихся в состояниях, обеспечивающих запас (на будущие МПИ) функциональной надежности (RF), не обеспечивающих запаса функциональной надежности (NRF), обеспечивающих запас метрологической надежности ($\bar{R}_m$), не обеспечивающих запас метрологической надежности ($\bar{NR}_m$) СИ соответственно;

$$\bar{s}_{i=3} = \{\bar{ST}, \bar{NST}\}, \quad (4)$$

– векторы номеров СИ, находящихся в стабильном (ST) и нестабильном (NST) состояниях соответственно.

2. Оценки показателей качества функционирования парка СИ для всех $\{s_i \in \Omega_i\} \quad i = 1, 3$.

3. По векторам укрупненных состояний $\bar{s}_1(t), \bar{s}_2(t)$, а также по ограничениям на допустимый срок эксплуатации СИ (DTSROC) и на предельную стоимость (γ_{16}) эксплуатации СИ осуществить

а) выбор наиболее эффективного управляющего воздействия поверки (POV), ремонта (REM), профилактики (PROF), замены (SPIS), повторной поверки (WPOV) на текущее и прогнозируемое (на МПИ) состояния каждого СИ, входящего в парк;

б) оптимальное планирование работ по метрологическому и техническому обслуживанию парка СИ на любое заданное время и сформировать оптимальные планы поверки ($POV(t + \Delta t)$), ремонта ($REM(t + \Delta t_2)$), профилактики ($PROF(t + \Delta t_3)$), внеочередной поверки ($WPOV(t + \Delta t_4)$) и списания ($SPIS(t + \Delta t_5)$), обеспечивающие выполнение следующей системы целевых условий:

$$\max \{\alpha_{s=R}(t + \Delta t)\}, \quad (5)$$

$$\min \{\alpha_{s=m}(t + \Delta t)\}, \quad (6)$$

если

$$[\gamma_{13}(t + \Delta t) + \gamma_{14}(t + \Delta t) + \gamma_{15}(t + \Delta t)] \leq \gamma_{16}. \quad (7)$$

Из выражения (1) легко выводятся основные критерии качества функционирования СИ: $\alpha_{s=R}(t)$ – функция готовности парка СИ (ГОСТ 18 322 – 78 „Система технического обслуживания и ремонта техники Термины и определения”); $\alpha_{s=m}(t)$ – функция метрологической неготовности парка СИ; $\alpha_{s=RF}(t)$ – функция резерва технического ресурса (запаса) парка СИ; $\alpha_{s=Rm}(t)$ – функция резерва метрологического ресурса (запаса) парка СИ; $\alpha_{s=ST}(t)$ – функция стабильности систематической погрешности парка СИ; $\alpha_{s=POV}(t)$, $\alpha_{s=REM}(t)$, $\alpha_{s=PROF}(t)$, $\alpha_{s=SPIS}(t)$ – функции метрологического и технического обслуживания парка СИ.

Анализ и прогнозирование основных критериев качества функционирования парка СИ позволяют реализовать оптимальное управление метрологической надежностью СИ в виде планов метрологического обслуживания СИ и целевых рекомендаций по управлению их состоянием. Решение указанной выше задачи реализуется системой „ASUMO” поэтапно.

Система предназначена для оптимального управления состоянием парка метеорологических СИ. Система „ASUMO” является системой искусственного интеллекта, которая на основе своих внутренних ресурсов может приспосабливаться к возникшей внешней ситуации состояния парка СИ, определять взаимосвязь между различными факторами, характеризующими эту ситуацию, их вес и роль в формировании нужного состояния парка СИ; на основе обработки заданной информации вырабатывать набор оптимальных решений по управлению метрологическим и техническим обеспечением СИ.

Объектом управления „ASUMO” является парк средств измерений УГМ (организации, ведомства), а также службы, связанные с эксплуатацией и обслуживанием СИ. В функционировании системы участвуют главный метролог УГМ (организации, ведомства), служба средств измерений, сетевые (территориальные) организации, отдел материально-технического снабжения, отдел поверки измерительной техники, лаборатории государственного надзора за стандартами и измерительной техникой Госстандарта СССР.

Система автоматизирует следующие функции управления:

- планирование работ по метрологическому и техническому обслуживанию парка СИ (формирование графиков поверки, ремонта, профилактики, списания);

- количественную оценку основных показателей качества функционирования парка СИ;

- анализ и прогнозирование резервов метрологической и функциональной надежности СИ;

- поиск, контроль и анализ причин возникновения метрологических отказов;

- контроль дрейфа во времени систематической и случайной составляющих основной погрешности СИ;

- контроль принятия решения о необходимости коррекции дрейфа систематической составляющей основной погрешности СИ;

- прогнозирование систематической и случайной составляющих основной погрешности СИ;

- контроль соблюдения межповерочных, межремонтных, межпрофилактических интервалов СИ;

- контроль квалификации поверителей;

- выбор оптимального управляющего воздействия (поверка, ремонт, замена, повторная поверка, профилактика) на текущее состояние СИ;

- формирование целевых рекомендаций по управлению состоянием парка СИ;

- постоянное слежение за метрологическим состоянием и местонахождением каждого СИ в УГМ;

- контроль за укомплектованностью сетевых организаций необходимыми СИ.

Основной целью создания системы „ASUMO” является автоматизация анализа и управления состоянием парка СИ на основе его метрологического и технического обслуживания, а также автоматизация контроля и учета использования СИ. В результате должны быть обеспечены: требуемая надежность в целом парка СИ; повышение оперативности, качества и эффективности метрологического обслуживания СИ; повышение производительности и эффективности труда метрологических и ремонтных служб УГМ.

По характеру использования система „ASUMO” не изменяет существующую структуру управления УГМ (организации) и является интеллектуальным элементом управления, обеспечивающим выбор оптимального

плана действий по метрологическому и техническому обслуживанию парка СИ.

Функциональная структура системы „ASUMO” включает три главных компонента: модель функционирования парка СИ; функциональные программы, позволяющие на основе использования модели парка СИ и текущих данных оценить складывающуюся ситуацию с состоянием парка СИ; функциональные блоки планирования и контроля, позволяющие выбрать желаемый план действий по метрологическому и техническому обслуживанию парка СИ.

Система включает в себя следующие подсистемы:

контроля и учета СИ УГМ;

анализа состояния парка СИ;

прогнозирования метрологической надежности СИ;

выбора оптимального управляющего воздействия на состояние СИ;

расчета оптимального индивидуального межповерочного интервала СИ;

обнаружения метрологических отказов СИ;

планирования работ по метрологическому и техническому обслуживанию парка СИ,

а также базу знаний системы, базу данных системы.

Все подсистемы взаимосвязаны на едином модульном принципе и объединены одним головным модулем, предоставляющим пользователю выбор решения определенных классов задач, исходя из имеющейся информации о состоянии СИ.

Подсистема контроля и учета СИ обеспечивает следующие функции: контроль за состоянием метрологических характеристик и местонахождением СИ; контроль за укомплектованностью сетевых организаций необходимыми СИ; учет СИ и контроль их использования; сбор и накопление информации о состоянии парка СИ, необходимой для обеспечения функционирования системы.

Входным материальным потоком подсистемы контроля и учета СИ являются документы, отражающие использование и обслуживание СИ: приходный акт; акт инвентаризации; акт на списание; извещение о его непригодности к использованию; значения метрологических характеристик в виде систематической и случайной составляющих основной погрешности СИ; неформализованные документы с техническим описанием СИ, неформализованные документы, описывающие сетевые подразделения.

Выходным материальным потоком подсистемы контроля и учета СИ являются: справочная информация по основным метрологическим характеристикам СИ; сведения о ремонте, поверке и профилактике СИ; перечень типов СИ; сведения о размещении СИ; перечень сетевых организаций; сведения о количестве СИ в сетевой организации; сведения о перечне складов СИ; сведения о количестве СИ данного типа на складе; перечень организаций поверки; сведения о фактическом количестве СИ в организации; сведения о переданных СИ за заданный период; сведения о количестве поверок, ремонтов, профилактик для каждого СИ за заданный

период; перечень списанных СИ; дефицит СИ по всем организациям и по каждой из них; сведения о систематической и случайной составляющих основной погрешности СИ, зафиксированных при их поверках.

Подсистема анализа состояния парка СИ обеспечивает решение проблем оценки общего состояния парка СИ в целом и оценку состояния каждого СИ в отдельности в соответствии с реальной моделью функционирования парка СИ. Реальная модель функционирования парка СИ описывает эволюцию двух укрупненных случайных процессов – процесса изменения надежности СИ и процесса эксплуатации и включает 12 укрупненных состояний: работоспособное, метрологического отказа, поверки, ремонта, профилактики, запаса ресурса, отсутствие запаса ресурса, стабильности основной погрешности, нестабильности основной погрешности, запаса метрологической надежности, отсутствия запаса метрологической надежности, явного отказа.

Для оценки состояния каждого СИ подсистема анализа обеспечивает идентификацию текущего состояния модели функционирования парка СИ на основе количественных критериев, определяющих данные состояния, и в первую очередь обеспечивает обнаружение метрологических отказов СИ.

Для оценки общего состояния парка в целом подсистема анализа на основе теории распознавания образов обеспечивает следующие функции: формирование укрупненных состояний парка СИ по множеству наблюдений признаков состояний СИ; построение классификации повреждений состояния парка СИ по каждому классу (укрупненному состоянию), которому соответствует строго определенная рекомендация об объеме ремонтных и поверочных работ по обслуживанию СИ. Классификация повреждений состояния парка СИ включает пять классов укрупненных состояний: повреждения нет, повреждение легкое, умеренное, сильное, разрушительное.

В случае если состояние СИ будет отнесено к классу разрушительного повреждения, то рекомендации по управлению состоянием парка СИ будут заключаться в том, чтобы в течение МПИ заменить все ненадежные и исчерпавшие ресурс СИ. В случае сильного или умеренного повреждения парк СИ нуждается соответственно в капитальном или профилактическом ремонте и послеремонтной поверке СИ. При легком повреждении или его отсутствии сохраняется обычный плановый алгоритм обслуживания парка СИ: плановые поверка, ремонт, профилактика, замена СИ.

Комплексный показатель состояния парка СИ может быть представлен в виде:

$$G_0 = \sum_{i=1}^{12} G_i, \quad (8)$$

$$G_i = \delta_i \times \omega_i, \quad (9)$$

$$\delta_i = \begin{cases} 1 & \text{при } \alpha_{s_i}(t) < \varepsilon_i, \\ 0 & \text{при } \alpha_{s_i}(t) = \varepsilon_i, \\ -1 & \text{при } \alpha_{s_i}(t) > \varepsilon_i, \end{cases} \quad (10)$$

$$\omega_i = \frac{n_{s_i}}{\sum_{i=1}^n n_{s_i}}, \quad (11)$$

$$\alpha_{s_i}(t) = \frac{n_{s_i}(t)}{N(t)}, \quad (12)$$

где $\{\varepsilon_i\}$, $i = 1, 12$ – допуски на критерии состояний $\alpha_{s_i}(t)$; n_{s_i} – количество СИ, находящихся в i -м состоянии (s) в момент опроса системы анализа $N(t)$ – общее количество СИ в парке УГМ.

Система анализа оценивает изменение как общего количественного показателя состояния (G_0) парка СИ за интервал между опросами системы, так и единичных критериев состояния G_i , а также осуществляет прогноз ожидаемого состояния парка СИ на заданное время на основе полиномиальных моделей дрейфа:

$$G_0(t) = \sum_{i=1}^n Z_i t^{i-1}, \quad (13)$$

где Z_i – коэффициенты модели дрейфа,

$$\alpha_i(t) = \sum_{i=1}^n \beta_i t^{i-1} \quad (14)$$

β_i , $i = 1, 12$ – коэффициенты модели дрейфа.

По значению прогнозируемых $G_0(t)$ и $\alpha_{s_i}(t)$ система анализа оценивает возможность достижения требуемого состояния парка СИ на заданный момент времени t .

Подсистема прогнозирования метрологической надежности обеспечивает индивидуальный прогноз параметров закона распределения наработки до первого метрологического отказа для каждого СИ (запас метрологической надежности) на основе результатов их поверки в представляемых в виде значений систематической и случайной составляющих погрешности СИ. В качестве подсистемы использована известная ее реализация „FPM1” [1], входящая в комплекс программ „GPSRP”.

Подсистема расчета оптимального индивидуального межповерочного интервала СИ реализована на основе моделирования укрупненного случайного процесса реального функционирования СИ методом Монте-Карло [3]. В качестве подсистемы использован комплекс программ „NUPOM” [1].

Подсистема выбора управляющего воздействия на текущее состояние СИ обеспечивает выбор оптимального воздействия на состояние СИ в виде ремонта (s_{REM}), поверки (s_{POV}), списания (s_{SPIS}), профилактики (s_{PROF}), повторной поверки (s_{WPOV}), исходя из выработанного ресурса (T_R), прогнозируемой наработки до метрологического отказа (T_M), сум

тарной стоимости обслуживания (C_i) СИ на текущий момент времени, заданных межповерочного, межремонтного и межпрофилактического интервалов ($T_{\text{МПИ}}$, $T_{\text{РЕМ}}$, $T_{\text{ПРОФ}}$), предельного ресурса эксплуатации ($T_{\text{П}}$), предельной стоимости обслуживания ($C_{\text{П}}$) и текущего состояния (s_j) СИ. Подсистема выбора управляющего воздействия на состояние СИ является продукционной системой, реализующей определенный набор правил или продукций следующего вида:

$$s_{j+1} = \begin{cases} S_{\text{POV}} \text{ при } \{T_p < T_{\text{П}}; T_{\text{Н}} \geq T_{\text{МПИ}}; C_i < C_{\text{П}}; t \geq T_{\text{МПИ}}; s_j = s\}, \\ S_{\text{РЕМ}} \text{ при } \{T_R < T_{\text{П}}; T_{\text{Н}} < T_{\text{МПИ}}; C_i < C_{\text{П}}; t \geq T_{\text{РЕМ}}; s_j \neq s\}, \\ \text{или } \{T_R < T_{\text{П}}; C_i < C_{\text{П}}; s_j = s\}; \\ S_{\text{ПРОФ}} \text{ при } \{T_R < T_{\text{П}}; T_{\text{Н}} \leq T_{\text{МПИ}}; C_i < C_{\text{П}}; t \geq T_{\text{ПРОФ}}; s_j = s\}, \\ S_{\text{СПИС}} \text{ при } \{T_R < T_{\text{П}}; T_{\text{Н}} < T_{\text{МПИ}}; C_i > C_{\text{П}}; s_j \neq s\} \\ \text{или } \{T_R > T_{\text{П}}; C_i > C_{\text{П}}; s_j = s\}, \end{cases} \quad (15)$$

где s_j, s_{j+1} ; $S_{\text{POV}}, S_{\text{РЕМ}}, S_{\text{ПРОФ}}, S_{\text{СПИС}}, s$ — состояние СИ текущее, планируемое, проверки, ремонта, профилактики, списания, явного функционального отказа соответственно.

Система выбора управляющего воздействия на текущее состояние СИ учитывает все укрупненные состояния СИ, входящие в реальную модель функционирования.

Подсистема планирования метрологического обеспечения реализует формирование планов проверки, ремонта, профилактики и списания СИ на любое заданное время по каждой организации, эксплуатирующей СИ в соответствии с реальными возможностями поверочных и ремонтных подразделений и в случае необходимости дает рекомендации о конкретном изменении (расширении) их пропускной способности на период планирования. Подсистема должна обеспечивать выполнение системы целевых условий:

$$\alpha_s(t) = \begin{cases} \alpha_{s=\text{POV}}(t) \leq \varepsilon_1, \\ \alpha_{s=\text{РЕМ}}(t) \leq \varepsilon_2, \\ \alpha_{s=\text{ПРОФ}}(t) \leq \varepsilon_3, \\ \alpha_{s=\text{СПИС}}(t) \leq \varepsilon_4, \\ \dots \dots \dots \\ \alpha_s(t) \leq \varepsilon_n, \end{cases} \quad (16)$$

где $\alpha_s(t)$, $s = \overline{1, n}$ — целевые функции качества метрологического и технического обслуживания парка СИ; $\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n$ — ограничения на значения целевых функций качества метрологического и технического обслуживания соответственно, равные возможностям поверочных и ремонтных подразделений, обслуживающих данный парк СИ.

Ограничения $\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n$ задаются пользователями системы „ASUMO”. В

случае невозможности выполнения системы целевых условий (16) для конкретного парка СИ система планирования оценивает, на сколько необходимо изменить пропускную способность подразделений метрологического и технического обслуживания на планируемый период времени.

Подсистема обнаружения метрологических отказов СИ обеспечивает выявление метрологических отказов СИ по результатам их проверки и результатам измерений текущих значений метеорологических параметров.

Выявление необратимых (постепенных) метрологических отказов реализовано в системе на основе текущего контроля изменения во времени систематической и случайной составляющих погрешности СИ и сравнения их с соответствующими им значениями пределов допускаемых погрешностей, заданных техническими условиями.

Выявление обратимых (сбоев) метрологических отказов СИ реализовано в подсистеме на основе контроля статистической однородности временных рядов приращений измеряемых метеорологических параметров с заданной доверительной вероятностью и статистического моделирования дрейфа основной погрешности СИ с учетом реальных условий их эксплуатации. Подсистема реализована на основе ранее разработанных в ГТС комплексов программ: „Численный прогноз и оптимальное управление метрологической надежностью СИ” (программные модули LM, PM).

База знаний системы „ASUMO” является основным блоком системы, обеспечивающим накопление долговременных знаний о метрологических характеристиках парка СИ. В базе знаний системы находятся типовые эксплуатационные характеристики СИ, показатели их надежности, ограничения на значения метрологических характеристик и пропускные способности поверочных и ремонтных подразделений УГМ, типовые модели дрейфа во времени систематической и случайной составляющих погрешности СИ. База знаний системы допускает систематическое обновление базовой информации о состоянии парка СИ в объеме определенной части выходной информации системы. База знаний системы имеет специальный блок пополнения и модернизации, позволяющий дополнять или исключать несовершенные модели или данные. База данных системы представляет собой совокупность управляемых специальной программой файлов записей, групп и элементов и обеспечивает хранение оперативной информации о состоянии парка СИ.

Периодичность выдачи выходной информации системы устанавливается в зависимости от требований базовой по метрологии организации как правило, не реже 1 раза в квартал.

Режим функционирования системы в общем случае может быть как дискретный, так и непрерывный (для подсистемы обнаружения метрологических отказов).

Система „ASUMO” обеспечивает совместимость ее с ранее разработанными системами и комплексами: численный прогноз и оптимальное управление метрологической надежностью СИ „GPSRP”; система моделирования функционирования парка СИ „SIMENS-F”; автоматизированная система управления, контроля метрологической надежности парка СИ.

Система „ASUMO” реализована на основе стандартного оборудования, входящего в комплект ЭВМ типа ЕС и соответствует предъявленным к нему техническим требованиям. Система „ASUMO” обеспечивает сохранность информации о состоянии парка СИ на основе многократного дублирования на магнитной ленте программного и информационного обеспечения системы, а также текущих и архивных данных о состоянии парка СИ.

Внедрение и эксплуатация системы „ASUMO” в УГМ должны обеспечить улучшение основных показателей качества функционирования парка средств измерений УГМ и ее деятельности за счет автоматизации оптимального управления эксплуатацией парка метеорологических СИ в УГМ;

планирования работ по метрологическому и техническому обслуживанию парка СИ;

анализа и прогнозирования резервов метрологической и функциональной надежности СИ;

количественной оценки основных показателей качества функционирования парка СИ;

поиска, контроля и анализа причин возникновения и устранения метрологических отказов СИ;

контроля соблюдения межповерочных и межпрофилактических интервалов СИ;

контроля квалификации поверителей;

контроля дрейфа во времени систематической и случайной составляющих основной погрешности СИ;

анализа систематической и случайной составляющих основной погрешности СИ и принятия решения о необходимости коррекции дрейфа систематической погрешности;

выбора оптимального управляющего воздействия (поверка, ремонт, замена, повторная поверка, профилактика) на текущее состояние СИ;

получения целевых рекомендаций по управлению парком СИ;

рутинных расчетов при формировании графиков поверки, ремонта, профилактики и списания СИ.

Оценка ожидаемой экономической эффективности от внедрения системы „ASUMO” в УГМ была проведена на основе „Методики определения экономической эффективности автоматизированных систем управления предприятиями и производственными объединениями”, утвержденной постановлением ГКНТ Госплана СССР и АН СССР от 6.02.1978 г.

Ожидаемый экономический эффект от внедрения системы составит не менее 100 тыс. руб.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автоматизация метрологического обслуживания средств измерений промышленного предприятия /В. У. Игнаткин, В. В. Крещук, В. И. Кривошук, Н. Н. Грунский, М. А. Якушкин. — М.: Изд-во стандартов, 1988. — 208 с.

2. Антонюк Б. Д. Информационные системы в управлении. — М.: Радио и связь, 1986. — 253 с.

3. Ермаков С. М. Метод Монте-Карло и смежные вопросы. — М.: Наука, 1975. —371 с.
4. Новицкий П. В., Зограф И. А. Оценка погрешностей результатов измерений. — М.: Радио и связь, 1986. —408 с.
5. Окоренков В. Ю., Ахмедов М. З., Вураченко Т. А. Автоматизированная система управления, контроля метрологической надежности парка средств измерений (комплекс программ). — ОФАП Госкомгидромета. ВЦ ВНИИГМИ-МЦД, 1987, инв. № 0240.
6. Окоренков В. Ю., Бурченко Т. А. Система моделирования функционирования парка метеорологических средств измерений (комплекс программ). — ОФАП Госкомгидромета. ВЦ ВНИИГМИ-МЦД, 1987, инв. № 051051086.
7. Окоренков В. Ю. Численный прогноз и оптимальное управление метрологической надежностью средств измерений (комплекс программ). — ОФАП Госкомгидромета. ВЦ ВНИИГМИ-МЦД, 1985, инв. № 051050923.
8. Ягер Р. Р. Нечеткие множества и теория возможностей. Последние достижения. — М.: Радио и связь, 1986. —408 с.

ОБНАРУЖЕНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ОТКАЗОВ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

Одними из основных задач метрологического обеспечения (МО) средств измерений (СИ) являются задачи обнаружения и предупреждения метрологических отказов. Как известно, метрологические отказы СИ возникают под действием как необратимых, так и обратимых физических процессов, изменяющих метрологические характеристики СИ. Поэтому по типу физических процессов, вызывающих метрологические отказы, можно выделить два принципиально различных класса метрологических отказов. К первому классу отказов можно отнести необратимые (постепенные) метрологические отказы, вызванные процессами старения и износа элементов конструкции СИ, а ко второму классу отказов можно отнести обратимые (перемеживающиеся) метрологические отказы типа сбоя, вызванные флуктуациями внешних факторов, влияющих на состояние средств измерения.

Задачу обнаружения метрологических отказов СИ в настоящее время решают, используя три различных подхода. Первый традиционный подход основан на экспериментальных методах обнаружения отказов СИ. Второй подход основан на использовании статистических процедур обнаружения аномальных значений в результатах измерений. Третий подход основан на использовании методов имитационно-вероятностного моделирования процессов дрейфа основной погрешности СИ в условиях эксплуатации.

Использование традиционных методов поверки и аттестации СИ позволяет обнаружить только те отказы, которые возникли и сохранились до момента контроля состояния СИ. Следовательно, обратимые метрологические отказы типа сбоя не могут быть обнаружены, если момент их возникновения не совпадает с моментом контроля.

Основным недостатком традиционных методов обнаружения метрологических отказов метеорологических СИ является невозможность обнаружения их в процессе эксплуатации без проведения поверок или аттестаций.

Эффективность обнаружения метрологических отказов метеорологических СИ этих методов существенно ограничена.

Второй подход к решению задачи обнаружения метрологических отказов основан на использовании статистических процедур по обнаружению аномальных значений в результатах измерений [12].

Обзор работ, посвященный этому направлению [12], показал, что в них практически не содержится конструктивных рекомендаций по применению конкретных методов для реальных ситуаций, наблюдаемых для метеорологических СИ, ввиду того, что:

- 1) измеряемое значение метеорологического элемента нестационарно во времени;
- 2) результаты измерений аномальных выбросов близки к максималь-

ным значениям физической величины;

3) большая степень „загрязненности” анализируемой выборки результатов измерений выбросами (ошибками);

4) на измеряемую физическую величину оказывают влияние внешние факторы, которые также нестационарны во времени;

5) не установлены связи выбросов в результатах измерений с возникновением метрологических отказов СИ.

Так, если эксплуатация СИ представляет собой стационарный случайный процесс, то отказ элементов конструкции СИ наступает, согласно [2], при невыполнении условий $\alpha < Y_i < \beta$.

Среднее число выбросов выходного параметра Y_i за допустимые пределы $[\alpha, \beta]$ основной погрешности или параметр потока перемежающихся метрологических отказов определяется выражением [2]:

$$\omega_i(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{\sigma_{p_i}}{\sigma_{y_i}} \left[\exp \left\{ -\frac{\alpha^2}{2\sigma_{y_i}^2} \right\} + \exp \left\{ -\frac{\beta^2}{2\sigma_{y_i}^2} \right\} \right], \quad (1)$$

где $\sigma_{y_i}^2$ — дисперсия основной погрешности Y_i СИ,

$$\sigma_{p_i}^2 = \frac{d^2}{d\tau^2} R_{y_i}(\tau) \Big|_{\tau=0}, \quad (2)$$

R_{y_i} — корреляционная функция основной погрешности Y_i СИ.

Если φ_j — функция работоспособности СИ по j -му параметру основной погрешности Y_j , а x_i — основная погрешность элементов СИ, то при невыполнении хотя бы одного из неравенств

$$\varphi_j(\{x_i\}) > 0, \quad (j = \overline{1, m}; i = \overline{1, n}) \quad (3)$$

будет соблюдаться перемежающийся метрологический отказ типа сбоя.

Если аргументы $\{x_i\}$ являются стационарными функциями времени, то можно считать, что φ_j складывается из суммы среднего значения функции $\bar{\varphi}_j$ и значения центрированной случайной функции φ_j . Зависимость функции работоспособности φ_j СИ от времени показана на рис. 1.

Если справедлив нормальный закон распределения случайной функции φ_j и отсутствуют корреляционные связи между функциями работоспособности φ_j , то параметр потока перемежающихся отказов типа сбоя определяется выражением [2]

$$\omega = \sum_{j=1}^m \omega_j = \sum_{j=1}^m f_j \cdot \exp \left\{ -\frac{\bar{\varphi}_j^2}{2\sigma_j^2} \right\}, \quad (4)$$

где f_j — среднее квадратическое значение частоты спектра амплитуд φ_j ; σ_j^2 — дисперсия распределения амплитуд функции φ_j .

Другими словами, параметр потока перемежающихся отказов эксплуатируемого СИ будет равен сумме частот выбросов всех его функций работоспособности φ_j или сумме средних чисел выбросов всех параметров Y_i за допустимые пределы.

Средние значения функции φ_j и дисперсии σ_j^2 в формуле (4) опреде-

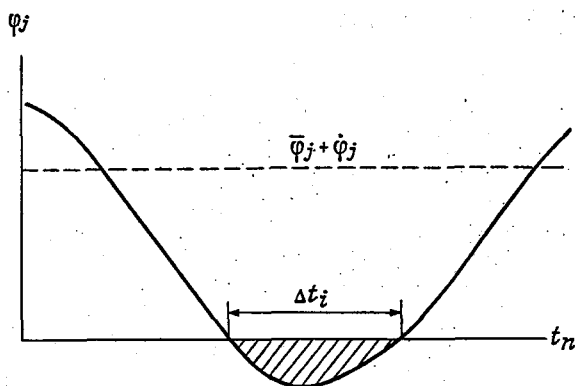


Рис. 1. Зависимость функции работоспособности φ_j от времени t_n (область неработоспособного состояния заштрихована).

ляются обычными способами по случайным изменениям основной погрешности элементов $\{x_i\}$. Среднее квадратическое значение частоты спектра f_j определяется по формуле [2]:

$$f_j = \sqrt{\frac{1}{\sigma_j^2} \int_0^{\infty} f^2 S_j(f) df}, \quad (5)$$

где f – частота флуктуаций основной погрешности СИ; $S_j(f)$ – спектральная плотность φ_j , равная сумме спектральных плотностей основной погрешности элементов СИ.

Отсутствие математических методов обнаружения метрологических отказов типа сбоя в условиях нестационарности как измеряемой величины, так и влияющих на нее факторов не позволяет использовать существующие статистические методы по обнаружению аномальных значений в результатах измерений для выявления метрологических отказов СИ.

Третий подход к решению задачи обнаружения метрологических отказов СИ основан на имитационно-вероятностном моделировании нестационарных процессов дрейфа основной погрешности СИ с учетом реального процесса их эксплуатации [4]. По результатам моделирования решается задача индивидуального прогнозирования наработки до метрологического отказа как при выпуске СИ из производства, так и при их эксплуатации, что в свою очередь позволяет оценить параметры закона распределения наработки до отказа и определить временные границы возникновения отказа с заданной доверительной вероятностью. Известные методы [4–8] имитационно-вероятностного моделирования основаны на использовании информации, полученной по результатам проверок или аттестации СИ. Эти методы позволяют обнаруживать и предупреждать только те метрологические отказы, результат воздействия которых зафиксирован на момент контроля состояния СИ и может быть учтен в

модели дрейфа основной погрешности СИ. Однако далеко не все типы метрологических отказов (например, сбой, вызванный резким изменением внешних факторов в процессе эксплуатации) фиксируются при поверках или аттестациях СИ.

Таким образом, рассмотренные выше подходы к решению задачи обнаружения метрологических отказов СИ имеют существенные ограничения и не позволяют устойчиво обнаруживать и прогнозировать метрологические отказы типа сбоя. Решение этой задачи и является основной целью настоящей работы.

Необходимо отметить, что современной чертой развития метеорологических СИ является непрерывное возрастание доли элементов автоматики и вычислительной техники. Переход на новую элементную базу является прогрессивным, так как позволяет повысить быстродействие, точность, надежность, уменьшить вес и габариты СИ. Однако этот переход имеет и отрицательные последствия, связанные с появлением нового вида метрологических отказов – сбоев.

Под сбоем (в общем случае) понимается событие, заключающееся в кратковременном нарушении работоспособности элемента, вследствие временного изменения его параметров. Восстанавливается работоспособность элементов самопроизвольно, без вмешательства извне. Основными причинами сбоев являются: недостаточная надежность элементов в схеме, обусловленная постепенным или внезапным изменением физических параметров под воздействием процессов разрегулирования флуктуационных колебаний нагрузки, температуры, частоты срабатывания схемы и т. п.; случайные колебания внешних и внутренних факторов (электромагнитные наводки, броски питающего напряжения, несинхронность работы элементов и т. п.), вызывающие кратковременные изменения параметров элементов.

Вероятность появления сбоев в СИ зависит не только от надежности комплектующих элементов, но и в большей степени от принятых схемных и конструктивных решений, а также от качества изготовления метеорологических СИ, которое пока еще недостаточно хорошее. Все это наряду со случайным характером проявления причин сбоев не позволило до настоящего времени разработать универсальные методы оценки надежности по сбоям.

Важной особенностью сбоев является скрытый характер их проявления. Сбои в работе элементов конструкции СИ обнаружить без применения специальной аппаратуры невозможно. Поэтому решение задачи обнаружения и предупреждения всех типов метрологических отказов возможно только на основе создания специальных следящих систем, обеспечивающих постоянный контроль и анализ метрологических характеристик СИ.

В качестве теоретической основы для создания подобных систем обнаружения метрологических отказов предлагается использовать функциональный подход, т. е. анализ последствий влияния метрологических отказов одновременно на результаты измерений и дрейф основной погрешности СИ в сочетании с анализом временной логики причинно-следст-

венных связей нарушений однородности временных рядов измерений и внешних факторов, влияющих на возникновение метрологических отказов.

Изложенному выше подходу можно дать следующее обоснование. Как известно, метрологические отказы являются одной из возможных причин возникновения статистической неоднородности временных рядов измерений. Анализ временной логики нарушения однородности временных рядов в синхронных измерениях внешних факторов, вызывающих метрологические отказы, позволяет проследить временную траекторию причинно-следственных связей возникновения статистической неоднородности временных рядов измерений, т. е. проследить механизм возникновения метрологического отказа. Очевидно, если моменты выбросов в синхронных рядах внешних факторов, вызывающих метрологические отказы, связаны с моментами нарушения статистической однородности измерений контролируемого СИ, возникновение метрологического отказа типа сбоя неслучайно, а следовательно, может быть зафиксировано и предупреждено.

Отсутствие связи между внешними факторами и возникновение статистической неоднородности измерений может свидетельствовать о том, что данный тип отказа вызван не внешними, а внутренними случайными процессами, протекающими в элементах конструкции СИ (старение, износ, разрегулирование). В этом случае моделирование процесса дрейфа основной погрешности СИ по результатам его поверок или аттестаций позволяет определить все необходимые характеристики закона распределения наработки до метрологического отказа, а следовательно, и предупредить его возникновение путем необходимой коррекции результатов измерений. Так как все метрологические отказы связаны с выходом основной погрешности СИ за пределы допуска, совпадение результатов моделирования дрейфа основной погрешности (например, в виде выхода основной погрешности в зону предела допуска) с нарушением однородности временных рядов измерений внешних факторов, вызывающих метрологические отказы, и нарушением однородности временных рядов измерений контролируемого СИ может свидетельствовать о неслучайности возникновения метрологического отказа и, следовательно, его можно предотвратить путем необходимой коррекции или восстановлением результата измерений по смежным измерениям.

Как известно [9], возникновение метрологических отказов СИ вызывает изменение параметров закона распределения систематической и случайной составляющих основной погрешности СИ.

Следовательно, зафиксировав параметры указанных законов распределений для только что поверенного работоспособного СИ, можно контролировать их изменение во времени по результатам моделирования дрейфа основной погрешности, учитывающего изменение как внутренних, так и внешних факторов, динамически вводимых в модель дрейфа по результатам измерений (влияющих факторов).

Математическую постановку задачи обнаружения метрологических отказов внутри межповерочного интервала (МПИ) можно представить

следующим образом.

1. Пусть по результатам не менее двух последних проверок (аттестаций) СИ динамически задается модель дрейфа совокупности метрологических характеристик (МХ) СИ вида:

$$Y(t) = Y_d(t) + Y_K(t) + Y_N(t) + \varepsilon_N(t), \quad (6)$$

$$Y_d(t) = \sum_{i=1}^n \alpha_i t^{i-1}, \quad (7)$$

$$Y_K(t) = \sum_{i=1}^n \beta_i (Z_i(t) - Z_{i0}), \quad (8)$$

где $Y(t)$ – МХ контролируемого СИ в момент t ; $Y_d(t)$ – дрейф $Y(t)$, обусловленный необратимыми случайными процессами (старением и износом элементов конструкции СИ); $Y_K(t)$ – нестационарный случайный процесс, вызванный отклонением значений известных влияющих величин (ВВ) $Z_i(t)$, $i = \overline{1, n}$ от своих средних значений Z_{i0} и динамически вводимых в модель; $Y_N(t)$ – стационарный (в широком смысле) случайный процесс, вызванный флуктуациями неизвестных или неучитываемых ВВ от своих средних значений, а также собственными шумами СИ; $\varepsilon_N(t)$ – случайная по множеству $\{t\}$ погрешность определения $Y(t)$, вызванная погрешностями образцового СИ, измеряющего МХ контролируемого СИ; β_i , $i = \overline{1, n}$ – параметры линейной функции влияния (ФВ) и внешних влияющих факторов, оцениваемые по результатам текущих измерений $\{x_i\}$, $i = \overline{1, n}$; α_i – параметры модели дрейфа МХ, оцениваемые по результатам текущих проверок (аттестаций) СИ.

2. Пусть непосредственно после последней поверки (аттестации) для работоспособного СИ задается эталонная выборка $\{x_i^*\}$, $i = \overline{1, n}$ инновационных добавок измерений контролируемого СИ, отображающая его работоспособное состояние и имеющая распределение $F_3(t)$.

3. Пусть в процессе эксплуатации контролируемого СИ формируются синхронные динамические выборки результатов измерений $\{x_i\}$, $i = \overline{1, n}$ и всех $Z_i(t)$, влияющих на возникновение метрологического отказа факторов $\{Z_k(t)\}$, $i = \overline{1, n}$, $k = \overline{1, \alpha}$. Причем выборка $\{x_i\}$, $i = \overline{1, n}$ имеет текущее во времени распределение $F_p(t)$.

Необходимо определить:

1) временные границы $[t_{\text{н}}, t_{\text{в}}]$ достижения процессом $Y(t)$ области $(\Delta \pm \varepsilon)$, где Δ – предел допускаемой погрешности СИ, ε – подобласть, в которой случайные флуктуации внешних факторов вызывают метрологические отказы СИ;

2) наработку СИ до метрологического отказа в виде момента выхода процессом $Y(t)$ за предел допускаемой погрешности Δ ;

3) наличие или отсутствие с заданной доверительной вероятностью выброса ($x_{\text{вн}}$) в динамической выборке $\{x_i(t)\}$, $i = \overline{1, n}$ и момент его возникновения в виде

$$x_{\text{вн}} = \sum_{i=1}^n d_n S(t_i - t_n^x), \quad (9)$$

$$S(t_i - t_n^x) = \begin{cases} 1 & \text{при } t_i = t_n^x, \\ 0 & \text{при } t_i \neq t_n^x, \end{cases} \quad (10)$$

где d_n — амплитуда n -го выброса; $\{t_n^x\}$ — момент возникновения выброса; $t_n^x = 0$ — выбросов нет;

4) наличие или отсутствие с заданной доверительной вероятностью выбросов ($x_{B,n}$) в динамических выборках $\{Z_i^k(t)\}$ $i = \overline{1, n}$, $k = \overline{1, L}$ и моменты их возникновения $\{t_n^z\}$;

5) возникновение или отсутствие метрологического отказа СИ,

а) вызванного дрейфом необратимых случайных процессов старения и износа элементов конструкции СИ, удовлетворяющего системе целевых условий

$$\begin{cases} Y_d(t) > \Delta, \\ t_n^x \in [t_B, t_B] \text{ при } t_n^x \neq \phi, \\ t_n^z = 0 \text{ при } t_n \leq t_B \neq \phi, \end{cases} \quad (11)$$

что соответствует отсутствию выбросов во всех L динамических выборках внешних влияющих факторов $\{Z_i^k(t)\}$, $i = \overline{1, n}$, $k = \overline{1, L}$ и наличие выброса в динамической выборке $\{x_i\}$, $i = \overline{1, n}$ измерений контролируемого СИ, момент которого включается в границы зоны возможных метрологических отказов, а дрейф метрологических характеристик $Y_d(t)$, обусловленный старением и износом, выходит за пределы допуска;

б) вызванного известными $Y_k(t)$ и неизвестными $Y_N(t)$ отклонениями значений влияющих величин от своих средних значений Z_{i0} , а также собственными шумами СИ и погрешностями образцового СИ, измеряющего МХ контролируемого средства измерения $\varepsilon_N(t)$ и удовлетворяющего системе целевых условий

$$\begin{cases} Y_k(t) + Y_N(t) + \varepsilon_N(t) > \Delta, \\ t_n^x > t_n^z \text{ при } t_n^x \neq \phi \text{ и } t_n^z \neq \phi, \\ F_3 \neq F_p \end{cases} \quad (12)$$

в) вызванного влиянием множества обратимых и необратимых факторов, удовлетворяющих системе целевых условий

$$\begin{cases} Y(t) > \Delta, \\ t_n^x > t_n^z \text{ при } t_n^x \neq \phi \text{ и } t_n^z \neq \phi, \\ F_3 \neq F_p. \end{cases} \quad (13)$$

Отсутствие метрологических отказов соответствует невыполнению системы целевых условий (11)–(13). Выражение $F_3 \neq F_p$ имеет смысл проверки утверждения, что законы распределения изменений в эталонной и текущей выборках различаются. Например, тест-проверка системы целевых условий (13) соответствует следующему плану проверок;

а) дрейф метрологических характеристик $Y(t)$ контролируемого СИ

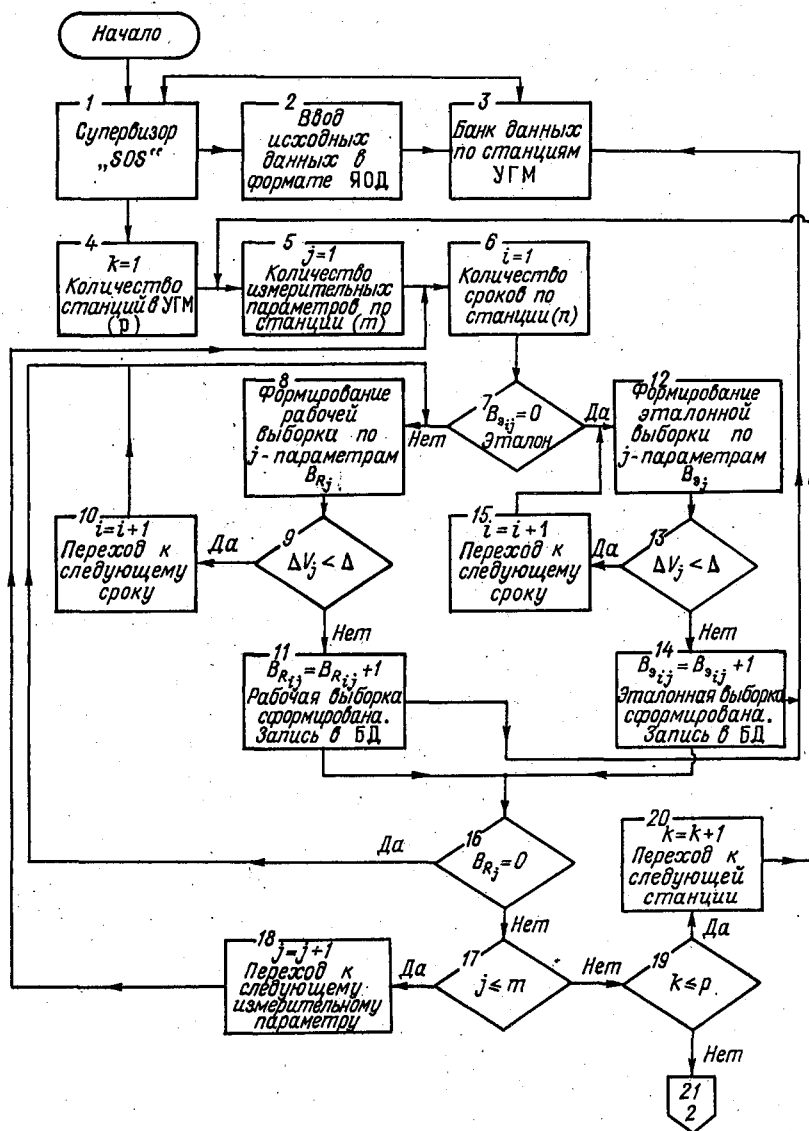
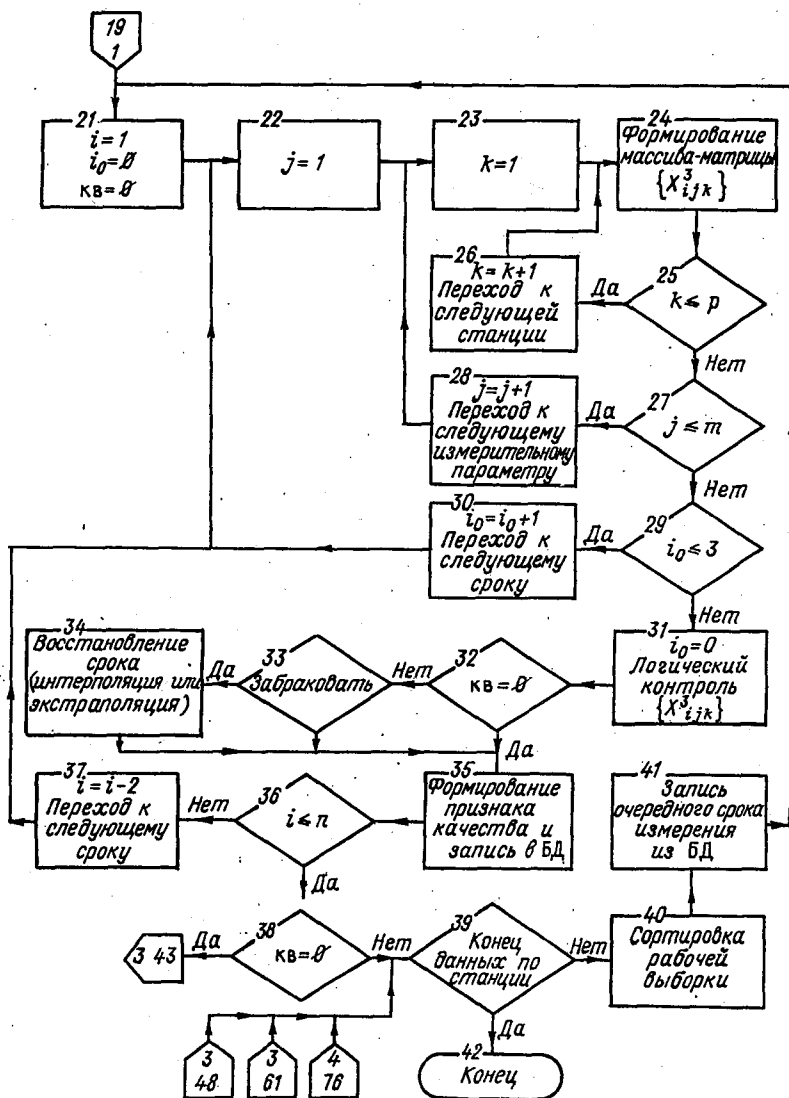


Рис. 2. Функциональная



лок-схема подсистемы „SOS”

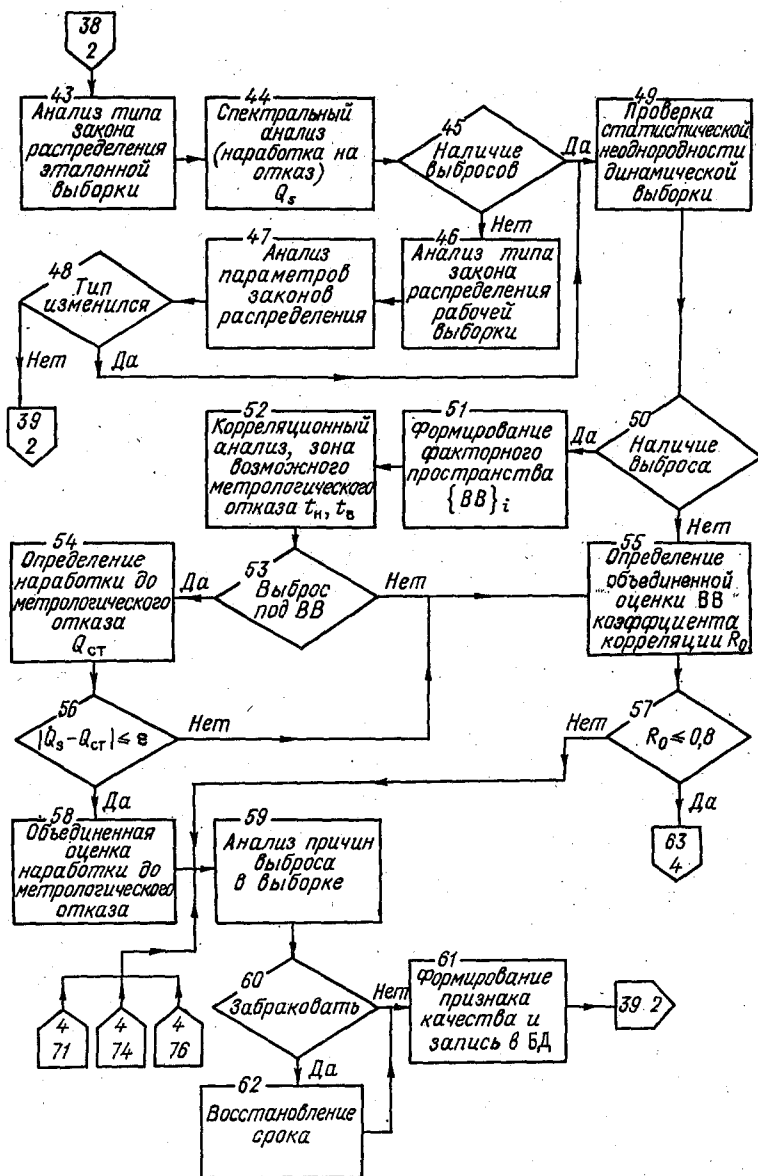
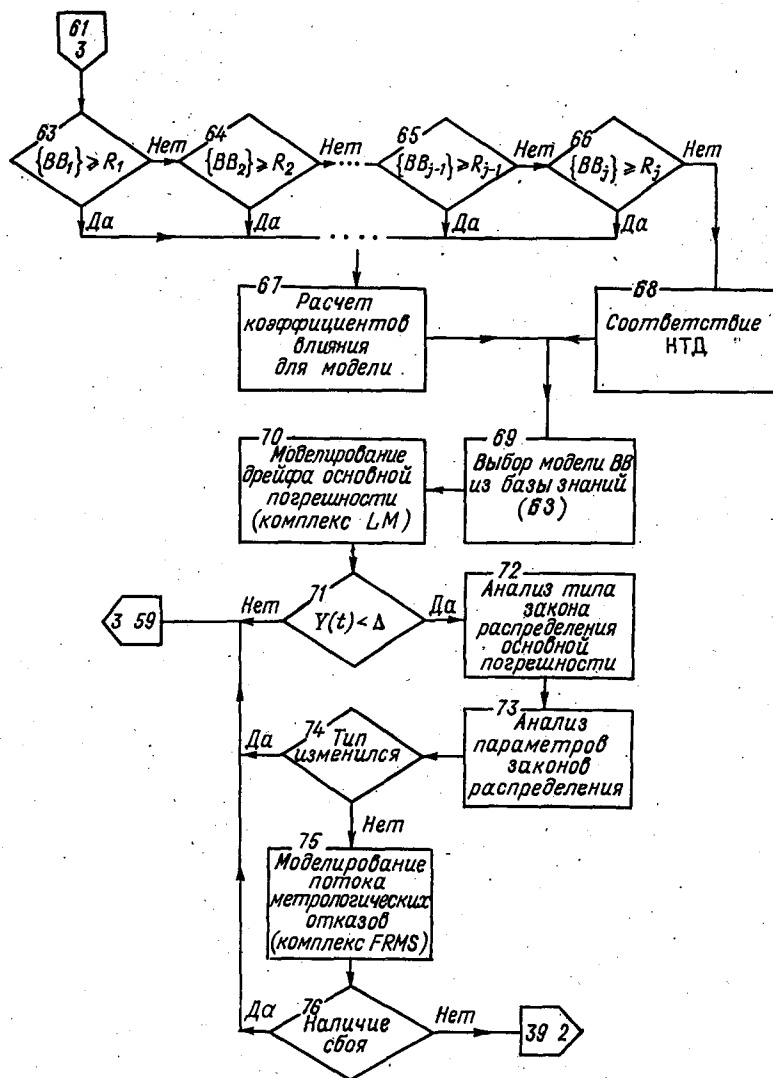


Рис. 2. Функциональн



Блок-схема подсистемы „SOS“

должен выйти за пределы допускаемой погрешности Δ ;

б) выбросы в динамических выборках, влияющих на возникновение отказа факторов $\{Z_i^k(t)\}$, должны существовать и происходить раньше времени t_n^z или синхронно с выбросами в выборке измерений $\{x_i\}$ контролируемого средства измерения t_n^x , что соответствует наличию причинно следственной связи между выбросами влияющих факторов и выбросами в измерениях, которая проявляется в нарушении соответствия закона распределения эталонной выборки закону распределения текущей выборки измерений контролируемого СИ.

Для решения сформулированной выше задачи используются методы имитационно-вероятностного моделирования [4–8], методы обнаружения выбросов в нестационарных выборках измерений [12], методы идентификации законов распределений [4], а также методы аллогизмов [1].

В качестве иллюстрации решения изложенной выше задачи на рис. 1 предлагается функциональная блок-схема подсистемы обнаружения метрологических отказов метеорологических СИ (SOS – система обнаружения сбоев), предназначенная для функционирования в составе разработанной ранее автоматизированной системы управления метеорологическими СИ [4].

Решение задачи обнаружения метрологических отказов СИ в течение МПИ реализуется в SOS последовательно в несколько этапов путем проверки системы целевых условий (9)–(13).

На первом этапе решается задача формирования динамических выборок $\{x_i\}$, $\{Z_i^k(t)\}$, $i = \overline{1, n}$, $k = \overline{1, \alpha}$ и $\{x_i^z\}$, $i = \overline{1, n}$ последовательно по каждому параметру измеряемых СИ.

Для формирования данных выборок используется банк данных подсистемы, имеющей структуру системы последовательных файлов, в которых находятся результаты метеорологических измерений по станциям в реальном режиме времени.

На втором этапе решается задача логического контроля синхронных измерений всех параметров на станции по текущему и предыдущему срокам наблюдений. Для контроля значений грубых выбросов в результатах измерений в SOS используются хорошо разработанные методы аллогизмов метеорологических параметров между собой [1]. При выявлении ошибки-выброса в i -м измерении j -го параметра это значение бракуется и восстанавливается с помощью известных методов интерполяции или экстраполяции [3]. При этом формируется признак качества контролируемого i -го измерения и осуществляется переход к контролю данных $(i+1)$ -го измерения следующего срока. Процесс продолжается до тех пор, пока не будет просмотрена вся контролируемая выборка, состоящая из N значений-сроков.

Если в результате логического контроля синхронных измерений всех параметров на станции выбросов не обнаружено, то осуществляется проверка наличия информации по станции в банке данных. При наличии информации по станции в банке данных осуществляется сортировка рабочих выборок (уничтожение данных первого срока наблюдений и

зведение в выборку следующего $(i + 1)$ -го срока наблюдений) и переход ко второму этапу решения, на котором процесс, описанный выше, повторяется. При условии отсутствия информации по станции в банке данных подсистема SOS заканчивает свою работу.

На третьем этапе решается задача по уточнению наличия выбросов в исследуемых выборках $\{x_i\}$, $i = \overline{1, n}$ с помощью проверки статистической неоднородности контролируемого ряда наблюдений с использованием данных спектрального и корреляционного анализов; производится расчет наработки на метрологический отказ, осуществляется формирование пространства влияющих факторов и сравнение параметров закона распределения эталонной и текущей рабочей выборок, проверка выполнения системы целевых условий (12), (13).

Если на третьем этапе установлено, что система целевых условий (12)–(13) выполнена, то наличие i -го выброса обусловлено внешними факторами; затем осуществляется переход вновь на второй этап, на котором проверяется наличие информации по станции в банке данных.

Если на третьем этапе работы подсистемы SOS выявлена статистическая неоднородность в выборках $\{x_i\}$, $\{Z_i^k(t)\}$ при $i = \overline{1, n}$, $k = \overline{1, L}$ и объединенная оценка коэффициента корреляции ВВ меньше 0,8, то осуществляется переход к четвертому этапу.

На четвертом этапе решается задача выбора коэффициентов модели ВВ из базы знаний подсистемы SOS и осуществляется переход к пятому этапу. В случае если значения ВВ выборки $\{Z_i^k(t)\}$, $i = \overline{1, n}$, $k = \overline{1, L}$ не вызывают выбросов и не отличаются от своих средних значений, то очевидно, что ВВ находятся в пределах нормальных условий эксплуатации СИ.

На пятом этапе решается задача проверки отсутствия выбросов во всех L динамических выборках ВВ $\{Z_i^k(t)\}$, $i = \overline{1, n}$, $k = \overline{1, L}$ и наличия выбросов в динамической выборке $\{x_i\}$, $i = \overline{1, n}$ измерений контролируемого СИ (выполнение системы целевых условий (11)). Это осуществляется с помощью моделирования методом Монте-Карло нестационарного случайного процесса дрейфа основной погрешности СИ (комплекс программ *LM*). Информация о работе этого комплекса программ приведена в работах [4, 5]. При моделировании дрейфа основной погрешности осуществляется проверка условия выхода моделируемого случайного процесса $Y(t)$ за пределы допуска Δ . При достижении значением $Y(t)$ верхней или нижней границы $(\Delta \pm \epsilon)$ области возможных метрологических отказов контролируемого СИ производится моделирование влияния внешних факторов на возникновение метрологических отказов СИ. Наличие сбоя в границах $[t_n, t_b]$ указывает на временный выход МХ за пределы допускаемых значений, и следовательно, i -е измерение j -го параметра k -й станции за этот срок недостоверно. Оно бракуется и восстанавливается с помощью изветных методов интерполяции или экстраполяции [1].

Выходной информацией подсистемы обнаружения метрологических отказов метеорологических средств измерений SOS будут: фактическая дата метрологического отказа контролируемого СИ; прогнозируемая оценка наработки до метрологического отказа; причины, вызвавшие выход МХ контролируемого СИ за пределы допуска, а также выдача

целевых рекомендаций по предупреждению возникновения метрологических отказов для данного типа метеорологических СИ.

Включение автоматизированной подсистемы обнаружения метрологических отказов метеорологических средств измерений в состав АСУ МО [7] позволит повысить эффективность использования АСУ МО в УГМ и других ведомствах и министерствах, где эта система будет эксплуатироваться.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бирман Б. А., Краушкин Ю. А., Шушанова Л. Г. Логический контроль данных судовых метеорологических наблюдений. — Труды ВНИИГМИ-МЦД, 1984, вып. 117, с. 79—86.
2. Буловский П. И., Зайденберг М. Г. Надежность приборов систем управления. — Л.: Машиностроение, 1975. — 328 с.
3. Корн Н., Корн Т. Справочное по математике для научных работников и инженеров. — М.: Изд-во физ.-мат. лит., 1974. — 831 с.
4. Окоренков В. Ю. Численный прогноз и оптимальное управление метрологической надежностью средств измерений. — Труды ГГО, 1985, вып. 476, с. 40—66.
5. Окоренков В. Ю. Моделирование процесса поверок средств измерений (комплекс программ). — ОФАП Госкомгидромета, ВЦ ВНИИГМИ-МЦД, 1980, инв. № ИО299.
6. Окоренков В. Ю., Бураченко Т. А. Система моделирования функционирования парка метеорологических средств измерений. — Труды ГГО, 1983, вып. 522, с. 28—36.
7. Окоренков В. Ю., Ахмедов М. З., Бураченко Т. А. Автоматизированная система управления, контроля метрологической надежности парка средств измерений (комплекс программ). — ОФАП Госкомгидромета, ВЦ ВНИИГМИ-МЦД, 1987, инв. № ИО240.
8. Окоренков В. Ю. Статистическое моделирование процесса эксплуатации средств измерений. — Труды ГГО, 1982, вып. 465, с. 107—119.
9. Окоренков В. Ю. Разработка и обоснование теоретических моделей процессов определяющих изменение метрологической надежности средств измерений. — Труды ГГО, 1985, вып. 476, с. 10—24.
10. Окоренков В. Ю. Расчет и прогнозирование метрологической надежности метеорологических средств измерений на основе метода имитационно-вероятностного моделирования. — Труды ГГО, 1982, вып. 465, с. 97—101.
11. Окоренков В. Ю., Кусуров В. И. Автоматизированная система обнаружения метрологических отказов метеорологических средств измерений (комплекс программ). — ОФАП Госкомгидромета, ВЦ ВНИИГМИ-МЦД, 1989, инв. № ИО170.
12. Толстиков А. С., Туболова И. И. Некоторые подходы к обнаружению аномальных значений в результатах измерений. — Метрология и измерительная техника, 1987, № 6, с. 87—95.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ТЕРМОМЕТРОВ

Одним из важных видов метеорологических средств измерений (СИ) являются жидкостные термометры. Механизм возникновения их метрологических отказов в основном обусловлен следующими, случайными процессами: изменением во времени физико-химических свойств рабочей жидкости (ртути, спирта) и сил капиллярной депрессии; самопроизвольной деформацией капилляров и резервуаров термометров из-за термического последствия стекла под влиянием изменений температуры окружающего воздуха и давления; изменением во времени давления паров рабочей жидкости и воздуха в капилляре термометров; старением стеклянных резервуаров термометров и износом штифтов максимальных термометров.

Под действием указанных выше случайных процессов у жидкостных термометров возникают метрологические отказы двух типов; необратимые постепенные метрологические отказы, вызванные постепенным (вековым) повышением показаний термометров, и внезапные обратимые метрологические отказы типа сбоя, вызванные временным понижением показаний (депрессией) термометров под влиянием изменения температуры и давления.

Механизм возникновения необратимых постепенных метрологических отказов вызван случайным процессом восстановления взаимного расположения частиц стекла под действием молекулярных сил, нарушенного при нагревании (изготовлении), в результате которого резервуар термометра постепенно сжимается. Вследствие уменьшения объема резервуара показания термометров повышаются.

Важно отметить, что процесс изменения точки нуля термометров типов ТМ1 – ТМ10 идет интенсивно в первые 15 дней после их изготовления, изменения при этом достигают в среднем $\pm 0,1^\circ\text{C}$, затем процесс начинает постепенно стабилизироваться и уже после одного года эксплуатации изменения не превышают $\pm 0,12^\circ\text{C}$. В последующие 5 лет средняя скорость изменения точки нуля соответствует $\pm 0,01^\circ\text{C}/\text{год}$, а в дальнейшем она стабилизируется на уровне $\pm 0,005^\circ\text{C}/\text{год}$. Таким образом, модель возникновения постепенного метрологического отказа, описывающая указанный выше механизм, может быть представлена в следующем виде:

$$\Delta_d(t) = \Delta_0 + B(t) (K + e^{-t/\tau_m}), \quad (1)$$

где Δ_0 – начальное значение систематической составляющей основной погрешности ($^\circ\text{C}$); $B(t)$ – случайная величина скорости изменения Δ_0 в момент времени t ($^\circ\text{C}/\text{год}$); K – коэффициент стационарности процесса $\Delta_n(t)$; τ_m – постоянная времени приработки термометров (годы); t – текущее время года; $\Delta_d(t)$ – систематическая составляющая основной погрешности термометра в момент времени t , обусловленная долговременным дрейфом основной погрешности.

Кроме выше указанного механизма возникновения необратимых постепенных метрологических отказов у максимальных термометров в результате исследований [1] выявлен механизм отказа, основанный на процессе механического износа стеклянного штифта, в результате чего термометр теряет способность сохранять максимальную температуру, т. е. отказывает. Отказы данного типа неустранимы. Модель отказа, описывающая указанный выше механизм отказа, может быть представлена в следующем виде:

$$\Delta(t) = B_0 + A(t - t_0), \quad (2)$$

где B_0 – начальное значение основной погрешности из-за потери „максимальности” (°C); A – случайная скорость изменения основной погрешности термометра, обусловленная износом штифта (°C/год); t_0 – время начала эксплуатации термометра (годы); t – текущее время (годы).

Модель вида (2) описывает случайный линейный процесс веерного типа. Как известно [1], для метеорологических термометров типов ТМ1–ТМ10 величина A имеет нормальное распределение, а следовательно, модель отказа вида (3) определяет модель надежности следующего вида [1]:

$$P_M(t) = \Phi \left(\frac{B_0 - \Delta_1}{\sigma_A(t)} - \frac{m_A(t)}{\sigma_A(t)} \right) + \Phi \left[\frac{\Delta_2 - B_0}{\sigma_A(t)} - \frac{m_A(t)}{\sigma_A(t)} \right], \quad (3)$$

где $P_M(t)$ – вероятность безотказной работы СИ; $m_A(t)$, $\sigma_A(t)$ – математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение изменения во времени основной погрешности СИ; Δ_1 , Δ_2 – нижний и верхний пределы допускаемой погрешности СИ; Φ – функция Лапласа ($0,5 \leq \Phi \leq 1,0$).

Кроме того, с течением времени у жидкостных термометров наблюдается процесс выделения в капилляр абсорбированных стеклом газов, что приводит к разрыву столбика рабочей жидкости. Размер разрыва не остается постоянным и зависит от температуры термометра, что вызывает метрологические отказы типа сбоя.

Физика процессов, формирующих описанные выше механизмы возникновения метрологических отказов, связана с диффузией, адсорбцией газов, диссипацией спирта, поэтому в качестве модели данного типа метрологического отказа термометров целесообразно использовать модели случайных диффузных процессов с сильным перемешиванием, которые можно представить в следующем виде:

$$P(t) = \left[1 - \exp \left(-\frac{2m^2(t)}{\sigma^2(t)} \right) \right] \times \Phi \left[\frac{x_{\max} - m(t)}{\sigma(t)\sqrt{x_{\max}/m(t)}} \right], \quad (4)$$

где $P(t)$ – вероятность безотказной работы термометра; $m(t)$ – математическое ожидание изменения систематической составляющей основной погрешности, вызванное процессами диффузии, адсорбции, дистилляции (°C); $\sigma(t)$ – среднее квадратическое отклонение систематической составляющей основной погрешности $m(t)$ (°C); $x_{\max}$ – максимальное значение $m(t)$; t – текущее время (годы); Φ – функция Лапласа.

Механизм возникновения обратимых метрологических отказов типа боя метеорологических стеклянных термометров типов ТМ1–ТМ10 обусловлен случайным процессом временной депрессии точки нуля, которая в свою очередь вызвана остаточным расширением стекла (резервуара) термометров после их кратковременного нагревания, которое исчезает постепенно.

Случайный процесс кратковременного нагревания (охлаждения) резервуаров термометров вызывает случайный процесс изменений систематической составляющей основной погрешности их точки нуля, а следовательно, и случайный процесс измерения систематической составляющей основной погрешности всех точек шкалы термометров, смещающихся из-за дрейфа точки нуля.

Как показали исследования [2], случайный процесс депрессии точки нуля стеклянных метеорологических термометров зависит от температуры нагревания (охлаждения) термометров – чем больше температура термометра отклоняется от нормальной температуры 20 °С, тем больше изменяется депрессия; от продолжительности нагревания резервуаров термометров; от сорта стекла.

Максимальное значение депрессии для метеорологических термометров типов ТМ1–ТМ10 достигает $\pm 0,1$ °С, причем скорость достижения максимальной депрессии определяется химическим составом стекла. Например, чем больше в составе стекла калия и натрия, тем больше депрессия. При нагревании термометров происходит расширение их резервуара, которое, достигнув максимума, в первые 12 ч после нагревания уменьшается на половину и совершенно исчезает через 21 день, если при этом не наблюдается нового цикла нагревания.

Таким образом, очень важно отметить, что объем резервуара стеклянных термометров, а следовательно, и их основная погрешность при некоторой температуре T зависит не только от этой температуры, но и от истории тех температурных изменений, которые термометр претерпел за предыдущий 21 день эксплуатации.

Это обстоятельство позволяет обосновать тип модели процесса изменения основной погрешности термометров. Как известно [2], в качестве указанной модели могут быть использованы модели укрупненных случайных процессов с последствием, теоретически обоснованные в ряде работ автора [1, 2].

В качестве локальной модели метрологического отказа жидкостных стеклянных термометров, описывающей указанный выше механизм отказа, можно использовать модель следующего вида:

$$\Delta_K(t) = B_1(t) \left[1 - \exp \left(- \frac{T(t) - T_0}{T_0} \right) \right] + B_2(t) \left(K + \exp \left(- \frac{t}{\tau_M} \right) \right), \quad (5)$$

где $B_1(t)$, $B_2(t)$ – случайные скорости изменения систематической составляющей основной погрешности термометра в момент времени t (°С/год); $T(t)$ – температура нагревания термометра в момент времени t (°С); T_0 – нормальная температура термометра (20 °С); K – коэффициент стационарности случайного процесса $\Delta_K(t)$; $\Delta_K(t)$ – систематическая составляющая

основной погрешности термометра в момент времени t , обусловленная кратковременным дрейфом основной погрешности; τ_M — постоянная времени стабилизации $\Delta_K(t)$.

Первый член модели (2) описывает случайный процесс изменения при нагревании (охлаждении) термометров, а второй член — случайный процесс стабилизации изменений $\Delta_K(t)$ в течение τ_M .

Следующим типом обратимых метрологических отказов жидкостных метеорологических термометров является случайный нестационарный процесс изменения во времени давления паров рабочей жидкости в капилляре термометров, который происходит из-за дистилляции спирта в верхнюю часть капилляра. Это вызывает уменьшение столбика спирта в капилляре, а следовательно, и изменение показаний термометра.

Следующий механизм возникновения обратимых метрологических отказов типа сбоя метеорологических термометров основан на влиянии на систематическую составляющую основной погрешности случайных процессов изменения внешнего (атмосферного) и внутреннего давления.

Влияние на показания термометров внешнего и внутреннего давления оценивается соответственно по известным [1] формулам:

$$\Delta_p = \gamma(p - 760), \quad (6)$$

где Δ_p — поправка на внешнее давление; γ — коэффициент внешнего давления данного термометра; p — внешнее давление на резервуар термометра, и

$$\Delta_K = \delta l_T (\rho_T / \rho_0) \sin \alpha, \quad (7)$$

где Δ_K — поправка на внутреннее давление; δ — коэффициент внутреннего давления термометра (изменение его показаний при изменении внутреннего давления на 1 мм рт. ст.); l_T — длина ртутного столбика в капилляре термометра при данной температуре; ρ_T и ρ_0 — плотность ртути при температуре T и при 0°C ; α — угол между осью термометра и горизонтальной плоскостью.

При некоторых условиях, например, когда систематическая погрешность термометра находится вблизи границы допускаемой области, учет зависимостей (5) и (6) может приводить к возникновению отказов типа сбоя, частота которых является некоторой случайной функцией изменения внешнего и внутреннего давления, оказываемого на термометр.

На основании рассмотренных выше механизмов возникновения метрологических отказов жидкостных термометров можно сделать вывод о том, что различие в причинах, вызывающих отказы, может проявляться в формировании мультимодальных законов распределения времени безотказной работы.

Типовые функции дрейфа систематической и случайной составляющих основной погрешности метеорологических термометров, вызванные указанными выше случайными процессами, были получены по результатам их проверок за период более 10 лет по выборкам от 100 до 300 термометров с помощью специализированного комплекса программ для исследова-

Таблица 1_n
 Функции дрейфа $m(t) = \sum_{i=1}^n \alpha_i t^{i-1}$
 (t — время, годы) систематической составляющей
 основной погрешности метеорологических термометров

Тип термометра	$m(t)$
ГМ1	$0,042 - 0,002t + 0,001t^2$
ГМ2	$0,028 - 0,005t + 0,001t^2$
ГМ3	$0,032 - 0,007t + 0,001t^2$
ГМ4	$0,010 + 0,003t$
ГМ5	$0,037 + 0,005t - 0,002t^2 + 0,0001t^3$
ГМ6	$0,008 + 0,002t$
ГМ7	$0,037 - 0,011t + 0,002t^2$
ГМ8	$0,030 - 0,010t + 0,001t^2$
ГМ9	$0,028 - 0,005t + 0,001t^2$
ГМ10	$0,020 + 0,003t$

дования метрологической надежности [2]. Типовые функции дрейфа систематической и случайной составляющих основной погрешности термометров ГМ1–ГМ10 приведены в табл. 1 и 2. Они являются достаточно универсальными характеристиками метрологической надежности, их можно рассматривать как модели постепенных метрологических отказов, которые позволяют оценить основные характеристики надежности: наработку

Таблица 2
 Функции дрейфа $\sigma(t) = \sum_{i=1}^n \beta_i t^{i-1}$
 (t — время, годы) случайной составляющей
 основной погрешности метеорологических термометров

Тип термометра	$\sigma(t)$
ГМ1	$0,048 + 0,003t$
ГМ2	$0,168 - 0,021t + 0,003t^2$
ГМ3	$0,046 + 0,003t$
ГМ4	$0,021 + 0,002t$
ГМ5	$0,053 + 0,003t$
ГМ6	$0,022 + 0,0018t$
ГМ7	$0,021 - 0,007t + 0,001t^2$
ГМ8	$0,050 + 0,003t$
ГМ9	$0,11 - 0,0032t + 0,005t^2$
ГМ10	$0,020 + 0,002t$

до отказа, скорость изменения во времени систематической и случайной составляющих основной погрешности, их 95 %-ные доверительные интервалы

$$\Delta_{0,95} = m(t) + 1,6\sigma(t), \quad (8)$$

значения коррекции погрешности в любой заданный момент времени. Например, оптимальное значение коррекции (поправки) систематической составляющей основной погрешности термометров может быть оценено по формуле вида

$$\Delta_0 = (\Delta_1 + \Delta_2)/2 - m(t), \quad (9)$$

где Δ_1 , Δ_2 – верхняя и нижняя границы предела допускаемой погрешности.

Кроме этого, модели отказов позволяют оценить надежность термометров в любой момент времени их эксплуатации, рассчитать оптимальные межповерочные интервалы. Как известно [1], закон распределения наработки до первого метрологического отказа термометров близок к нормальному и, следовательно, модель их надежности имеет следующий вид:

$$P(t) = \Phi \left[\frac{\Delta_0 - \Delta_1}{t\sigma(t)} - \frac{m(t)}{\sigma(t)} \right] + \Phi \left[\frac{\Delta_2 - \Delta_0}{t\sigma(t)} - \frac{m(t)}{\sigma(t)} \right], \quad (10)$$

где $P(t)$ – вероятность безотказной работы; Δ_1 , Δ_2 – верхняя и нижняя границы предела допускаемой погрешности (°C); Φ – функция Лапласа; t – время, годы.

Таким образом, в результате исследований определены механизмы обратимых и необратимых метрологических отказов метеорологических термометров, разработаны и обоснованы модели их отказов и надежности, что позволяет нормировать показатели их надежности и реализовать оптимальное управление их надежностью при эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Окоренков В. Ю. Разработка и обоснование теоретических моделей процессов, определяющих изменение метрологической надежности средств измерений. – Труды ГГО, 1985, вып. 475, с. 24–40.
2. Окоренков В. Ю. Численный прогноз и оптимальное управление метрологической надежностью средств измерений (комплекс программ) – ОФАП Госкомгидромета. ВЦ ВНИИГМИ–МЦД, 1985, инв. № Ж 051050923.

МЕТРОЛОГИЧЕСКАЯ НАДЕЖНОСТЬ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ СКОРОСТИ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА

Сегодняшняя тенденция развития приборостроения показывает, что достижение высокой точности и достоверности измерительной информации возможно только на основе обеспечения высокой метрологической адекватности средств измерений (СИ). Средства измерения скорости воздушного потока используются для широкого спектра народнохозяйственных задач, в число которых входит: обеспечение безопасности полетов авиации, контроль за состоянием окружающей среды и т. п., что определяет актуальность и современность решения указанной задачи. Особенно важную роль в решении задачи обеспечения высокой надежности СИ играет определение механизмов возникновения отказов, их математических моделей, причин и внешних проявлений отказов конкретных типов СИ. Именно эта задача и решается в данной работе.

Основными процессами, определяющими механизм возникновения метрологических отказов СИ скорости воздушного потока (анемометров АС-13, АРИ-49, М-25, М-47, М-61, М-92; анеморумбометров М-63, М-63М-1; анеморумбографа М-63 МР и датчиков параметров ветра М-106М, М-107, РАМС), являются:

- 1) износ и старение элементов кинематики и ветроприемников;
- 2) изменение во времени аэродинамических свойств ветроприемников;
- 3) изменение во времени сил трения элементов кинематики;
- 4) изменение во времени ветровой нагрузки на элементы конструкции СИ.

Влияние процессов износа и старения на метрологическую надежность указанных типов СИ проявляется в возникновении случайных изменений физических свойств материалов подшипников, подпятников сеей, элементов передаточной системы (червяков, редукторов), самих сеей, часового механизма и ветроприемников под действием циклических колебаний ветровой нагрузки. Наибольший износ испытывают подшипники и оси ветроприемников, что и является первопричиной возникновения отказов многих элементов кинематики.

Износ подшипников и осей ветроприемников представляет собой случайный процесс изменения начального зазора между подшипником и осью ветроприемника. Он вызывает изменение зазора с осью ветроприемника, и приводит к разбалтыванию, нарушающему балансировку ветроприемника, а также вызывает изменение моментов трения и как следствие приводит к потере чувствительности. Все это обуславливает изменение функции преобразования и возникновение случайной составляющей основной погрешности в измерении скорости воздушного потока.

Модель отказа, вызванного процессом износа, как известно [1], можно представить в следующем виде:

$$\xi(t) = \xi(0) + g(v)t, \quad (1)$$

где $\xi(0)$ – случайное начальное значение метрологического параметра (зазора диаметра и т. п.) i -го элемента кинематики, имеющее заданное распределение; $g(v)$ – случайная скорость изменения метрологического параметра i -го элемента при скорости v (м/с); t – время. Откуда наработка на метрологический отказ i -го элемента кинематики задается как время работы до достижения некоторой предельной величины $\xi_{\text{п}}$. Распределение времени безотказной работы в этом случае будет нормальным, если ξ существенно больше начального значения $\xi(0)$, функция математического ожидания $E(\xi(t))$ линейна и нормировочная корреляционная функция $K_{\xi}(t_1, t_2) \rightarrow 0$ при $t_2 \rightarrow \infty$.

Как известно [1], износ подшипников и осей является случайным процессом с последствием и кроме нормального распределения времени безотказной работы процесс задает логарифмически-нормальное распределение, при котором функция $E(\xi(t))$ имеет вид [1]

$$E(\xi(t)) = c(v) \ln(1 + t), \quad (2)$$

где $c(v)$ – постоянная процесса, определяемая режимом износа; v – средняя скорость, при которой функционирует СИ; t – время функционирования.

Механизм влияния на метрологическую надежность СИ процесс изменения во времени аэродинамических свойств ветроприемников заключается в постепенном изменении углов атаки лопастей ветроприемников под действием циклических колебаний ветровой нагрузки, что вызывает возникновение метрологических отказов. Кроме того, это влияние заключается в изменении аэродинамических свойств ветроприемников под действием процесса износа, изменяющего их шероховатость.

Процесс изменения во времени трения вызывается старением и износом элементов кинематики СИ и ускоряется за счет климатических факторов, главными из которых являются ветровая нагрузка, температура, осадки, обледенение.

Процесс изменения во времени ветровой нагрузки вызывает возникновение динамических погрешностей измерения при резких изменениях направления воздушного потока, которые приводят к метрологическим отказам типа сбоя (самоустраняющиеся отказы).

Таким образом, возникновение метрологических отказов СИ скорости воздушного потока является случайным по физической природе генерирующих его процессов, а следовательно, преобладающими будут случайные составляющие погрешности, законы распределения которых как правило, близки к нормальному.

Для количественной оценки влияния на метрологическую надежность указанных выше процессов были проведены испытания на долговременную стабильность анемометров типов МС-13, М-47, анемометров типа М-63М-1 и датчиков параметров ветра М-49 в естественных условиях эксплуатации. Кроме того, для оценки дрейфа погрешностей указанных типов СИ использовались результаты их испытаний на безотказность в течение наработки 300, 600, 1000 ч в естественных условиях

Таблица 1

**Результаты испытаний СИ скорости воздушного потока
на долговременную стабильность**

Скорость воздушного потока в АТ, м/с	Средняя погрешность при выпуске из производства, м/с	Средняя по партии абсолютная погрешность (м/с) после наработки			
		300 ч	600 ч	1000 ч	6279 ч
Анеморумбометры М-63М-1, объем выборки — 12 приборов					
1,5	0,20	0,10	0,14	0,15	0,26
5,0	0,22	0,14	0,20	0,21	0,35
15,0	0,33	0,30	0,23	0,25	0,54
25,0	0,36	0,33	0,27	0,29	0,82
35,0	0,43	0,40	0,34	0,37	1,43
40,0	0,61	0,54	0,38	0,40	2,56
Анеморумбографы М-63МР, объем выборки — 12 приборов					
1,5	0,13	0,10	0,14	0,16	0,27
5,0	0,22	0,18	0,20	0,22	0,36
15,0	0,31	0,28	0,24	0,26	0,55
25,0	0,36	0,32	0,29	0,31	0,84
35,0	0,43	0,40	0,35	0,38	1,54
40,0	0,61	0,56	0,40	0,43	2,54

Таблица 2

**Результаты испытаний СИ скорости воздушного потока
на долговременную стабильность
Датчики М-49, объем выборки — 12 экземпляров**

Скорость воздушного потока в АТ, м/с	Средняя погрешность при выпуске из производства, м/с	Средняя по партии абсолютная погрешность (м/с) после наработки			
		300 ч	600 ч	1000 ч	8760 ч
1,5	0,22	0,20	0,18	0,25	0,44
5,0	0,27	0,23	0,27	0,32	0,52
15,0	0,33	0,30	0,25	0,30	0,66
25,0	0,45	0,39	0,36	0,41	1,14
35,0	0,53	0,46	0,44	0,48	1,88
45,0	1,00	0,84	0,79	0,86	3,89

эксплуатации на заводе-изготовителе. Указанные СИ до начала испытаний проверялись в аэродинамической трубе (АТ) при скоростях потока от 1,5 до 45 м/с, после чего устанавливали на крыше здания и ориентировали на север по компасу. Через 300, 600, 1000 ч наработки СИ снимали и снова проверяли в АТ. Анемометры типа МС-13 испытывали в течение 27 мес, причем проверяли их до начала испытаний, через 25 мес и через 27 мес. Для повышения репрезентативности результатов испытаний при оценке дрейфа основной погрешности указанных СИ использовали результаты их периодической поверки в ГГО. Результаты испытаний представлены в табл. 1-4.

Таблица 3

Результаты испытаний СИ скорости воздушного потока
на долговременную стабильность
Анемометры М-47, объем выборки — 12 приборов

Скорость воздушного потока в АТ, м/с	Средняя погрешность при выпуске из производства, м/с	Средняя по партии абсолютная погрешность (м/с) после наработки			
		300 ч	600 ч	1000 ч	8760 ч
1,5	0,21	0,20	0,15	0,17	0,36
5,0	0,26	0,24	0,20	0,22	0,42
15,0	0,30	0,27	0,24	0,26	0,63
25,0	0,42	0,40	0,38	0,41	1,14
35,0	0,57	0,53	0,50	0,56	2,03
45,0	1,33	1,26	1,20	0,70	3,32

Таблица 4

Значения скорости дрейфа систематической составляющей
основной погрешности для различных типов СИ (м/с в 1 ч)
в зависимости от скорости воздушного потока

Скорость воздушного потока, м/с	М-63М-1	М-47	М-63МР	М-49	МС-13
1,5	$2,1 \cdot 10^{-5}$	$2,4 \cdot 10^{-5}$	$2,0 \cdot 10^{-5}$	$2,4 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-5}$
5,0	$2,7 \cdot 10^{-5}$	$2,6 \cdot 10^{-5}$	$2,7 \cdot 10^{-5}$	$2,6 \cdot 10^{-5}$	$1,8 \cdot 10^{-5}$
15,0	$5,5 \cdot 10^{-5}$	$4,8 \cdot 10^{-5}$	$5,4 \cdot 10^{-5}$	$4,6 \cdot 10^{-5}$	$5,0 \cdot 10^{-5}$
25,0	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$9,4 \cdot 10^{-5}$	$(7,1 \cdot 10^{-5})^1$
35,0	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$1,9 \cdot 10^{-4}$	$2,2 \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$	
45,0	$4,1 \cdot 10^{-4}$	$3,8 \cdot 10^{-4}$	$4,0 \cdot 10^{-4}$	$3,9 \cdot 10^{-4}$	

¹ Данные по МС-13 для скорости 20 м/с.

Как следует из полученных результатов, процесс приработки элементов конструкции исследованных типов СИ заканчивается после 1000 ч наработки, что наглядно подтверждается уменьшением погрешности по сравнению с начальной до наработки 600 ч и началом ее роста после 1000 ч. В соответствии с выражением (1) форма дрейфа погрешности после окончания периода приработки (1000 ч) близка к линейной (табл. 1-3), что позволяет представить ее в виде:

$$\Delta(v, t) = \Delta_0(v, t_n) + b(v)t, \quad (3)$$

где $\Delta_0(v, t_n)$ — погрешности СИ при скорости воздушного потока v после окончания периода приработки t_n (м/с); $b(v)$ — скорость изменения по-

ешности СИ при скорости воздушного потока v (м/с в 1 ч); t_n – период приработки СИ (ч); t – период нормального функционирования (наработка), $t > t_n$ (ч); $\Delta(v, t)$ – погрешность СИ при скорости воздушного потока v после наработки t (м/с).

Результаты исследований позволяют установить важнейшую характеристику стабильности погрешности СИ – среднюю скорость изменения погрешности во времени, которую в соответствии с выражением (3) можно представить в виде

$$b(v) = \frac{\Delta(v, t) - \Delta_0(v, t_n)}{t - t_n}. \quad (4)$$

Исключение периода приработки СИ из выражения (4) обосновывается тем, что в указанный период еще не установилось четкого взаимодействия между элементами конструкции, скорость изменения погрешности имеет большую дисперсию и, как правило, меняет знак; чем точнее установлен момент окончания приработки, тем стабильнее по скорости СИ значение $b(v)$.

Значения $b(v)$, приведенные в табл. 4, позволяют решать задачи прогнозирования погрешности СИ и производить расчет наработки до метрологического отказа. Например, для анемометров типа МС-13 оценку наработки на метрологический отказ можно представить в следующем виде:

$$\hat{t}_6 = \frac{(0,3 + 0,06v)}{b(t)}, \quad (5)$$

для анемометров М-47, датчиков параметров ветра метеорологической станции М-49, анеморумбометров М-63, М-63М, М-63М-1 выражение для оценки наработки имеет вид

$$\hat{t}_6 = \frac{(0,5 + 0,05v)}{b(v)}, \quad (6)$$

е $(0,3 + 0,06v)$, $(0,5 + 0,05v)$ – пределы допускаемой погрешности указанных СИ (м/с).

Оценки $\hat{t}_6$ для указанных выше типов СИ приведены в табл. 4, 5. Они характеризуют изменение метрологической надежности в зависимости от скорости воздушного потока и обосновывают необходимость дифференцирования значений межповерочных интервалов в зависимости от средней скорости воздушного потока, при которой эксплуатируются СИ.

Таким образом, определены основные показатели метрологической надежности СИ скорости воздушного потока, эксплуатируемых в системе скопгидромета СССР, механизмы и модели их отказов, позволяющие прогнозировать наработку до метрологического отказа, а следовательно, задана теоретическая и экспериментальная база для решения задачи оптимального управления надежностью указанных СИ.

Таблица 5

Оценки средней наработки на метрологический отказ (мес)
для различных типов СИ в зависимости от скорости
при разных пределах допускаемой погрешности (м/с)

Скорость воздушного потока, м/с	$\Delta = (0,5 + 0,05v)$				$\Delta = (0,3 + 0,06v)$
	М-63М-1, М-63	М-47	М-63МР	М-49	МС-13
1,5	38,03	31,94	39,93	31,94	49,24
5,0	38,58	40,06	38,58	40,06	46,30
15,0	31,56	36,17	32,15	37,74	33,33
25,0	24,30	25,58	24,30	25,85 ¹	
35,0	15,62	16,44	14,20	17,36	
45,0	9,32	10,05	9,54	9,79	

¹ Данные по МС-13 для скорости 20 м/с.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Окоренков В. Ю. Исследование метрологической надежности средств измерения скорости воздушного потока. — Труды ГГО, 1985, вып. 476, с. 101—124.

ИССЛЕДОВАНИЯ НАДЕЖНОСТИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ ДАЛЬНОСТИ ВИДИМОСТИ И ВЫСОТЫ НИЖНЕЙ ГРАНИЦЫ ОБЛАКОВ

Важнейшей задачей метрологического обеспечения в системе Госкомидромета СССР является достижение высокой метрологической надежности разрабатываемых и применяемых средств измерений (СИ). Эксплуатация метеорологических СИ с низкими характеристиками надежности приводит к значительным потерям информации и существенному снижению эффективности их использования. В связи с этим возникает необходимость теоретического и экспериментального исследования характеристик метрологической надежности СИ и разработки на этой основе научно обоснованной системы их эксплуатации и обслуживания.

До настоящего времени подобные исследования для СИ метеорологической дальности видимости (МДВ) и высоты нижней границы облаков (ВНГО) не проводились и такие важные характеристики надежности, какработка на метрологический и явный отказы, вероятность безотказной работы, функция готовности, функции изменения во времени случайных систематических погрешностей СИ, были неизвестны. Комплекс требований и надежности метеорологических приборов, указанный в их нормативной и справочной документации, не позволяет в настоящее время достаточно полно оценивать и прогнозировать вероятность их работоспособного состояния на весь период эксплуатации.

Указанные выше СИ представляют собой сложные измерительные системы, включающие в себя комплекс радиоэлектронной аппаратуры, периодически регулируемый в процессе функционирования. Наличие блока встроенного контроля некоторых метеорологических характеристик этих СИ позволяет вести периодический их контроль и коррекцию (в случае необходимости). Для оценки показателей метрологической надежности средств измерения ВНГО и МДВ определялся дрейф погрешности приборов типа ИВО-1М, РДВ-3, ФИ-1.

На метрологическую надежность этих СИ оказывают влияние, во-первых, периодичность (частота) коррекции (подрегулирования) дрейфа погрешности и ее значение, во-вторых, периодичность проверок СИ, при которых оценивается их работоспособность, и следовательно, эффективность и качество периодической подрегулировки; в-третьих, условия эксплуатации СИ, из которых главную роль играет их интенсивность функционирования, а также агрессивность внешней среды.

Для указанных выше СИ режим их периодической подрегулировки и закон восстановления метрологических характеристик при их проведении определяют процесс коррекции дрейфа регулируемых параметров И. Но даже при идеально выбранных частоте и значении коррекции дрейфа погрешности регулируемых элементов конструкции СИ их метрологическая надежность с течением времени будет уменьшаться из-за процесса дрейфа нерегулируемых параметров, оценка которого необхо-

Элемент	Тип элементов	Элементы блоков
		блок, узел отказа
1 Лампа Л10	КГМ 9—70 ТУ16—535, 229-75	Преобразователь, источник света
2 Двигатель модулятора	Э/ДВ—Г—31 АУ4 ТУ16—512.067—72	Преобразователь
3 Фотоэлектричес- кий умножитель	ФЭУ-31	Блок электронный, приемное устройство
4 (БК-А) Г	БК-А ТУ25—02—310, 841—76Е	Преобразователь
5 Лампа Л7	6Н6П СА3.301.011 ТУ	Блок электронный, выходная лампа блока усиления
6 Лампа Л8	6П1П—ЕВ СБ3.302.022 ТУ1	Блок электронный, блок усиления
7 Лампа Л5	6Н2П—ЕВ СД3.301.012.ТУ	То же
8 Лампа Л11	ФЭУ-31А СУ3.558.032 ТУ1	Электронный блок, фотоэлектронный умножитель
9 Лампа Л9	5П1П—ЕВ СБ3.302.022 ТУ1	Блок электронный, узел усиления, выходная лампа
10 Конденсатор С2	К50-ЗА-300-10 ОЖО.454.042-ТУ	Блок электронный, узел приемного устройства, анодная цепь лампы Л2
11 Конденсатор С16	СГМ-4-500-7-5100 ОЖО.461.082-ТУ	Блок электронный, цепь дросселя ДР2
12 Резистор R57	ОМЛТ-05, 200кОм±5 %	Блок электронный, приемное устройство, контрольное гнездо 36
13 Резистор R28	УЛИ-05-4,99 Ом±2 %	Блок электронный, блок питания, цепь трансформатора Тр1
14 Резистор 35	ОМЛТ-2-В, 1кОм±10 %	Блок электронный, блок питания, цепь фильтра ДР3
15 Диод полупро- водниковый Д2	Д226 В ЩБЗ.362.002.ТУ1	Блок электронный, блок автоматики
16 Диод полупро- водниковый Д14	Д226 В ЩБ 3.362.002.ТУ1	Блок электронный, блок автоматики, цепь обмотки реле Р3
17 Диод полупро- водниковый Д6	Д226 ЩБЗ.362.002 ТУ	Блок электронный, блок питания, цепь трансформатора Тр1
18 Диод полупро- водниковый Д7	Д226 ЩБ 3.362.002 ТУ	Блок электронный, блок питания цепь трансформатора Тр1
19 Двигатель М1	ДИД—2ТА 9ЕО.312.007.ТУ	Преобразователь

Таблица 1

регистратора дальности видимости типа РДВ-3

количество отказов	доля отказов от общего количества, %	$\bar{T}$ мес	Параметры надежности		
			$СКО_{\bar{T}}$	A_s	Ξ_s
53	26,36	22,774	24,606	2,135	4,146
22	10,90	30,0272	20,953	0,965	0,560
79	39,30	13,3803	18,614	2,325	6,671
8	8,98	26,9225	20,476	0,146	-1,638
6	2,98	37,7350	31,089	-0,214	-1,995
2	0,99	79,8037			
1	0,49	2,1481			
3	1,49	95,3308			
2	0,99	1,5185			
1	0,49	2,7407			
1	0,49	0,4444			
2	0,99	35,4870			
2	0,99	67,3333		0,65	
1	0,49	103,7037			
1	0,49	8,7407			
2	0,99	60,3888			
1	0,49	112,0370			
1	0,49	112,0370			
3	1,49	45,8493			

Элемент	Тип элементов	Элементы блоков
		блок, узел отказа
20 Трансформатор Тр1	ТН55—127/220—50 ОЮО.470.000 ТУ	Блок электронный, усилитель
21 Дроссель ДРЗ	Д40—5—0,18 ОЮО.475.000 ТУ	Блок электронный, блок питания
22 Трансформатор	ТОЛ 57 ОЮО.472.010 ТУ	Блок электронный, блок усиления, выходной трансформатор
23 Реле Р5	В спецификации отсутствует	Блок питания
24 Предваритель- ный усилитель		
25 Блок усиления		

дима для расчета межповерочных интервалов.

Таким образом, для средств измерений МДВ и ВНГО необходимо в первую очередь рассчитать оптимальный межрегулируемый интервал, а затем с учетом его рассчитать межповерочный интервал, обеспечивающий заданный уровень метрологической надежности СИ при минимуме затрат на их техническое и метрологическое обслуживание.

Для решения поставленных выше двух взаимосвязанных задач был организован по всем УГМ сбор статистических данных о дрейфе погрешности СИ типов ИВО-1М, РДВ-3, ФИ-1 за период между подрегулировками ($T_0 = 1$ мес) и значении коррекции, а также данных о наработке на отказ элементной базы указанных СИ, причинах их отказов и мерах, принятых по их устранению.

Объем анализируемых выборок составлял для СИ типа ИВО-1М — 602 прибора, типа РДВ-3 — 245 приборов и типа ФИ-1 — 51 прибор. Для повышения репрезентативности полученных данных о показателях надежности импульсных фотометров типа ФИ-1 были дополнительно использованы данные с наработке на отказ, полученные по выборке из 121 прибора в лаборатории исследования и сертификации приборов ГГО. Для СИ типа РДВ-2, РДВ-3, ИВО-1М были получены статистические данные об изменении их средней наработки $\bar{T}$ на явный отказ в течение 48 мес. Кроме того, для партии из 12 приборов типа РДВ-3 и партии из 7 приборов типа ИВО-1М были проведены экспериментальные испытания на долговременную стабильность.

Анализ данных, полученных для прибора типа РДВ-3 (табл. 1), показал, что 76,56 % всех отказов СИ этого типа возникает из-за отказов фотоэлектронного умножителя ФЭУ-31 (39,30 %), источника света лампы П10 (26,39 %), двигателя модулятора (10,90 %). Остальные 23,44 % отказов вызваны случайными отказами 25 элементов, которые указаны в табл. 1.

Количество отказов	Параметры надежности		
	доля отказов от общего количества, %	$\bar{T}$ мес	СКО $\bar{T}$ A_s $\mathcal{E}_s$
2	0,99	3,0925	
1	0,49	0,9629	
2	0,99	81,3037	
1	0,48	34,0740	
2	0,99	76,7037	
2	0,99	0,2037	

Отказы ФЭУ-31 и Л10 вызваны в основном процессами их старения и износа, а отказы двигателя модулятора — процессами механического износа.

Таким образом, надежность СИ типа РДВ-3 определяется в основном темпами старения элементов, из которых наименее надежным является фотоэлектронный умножитель (ФЭУ-31), от которого сильно зависят метрологические характеристики прибора в целом. Для повышения надежности РДВ-3 необходимо изменить тип используемого ФЭУ-31 на более надежный, а именно на обеспечивающий общий уровень безотказности не менее 10 мес. Для элементов РДВ-3, число отказов которых менее 6, в табл. 1 приведены параметры закона распределения, средние и единичные значения наработки на отказ $\bar{T}$, ее среднее квадратическое отклонение (СКО), асимметрия A_s и эксцесс $\mathcal{E}_s$. Анализ статистических данных о дрейфе погрешности и значениях его коррекции показывает, что 1) дрейф погрешности полностью не исключается при регулировках, 2) дрейф нерегулируемых параметров прогрессирует во времени.

Для подтверждения полученных выводов в табл. 2 и 3 приведены оценки параметров закона распределения дрейфа погрешности (изменения ее абсолютного значения) за период ($T_0 = 1$ мес) между коррекциями, а также параметры распределения значений коррекции дрейфа погрешности при регулировке и их изменение во времени. Оценка параметров эмпирических функций плотности вероятности дрейфа погрешности СИ за период подрегулировки $T_0 = 1$ мес произведена по формулам:

$$P^N(x) = S \sum_{k=1}^N (S(x - A)),$$

Таблица 2

Статистические параметры закона распределения систематической составляющей основной погрешности СИ типа РДВ-3 за период между регулировками

Месяц регистрации дрейфа погрешности СИ	Объем выборки	МО	СКО, %	A_s	Θ_s	k	S	B	λ_k
Апрель	318	0,53	0,56	1,85	5,88	4	0,25	0,406	$\lambda_1 = 0,174 \cdot 10^2$, $\lambda_2 = 0,647 \cdot 10^1$, $\lambda_3 = 0,124 \cdot 10^1$, $\lambda_4 = -0,250 \cdot 10^0$
Май	324	0,55	0,63	2,48	10,59	2	0,19	5,28	$\lambda_1 = 0,179 \cdot 10^2$, $\lambda_2 = 0,673 \cdot 10^0$,
Июль	303	0,61	0,79	5,73	49,09	5	0,11	9,15	$\lambda_1 = 0,186 \cdot 10^2$, $\lambda_2 = 0,128 \cdot 10^1$, $\lambda_3 = 0,350 \cdot 10^0$, $\lambda_4 = 0,649 \cdot 10^0$, $\lambda_5 = 0,361 \cdot 10^0$,
Июль	129	0,62	0,72	1,84	4,71	2	0,24	4,15	$\lambda_1 = 0,176 \cdot 10^1$, $\lambda_2 = 0,570 \cdot 10^0$,
Август	171	0,70	0,77	4,18	0,89	2	0,28	8,60	$\lambda_1 = 0,152 \cdot 10^1$, $\lambda_2 = 0,157 \cdot 10^0$,

$$\varphi_k = \sqrt{\pi/4} \cdot \cos(2k - 1) \cdot \pi/2, \quad k = 1, 2, \dots, \quad (1)$$

где $B = S(x - A)$.

В табл. 4 приведены абсолютные изменения во времени математического ожидания дрейфа нерегулируемых параметров СИ, полученных из табл. 2 и 3 с учетом ежемесячной коррекции дрейфа. Уравнение математического ожидания дрейфа систематической составляющей основной погрешности РДВ-3 с учетом ежемесячной подрегулировки будет иметь вид:

$$Y(t) = 0,13 + 0,035t, \quad (2)$$

где t — время (мес), $Y(t)$ — математическое ожидание систематической погрешности по абсолютному значению (%).

Из данных табл. 2, 3 и 4 можно сделать важные выводы: 1) математическое ожидание абсолютного значения коррекции дрейфа систематической составляющей основной погрешности при регулировках СИ типа РДВ-3 очень незначительно меняется во времени (от 0,40 до 0,54 %), что указывает на стабильность его регулировки и позволяет достаточно точно

Таблица 3

Статистические параметры закона распределения коррекции
погрешности СИ типа РДВ-3 при регулировке

Месяц ре- гулировки СИ	Объем выборки	МО %	СКО, %	A_s	$\mathcal{E}_s$	k	S	B	λ_k
Апрель	308	0,40	0,75	5,15	39,18	5	0,12	8,13	$\lambda_1 = 0,186 \cdot 10^1$, $\lambda_2 = 0,128 \cdot 10^1$, $\lambda_3 = 0,875 \cdot 10^0$, $\lambda_4 = 0,496 \cdot 10^0$, $\lambda_5 = 0,232 \cdot 10^0$,
Май	328	0,44	0,62	4,02	29,43	4	0,15	6,59	$\lambda_1 = 0,186 \cdot 10^1$, $\lambda_2 = 0,119 \cdot 10^1$, $\lambda_3 = 0,707 \cdot 10^0$, $\lambda_4 = 0,225 \cdot 10^0$,
Июль	330	0,44	0,55	1,99	6,24	4	0,24	4,06	$\lambda_1 = 0,174 \cdot 10^1$, $\lambda_2 = 0,575 \cdot 10^0$, $\lambda_3 = -0,798 \cdot 10^{-1}$, $\lambda_4 = -0,286 \cdot 10^0$,
Июль	330	0,44	0,81	3,39	19,01	3	0,13	7,61	$\lambda_1 = 0,184 \cdot 10^1$, $\lambda_2 = 0,104 \cdot 10^1$, $\lambda_3 = 0,383 \cdot 10^0$,
Август	180	0,54	0,63	1,25	1,01	2	0,32	3,08	$\lambda_1 = 0,163 \cdot 10^1$, $\lambda_2 = 0,165 \cdot 10^0$,

прогнозировать влияние регулировки на метрологическую надежность;
2) математическое ожидание дрейфа систематической погрешности устойчиво прогрессирует во времени, что и является основной причиной метрологических отказов СИ типа РДВ-3.

Анализ статистических данных об отказах элементной базы (табл. 5) СИ типа ИВО-1М показал, что 81,96 % всех отказов возникает из-за отказов 3 элементов: импульсной лампы типа ИСП-100-3М (19,11 %), фотоэлектронного умножителя типа ФЭУ (12,13 %), фотоусилителя (5,51 %), резисторов R88 (7,72 %), R90 (16,91 %), конденсатора C55 (3,67 %), переключателя П1 (9,19 %) и трансформатора узла питания (7,72 %). Остальные 18,04 % отказов случайны и приходится на 23 элемента, которые указаны в табл. 5.

Отказы импульсных ламп типа ИСП-100-3М вызваны в основном процессом старения ее элементов. Отказы резисторов R88, R90 вызваны недостаточной мощностью их рассеивания (0,5 Вт). Отказы трансформатора блока питания также вызваны недостаточной мощностью. Таким образом, увеличив рассеивающую мощность указанных элементов, можно существенно повысить надежность ИВО-1М.

Таблица 4

t мес	0	1	2	3	4	5
МО дрейфа систематической погрешности, % ...	0,13	0,02	0,04	0,05	0,03	0,06

Примечание. Для момента начала регистрации T_0 дано начальное значение МО систематической погрешности СИ.

Анализ статистических данных о дрейфе систематической погрешности и значениях его коррекции показывает, что дрейф систематической погрешности полностью не исключается при регулировках и медленно прогрессирует во времени. Для подтверждения полученных выводов в табл. 6 и 7 приведены оценки параметров законов распределения дрейфа систематической погрешности и значений ее коррекции при регулировках. Из полученных данных следует, что число регулировок СИ типа ИВО-1М очень стабильное, математическое ожидание (МО) значения коррекции дрейфа погрешности меняется от 8,48 до 8,64 м, что позволяет прогнозировать влияние регулировки на метрологическую надежность. Прогрессирующий дрейф во времени математического ожидания и среднего квадратического отклонения погрешности СИ типа ИВО-1М наглядно свидетельствует о том, что именно эта причина является основной при возникновении метрологических отказов. Уравнение дрейфа во времени погрешности ИВО-1М с учетом ежемесячных подрегулировок по данным табл. 6 и 7 имеет вид

$$Y(t) = 0,67 + 0,75t, \quad (3)$$

где t — время (мес).

Уравнение (2) позволяет оценить наработку на метрологический отказ, что необходимо для количественной оценки показателей метрологической надежности СИ типа ИВО-1М.

Анализ параметров надежности элементной базы импульсного фотометра ФИ-1 (табл. 8) позволяет сделать вывод о том, что 92,02 % всех отказов вызваны отказами всего 6 элементов. Остальные 7,98 % вызваны случайными отказами 5 элементов, которые указаны в табл. 8. Причем 65,06 % отказов вызваны отказами реле К2, К4, К5 коммутатора оптических каналов, а 19,04 % отказов вызваны механическим износом электромотора коммутатора. Наименьшую надежность из 6 основных элементов, дающих 92,02 % всех отказов, имеют коммутаторы и лампа ИСШ-7 фотометрического блока. Для повышения надежности СИ типа ФИ-1 необходимо заменить коммутаторы К2–К5.

Анализ отказов элементной базы СИ типов РДВ-3, ИВО-1М, ФИ-1 позволил выявить внешние проявления метрологических отказов, которые представлены в сводной табл. 9. Из таблицы можно сделать следующие выводы: 1) метрологические отказы в основном вызваны отказами ФЭУ, КГМ, ВК-А, ИСШ, R13; 2) оценка средних значений показателей надежности указанных элементов в целом определяет метрологическую надежность соответствующих СИ, что позволяет оценивать достоверности

Таблица 5

Параметры надежности элементной базы измерителя высоты облаков ИВО-1М

№ п/п	Элементы блоков			Параметры надежности					
	элемент	тип элемента	блок, узел отказа	количес- во отка- зов	доля от- казов от общего количес- тва, %	$\bar{T}$ мес	СКО $\bar{T}$	A_s	$\mathcal{E}_s$
1	Фотоэлектронный умножитель	ФЭУ-1	Фотоусилитель	23	12,13	16,0134	19,693	1,140	-0,260
2	Фотоусилитель	"	"	15	5,51	7,0387	16,734	2,022	2,458
3	Резистор R 88	ОМЛТ-0,55 5,6 кОм $\pm$ 10 %	Передачик	21	7,72	4,9795	8,904	1,733	1,447
4	Конденсатор C55	КБГ-П-2	"	10	3,67	1,4820	2,018	1,132	-0,126
5	Резистор R90	"	"	46	16,91	6,5461	11,585	2,136	3,072
6	Лампа импульсная	ИСП-100-3М	"	52	19,11	3,2788	9,682	5,100	26,812
7	Переключатель ПП	П2Т-5	Пульт управления, узел реле РЭС-6	25	9,19	17,1572	29,090	1,235	-0,348
8	Трансформатор Тр1	ЖФ4, 704,002 ПЭВ-20-1 кОм $\pm$ $\pm$ 10 %	Пульт управления, узел питания	21	7,72	25,3152	29,386	0,602	-1,361
9	Трансформатор Тр3	8П039 В	Пульт управления	6	2,20	13,1867	23,408	1,283	-0,218
10	Трансформатор Тр3	ТА260-127/220-50	То же	5	1,83	2,4620	4,358	1,029	-0,978
11	Мотор пере- датчика	АВЕ-0,52-4МУЗ	Премник	8	2,94	0,9750	0,904	0,614	-1,384

Продолжение табл. 5

№ п/п	Элементы блоков			Параметры надежности				
	элемент	тип элемента	блок, узел отказа	количество отказов	доля отказов от общего количества, %	$\bar{T}$ мес	$СКО_{\bar{T}}$	A_s Э _s
12	Тумблер Т3	Тумблер Т3	Пульс управления, панель	2	0,73	1,8888		
13	Резистор R11	БС-1,270 Ом $\pm$ 5 %	Пульс управления, узел трансформатора Тр3	2	0,73	5,6166		
14	Тумблер Т4	ТВ 2-1	Пульс управления, узел генератора калибровочных меток, анодная цепь Л4	1	0,36	6,1000		
15	Резистор R-76	ОМЛТ-1, 680 Ом $\pm$ 5 %	Фотоусилитель	2	0,73	5,2592		
16	Разъем В3	ЖФ3.642.015	Пульс управления цепи приемника и передатчика	3	1,10	0,6296		
17	Электровакuum- ная лампа	ЕНП-ЕВ	Пульс управления, узел АРУ	3	1,10	6,4444		
18	Резистор R27	ПЭВ-10, 5,1 кОм $\pm$ 5 %	Пульс управления, генератор калибровочных меток	1	0,36	0,0370		
19	Резистор R13	ЖФ3 640.005	Пульс управления, узел ЭЛТ	5	1,83	12,2037		
20	Конденсатор С56	КБГ-П-4-0,05	Передачик	1	0,36	0,2962		
21	Конденсатор С1	КБГ-МП-2-1000 В 0,25 мкФ $\pm$ 10 %	"	1	0,36	0,3703		

№	конденсатор С4	КМ-МН-2-1000 В 0,2 мкФ ± 10 %	1	0,36	0,3703
23	Предохранитель	ПК-45-3а	Пульг управления, узел питания	2	0,73
24	Конденсатор С45	КСО-2-500-В-560 ± ± 10 %	Фотоусилитель	1	0,36
25	Резистор R58	ОМЛТ-2,47 кОм ± 10 %	Пульг управления	1	0,36
26	Резистор R89	ОМЛТ-0,25 220 кОм ± 10 %	Фотоусилитель	1	0,36
27	Конденсатор С48	КЧОУ-9-200-0,22	»	3	1,10
28	Лампа Л12	6Ж1П-ЕВ	Пульг управления, видеоусилитель	1	0,36
29	Резистор R73	ОМЛТ-2 15 кОм ± 10 %	Фотоусилитель	2	0,73
30	Мотор передат- чика	АВЕ-0,52-4МУЗ	Передачик	2	0,73
31	Конденсатор С37	КСО-2-500-В-560 ± 10 %	Пульг управления, узел АРУ, цепь сетки Л8	2	0,73
32	Конденсатор С21	К-50-ЗБ-450-20	Блок пульта управления, узел питания, цепь про- селя Др1	1	0,36
33	Конденсатор С7	КСО-8-2000-3-4300 ± 5 %	Блок пульта управления, узел ждущего мульти- вибратора, анодная цепь Л1	2	0,73

0,6537

27,2222

0,1925

31,6296

2,2407

2,4000

5,6049

4,6296

5,1851

0,4444

0,1259

Таблица 6

Параметры закона распределения коррекции погрешности СИ
при регулировке ИВО-1М

Месяц регулировки СИ	Объем выборки	МО, м	СКО, м	A_s	$\mathcal{E}_s$	k
Апрель	322	8,64	10,42	2,79	13,78	3
Май	347	8,52	8,89	2,00	5,33	2
Июль	215	8,48	12,55	1,83	3,21	3

Месяц регулировки СИ	S	B	λ_k
Апрель	0,0123	$0,812 \cdot 10^2$	$\lambda_1 = 0,178 \cdot 10^1, \lambda_2 = 0,857 \cdot 10^0$ $\lambda_3 = 0,382 \cdot 10^0$
Май	0,0197	$0,507 \cdot 10^2$	$\lambda_1 = 0,169 \cdot 10^1, \lambda_2 = 0,357 \cdot 10^0$
Июль	0,0163	$0,614 \cdot 10^2$	$\lambda_1 = 0,173 \cdot 10^1, \lambda_2 = 0,679 \cdot 10^0,$ $\lambda_3 = 0,325 \cdot 10^0$

Таблица 7

Параметры закона распределения дрейфа погрешности СИ
за период между регулировками ИВО-1М

Месяц регулировки СИ	Объем выборки	МО, м	СКО, м	A_s	$\mathcal{E}_s$	k
Апрель	322	9,31	9,11	1,45	2,33	3
Май	347	9,25	10,90	2,51	11,19	8
Июнь	215	10,03	11,99	2,69	12,48	8

Месяц регулировки СИ	S	B	λ_k
Апрель	$0,195 \cdot 10^{-1}$	$0,512 \cdot 10^2$	$\lambda_1 = 0,176 \cdot 10^1, \lambda_2 = 0,801 \cdot 10^0$ $\lambda_3 = 0,401 \cdot 10^0$
Май	$0,121 \cdot 10^{-1}$	$0,823 \cdot 10^2$	$\lambda_1 = 0,177 \cdot 10^1, \lambda_2 = 0,780 \cdot 10^0$ $\lambda_3 = 0,312 \cdot 10^0$
Июнь	$0,99 \cdot 10^{-2}$	$0,101 \cdot 10^3$	$\lambda_1 = 0,175 \cdot 10^1, \lambda_2 = 0,780 \cdot 10^0,$ $\lambda_3 = 0,870 \cdot 10^0, \lambda_4 = 0,100 \cdot 10^0,$ $\lambda_5 = -0,24 \cdot 10^0, \lambda_6 = -0,48 \cdot 10^0$ $\lambda_7 = -0,39 \cdot 10^0, \lambda_8 = -0,25 \cdot 10^0$

Параметры надежности элементной базы импульсов фотометра типа ФИ-1

№ Элемент п/п	Тип элемента	Элементы блоков			Параметры надежности			
		блок, узел отказа	количество отказов	доля отказов от общего количества, %	$\bar{T}$ мес	СКО	A_s	Δ_s
1	Электромагнитный коммутатор	Блок отражателя призмного (пальцевого)	12	19,04	4,1892	3,603	0,481	-1,586
2	Реле К4	Блок фотометрический, измерительный блок, коммутация электрических каналов	15	23,80	5,3733	3,944	1,359	2,012
3	Не работает коммутатор	Коммутатор оптических каналов	7	11,11	7,5529	5,706	0,136	-1,383
4	Реле К5	Блок фотометрический, блок питания А6	8	12,69	8,2287	4,365	0,574	-0,547
5	Лампа ИСП-7	Блок фотометрический, узел лампы импульсной Л4	5	7,93	3,3880	3,231	0,133	-2,200
6	Реле К2	Блок фотометрический, измерительный блок, коммутация электрических каналов	11	17,46	6,4673	3,928	1,449	1,607
7	Транзистор Т1	Блок фотометрический, узел питания Д6	2	3,17	2,9111			
8	Транзистор Т9	Блок преобразователя функционального, узел А1	1	1,58				
9	Диод Д3	Д226 Д816Д	1	1,58	4,4814			
10	Резистор R30	ПЭВТ-10, 8 кОм ±5 %	1	1,58	45,0666			

полученных уравнений (1) и (2) дрейфа погрешности. Например, для СИ типа РДВ-3 по элементам ФЭУ, КГМ, БК-А оценка средней наработки на отказ $\bar{T} = 21,03$ мес, а наработка на метрологический отказ из уравнений дрейфа (2) при допуске на погрешность 1,0 % будет $\bar{T} = 24,86$ мес, что подтверждает достоверность сделанных выводов. Для СИ типа ИВО-1М оценка средней наработки на отказ $\bar{T} = 10,50$ мес, а наработка на метрологический отказ из уравнений дрейфа (3) при допуске на погрешность 10 мТ₂ = 12,44 мес. Полученные данные позволяют определить оценки погрешности расчета средней наработки на метрологический отказ по уравнениям (2) и (3): для РДВ-3 $\Delta_1 = T - \bar{T} = 3,83$ мес, для ИВО-1М $\Delta_2 = T - \bar{T} = 1,94$ мес.

Оценка показателей надежности и стабильности средств измерений МДВ и ВНГО включала в себя расчет параметров законов распределений коррекций основной погрешности, оценку параметров дрейфа основной

Таблица 9
Внешнее проявление метрологических отказов СИ
типов РДВ-3, ИВО-1М, ФИ-1

Отказавший элемент	Количество отказов	Внешнее проявление отказа
РДВ-3		
ФЭУ-31	79	Мала чувствительность, нет несущего напряжения, плохая отработка, мало несущее напряжение, нет отработки, нет показаний, занимает видимость, неустойчивые показания, нет опорного напряжения
КГМ	53	Не реагирует на изменение видимости, нет показаний прибора, мал световой поток, нет изменения луча, показания резко изменяются, нет отработки, медленная отработка, показания занижены
БК-А	8	Плохая отработка, нет опорного напряжения, показания не соответствуют фактической видимости, нет отработки, нет показаний, не реагирует на изменение видимости
ИВО-1М		
ИСШ	52	Не стабильно работает передатчик, нет генерации сигналов, нет сигнала на электронно-лучевой трубке, не работает передатчик, нет развертки на электронно-лучевой трубке, ложный импульс, показания занижены, нет высокого напряжения
ФЭУ	23	Не работает приемник, нет отработки сигнала, потеря чувствительности приемника, нет сигнала
RI3	5	Большая погрешность измерений, не калибруется шкала
ФИ-1		
К4	15	Нет выходного напряжения, не реагирует на изменение видимости
ИСШ	5	Мало опорное напряжение, обрыв провода в БП, показания меняются

огрешности СИ с учетом их подрегулировки, расчет параметров закона распределения наработки до метрологического и явного отказов элементной базы указанных выше СИ, а также расчет эмпирических функций распределения плотности вероятности указанных выше законов распределений (см. табл. 2, 3, 6, 7).

Оценка показателей надежности и стабильности средств измерений МДВ, ВНГО проводилась с помощью известного [2] специализированного комплекса программ для исследования надежности „GPSPR” (GENERAL ROBLEM SOLVER PARAMETRIKAL REABILITY). Оценка эмпирической функции плотности вероятности проводилась методом минимизации функции среднего риска.

Таким образом, определены показатели надежности элементной базы средств измерений МДВ и ВНГО, основные причины и внешние проявления их отказов, а также модели возникновения метрологических отказов. Результаты проведенных исследований позволили разработать конкретные рекомендации по повышению надежности указанных типов СИ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Окоренков В. Ю. Численный прогноз и оптимальное управление метрологической надежностью средств измерений (комплекс программ) — ОФАП Госкомгидромета. ВЦ ИИГМИ-МЦД, 1985, инв. № Ж 051050923.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ

Одним из важных видов метеорологических приборов являются средства измерений (СИ) атмосферного давления, большую группу из которых составляют ртутные манометры и барометры. Механизм возникновения необратимых (постепенных) метрологических отказов ртутных барометров и манометров обусловлен следующими факторами: изменением во времени физико-химических свойств рабочей жидкости (ртути); изменением во времени давления паров ртути и воздуха в вакуумированной трубке барометров и манометров; старением барометрической трубки и загрязнением ее окислами ртути; механическим износом, старением и разрегулированием отсчетной системы барометров и манометров.

Механизм возникновения обратимых метрологических отказов (перемежающихся, типа сбоя) вызван в основном следующими факторами: капиллярными процессами, происходящими в барометрической трубке; динамикой изменения во времени атмосферного давления; неточностью измерения температуры барометров и манометров; нарушением вертикальности их установки; систематическими, случайными и динамическими погрешностями поверки.

В процессе эксплуатации СИ кроме метрологических отказов, определяющих их метрологическую надежность, возникают явные (функциональные) отказы, определяющие нарушение их функционирования. При эксплуатации СИ возможны два типа явных отказов. Первый тип явного отказа может быть вызван практически мгновенным изменением определяющих отказ параметров, например, при резком внешнем воздействии (удар, разгерметизация и т. п.). Второй тип явного отказа может быть вызван накоплением необратимых изменений в материалах элементов конструкции СИ. В этом случае отличие данного отказа от постепенного метрологического состоит в том, что обычно определяющий отказ параметр не контролируется, а момент наступления отказа определяется явным образом по нарушению функционирования СИ. Как следует из определения указанных выше двух типов явного отказа, первый из них прогнозировать невозможно, а вот второй тип отказа может быть предотвращен, если известны модели отказа и их граничные условия. В общем случае именно поэтому явные отказы являются предельным случаем метрологических отказов. Задача определения граничных условий, при которых изменение метрологических параметров вызывает нарушение основных функций СИ, как известно [1], актуальна. От решения этой задачи зависит предупреждение экстремальных ситуаций, вызванных внезапными (явными) отказами СИ. Внезапный характер возникновения явных отказов не позволяет мгновенно предотвратить их последствия, сложность их причинно-следственных связей с метрологическими отказами является основной трудностью прогнозирования моментов и возникновения.

Целью настоящей работы является не только определение физических механизмов и возможных моделей возникновения метрологических отказов, но и оценка граничных значений факторов, определяющих условия перехода метрологических отказов в явные, что позволит в дальнейшем решить задачу их прогнозирования.

Как известно [2], высота ртутного столба зависит от нескольких факторов:

$$h(t) = \frac{2\gamma(t)}{\rho(t)r(t)g}, \quad (1)$$

где $\gamma(t)$ – функция изменения во времени поверхностного натяжения ртути, зависящая от чистоты ртути и стенок барометрической трубки; $\rho(t)$ – функция изменения во времени плотности ртути; $r(t)$ – функция изменения во времени радиуса барометрической трубки; g – ускорение свободного падения тел в месте установки барометров и манометров.

Механизм возникновения постепенных метрологических отказов ртутных барометров и манометров, вызванных изменением во времени плотности ртути и ее поверхностного натяжения, вытекает из известного уравнения Нернста:

$$E = E_0 - RTC_{\text{Hg}}/nFC_{\text{HgO}} \quad (2)$$

где E – потенциал окисления; E_0 – стандартный потенциал окисления ($T = 25^\circ\text{C}$, $p = 1 \text{ атм}$); R – газовая постоянная; F – число Фарадея; n – число электронов, участвующих в реакции; T – средняя температура ртути; C_{Hg} – концентрация ртути Hg ; C_{HgO} – концентрация окислов ртути HgO .

Реакция окисления ртути кислородом воздуха имеет затухающий характер и идет активно до момента образования на поверхности ртути окисной пленки и продолжается до равенства потенциалов окисления и стандартного. В результате реакции постепенно изменяется плотность ртути, образуется поверхностная пленка окислов, вследствие чего загрязняются стенки барометрической трубки и изменяется поверхностное натяжение ртути.

Внешними признаками необратимого метрологического отказа являются: изменение формы мениска ртути с выпуклой на плоскую, прилипание ртути к стенкам трубки барометров и манометров; возникновение налета окислов ртути на стенках барометрической трубки.

Для подтверждения приведенного выше механизма возникновения необратимых метрологических отказов было проведено несколько экспериментов [3]. В результате было установлено, что плотность ртути изменяется за 22 года эксплуатации барометров в среднем на 0,01 %, что соответствует изменению систематической составляющей основной погрешности на 0,01 гПа/год. Изменение потенциала окисления ртути марки Р2 при ее замене в коротком колене сифонно-чашечного барометра на ртуть марки Р1 (более чистая) вызывает полное затемнение короткого колена в недельный срок (явный отказ).

Изменение во времени радиуса барометрической трубки барометров и

манометров вызвано процессом постепенного сжатия резервуара трубки вследствие термического последствия стекла. Как известно, для стабилизации метрологических характеристик барометров и манометров их трубки подвергают искусственному старению путем воздействия высоких температур, 500–550 °С. При расширении стекла находящиеся в нем примеси исчезают, а стекло при охлаждении медленно сжимается. Процесс старения стекла продолжается на протяжении всей эксплуатации барометров и манометров. Модель необратимого метрологического отказа, обусловленного влиянием выше указанных физических процессов, может быть представлена в следующем виде:

$$\Delta(t) = \Delta_0 + B_0(1 - e^{-t/\mu_t}), \quad (3)$$

где $\Delta(t)$ – систематическая составляющая основной погрешности (гПа); Δ_0 – начальное значение систематической составляющей основной погрешности; B_0 – случайная нормально распределенная величина; μ_t – постоянная времени наработки.

Модель вида (3) получена по результатам ремонтов ртутных барометров в процессе их эксплуатации. Для оценки скорости изменения систематической составляющей основной погрешности барометров были использованы данные о ней до ремонта (удаления окислов ртути и чистки короткого колена) и после ремонта. Сравнение результатов расчета систематической составляющей основной погрешности по модели (3) с реальными данными, полученными в результате ремонта 20 образцовых барометров типа КР, позволило установить, что максимальная погрешность расчета не превышает $\pm 0,02$ гПа ($\mu_t = 11,58$ года, $B_0 = 0,18$ гПа/год, $\Delta_0 = 0,0$).

Как известно [3], явные отказы, вызванные рассмотренными выше процессами, возникают в ртутных барометрах и манометрах примерно через один и тот же период. Так, например, для образцовых барометров типа КР средняя наработка до явного отказа, вызванного изложенным выше механизмом, составляет 6,59 года, а для сетевых барометров типов СР-А, СР-Б – 6,78 года, для манометров типа МБП – 5,50 года. Как показал анализ, различия в наработке обусловлены различиями в конструкциях барометров и манометров, влияющих на интенсивность процесса возникновения отказа.

Полученные данные позволяют оценить предельные значения систематической составляющей основной погрешности, при накоплении которой наблюдается переход в явный функциональный отказ: для барометров типа КР $\Delta_c(t) = 0,078$ гПа, для барометров типов СР-А, СР-Б $\Delta_c(t) = 0,089$ гПа, для манометров типа МБП $\Delta_c(t) = 0,081$ гПа.

Таким образом, для предотвращения необратимого метрологического отказа и явного отказа ртутных барометров и манометров необходимо при изменении их поправок более чем на 0,07 гПа проводить профилактический ремонт, но не реже чем через 6 лет для ртутных барометров и 5 лет для ртутных манометров.

Кроме того, у ртутных барометров и манометров наблюдаются необратимые метрологические и явные отказы, вызванные изменением давления паров ртути и воздуха в их вакуумированной трубке.

Упругость газа в барометрической трубке, как известно, вызывает понижение ртутного столба, и, следовательно, ее изменение во времени может вызывать метрологические отказы. Упругость газа в барометрической трубке зависит не только от температуры, но и от давления. С изменением давления объем газа в барометрической трубке изменяется, а следовательно, изменяется и его упругость. При изменении давления на 10–30 мм рт. ст. систематическая составляющая основной погрешности может изменяться на 25–30 %. Кроме изменения давления на упругость воздуха и паров ртути в барометрической трубке влияет изменение температуры. Изменение упругости воздуха в зависимости от температуры можно определить по известной [2] формуле

$$p_T = p_0(1 + \alpha T), \quad (4)$$

где p_T – упругость воздуха при температуре T ; p_0 – упругость воздуха при температуре 0°C ; α – коэффициент расширения воздуха, равный $1/273$.

Например, при изменении температуры на 20°C систематическая составляющая основной погрешности, обусловленная изменением упругости воздуха, составит 7 %, так как изменение давления равно $20p_0/273$. Полностью избавиться от воздуха в барометрической трубке барометров и манометров очень трудно даже при современной технологии производства. Суть проблемы состоит в том, что на поверхности любого твердого тела при соприкосновении с газом образуется тонкий слой газа, пленка которого уплотнена. Это явление вызвано адсорбцией газов. На поверхности стекла кроме слоя воздуха всегда образуется тонкий слой водяных паров. Для удаления слоя водяных паров и воздуха с поверхности стекла барометрические трубки обжигают при температуре около $500\text{--}550^\circ\text{C}$. Однако полностью удалить слой адсорбированного воздуха и водяных паров невозможно. С течением времени под влиянием малого давления они переходят в пространство над ртутью барометров и манометров, что вызывает постепенные метрологические отказы. Кроме того, при эксплуатации барометров и манометров с течением времени в ртуть растворяется воздух, который затем постепенно под действием малого давления выделяется в барометрическую трубку и вызывает их метрологические отказы.

Даже в идеально изготовленном ртутном барометре или манометре в барометрической трубке всегда будут находиться пары ртути, которые постоянно оказывают давление на ртутный столб и уменьшают его высоту. При изменении температуры от 0 до 60°C существенно изменяется упругость паров ртути. Например, при 0°C упругость паров ртути составляет $0,0003$ гПа, а при температуре 60°C – $0,035$ гПа, что уже существенно влияет на систематическую составляющую основной погрешности барометров и манометров.

Как показали результаты исследований ртутных барометров и манометров, приведенный выше механизм возникновения постепенных метрологических отказов явно срабатывает на 20–23-й год их эксплуатации. Поэтому срок их эксплуатации необходимо ограничить периодом не более 20 лет. Результаты исследований [4], показали, что закон распределения

наработки до постепенных метрологических отказов, вызванных рассматриваемым механизмом для ртутных барометров и манометров, близок к нормальному. Поэтому в качестве модели необратимого метрологического отказа, вызванного изменением во времени остаточного давления воздуха и паров ртути в барометрической трубке ртутных барометров и манометров, можно использовать модель случайного линейного процесса веерного типа:

$$\Delta(t) = B_0 + A(t - t_0), \quad (5)$$

где B_0 – начальное значение основной погрешности, вызванное остаточным давлением воздуха и паров ртути (гПа); A – случайная нормально распределенная скорость изменения основной погрешности СИ, обусловленная влиянием различных факторов механизма отказа (гПа/год); t_0 – время начала эксплуатации СИ (год); t – текущее время на момент прогнозирования отказа (год).

С помощью модели вида (5) можно сформировать модель надежности постепенных метрологических отказов ртутных барометров и манометров в следующем виде:

$$P_M(t) = \Phi \left[\frac{B_0 - \Delta_1}{t\sigma_A(t)} - \frac{m_A(t)}{\sigma_A(t)} \right] + \Phi \left[\frac{\Delta_2 - B_0}{t\sigma_A(t)} - \frac{m_A(t)}{\sigma_A(t)} \right], \quad (6)$$

где $P_M(t)$ – вероятность безотказной работы СИ; $m_A(t)$, $\sigma_A(t)$ – математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение изменения во времени основной погрешности СИ; Δ_1 , Δ_2 – нижний и верхний пределы допускаемой погрешности СИ; Φ – функция Лапласа ($0,5 \leq \Phi \leq 1,0$).

Обнаружить признаки возникновения метрологического отказа можно по результатам периодических проверок барометров и манометров. Если изменение во времени поправок барометров и манометров положительно и стабильно, что определяется известным [5] выражением:

$$|\Delta \bar{x}| \geq t_S \sigma_{\Delta} / \sqrt{n}, \quad (7)$$

где $\Delta \bar{x}$ – математическое ожидание изменения поправок в течение двух МПИ; σ_{Δ} – среднее квадратическое отклонение изменения поправок; t_S – квантиль распределения Стьюдента при доверительной вероятности 0,95; n – количество проверок СИ, то механизм необратимого отказа действует и по модели вида (5) можно оценить наработку до метрологического отказа. Модель надежности вида (6) по заданной вероятности $P_M(t)$ позволяет оценить граничные значения контролируемых параметров.

Следующим механизмом необратимых метрологических отказов ртутных барометров и манометров являются случайные процессы старения, износа и разрегулирования системы наведения и отсчета.

Метрологические и явные отказы, вызванные износом и разрегулированием систем наведения и отсчета, как правило, возникают только у сифонно-чашечных барометров и манометров МБП. При износе систем наведения отказы, как правило, возникают из-за возникновения люфтов подвижной муфты с нониусом, подъемного винта, микрометрического кольца. В результате резко возрастает дисперсия в отсчетах давления

как следствие этого случайная составляющая основной погрешности. Износ лайкового мешка сифонно-чашечных барометров, как правило, вызывает приспускание ртути после подведения ее к индексу нулевого отсчета, что в свою очередь вызывает грубые ошибки в отсчетах давления, увеличивает случайную составляющую основной погрешности, а в предельном случае приводит к явным отказам и нарушению герметичности.

Кроме того, у всех ртутных барометров и манометров в процессе эксплуатации изнашиваются и стареют шкалы, что также способствует постепенному увеличению как систематической, так и случайной составляющей основной погрешности. Возникновение внезапных метрологических и явных отказов у барометров типа СР-А, СР-Б в целом ряде случаев вызвано самопроизвольным развинчиванием чашечки и изменением количества ртути в ней.

Типовые функции дрейфа систематической и случайной составляющих основной погрешности ртутных барометров и манометров, вызванные влиянием указанных выше необратимых процессов, были получены по результатам поверок за период более 30 лет по выборкам от 200 до 750 приборов с помощью известных программ [5].

Для барометров типа КР типовые функции дрейфа систематической и случайной составляющих основной погрешности имеют соответственно вид:

$$m(t) = 0,044 - 0,021t + 0,005t^2 - 0,0002t^3, \quad (8)$$

$$\sigma(t) = 0,010 + 0,005t. \quad (9)$$

Для барометров типов СР-А, СР-Б указанные типовые функции дрейфа имеют вид:

$$m(t) = 0,027 + 0,039t - 0,002t^2, \quad (10)$$

$$\sigma(t) = 0,043 + 0,018t - 0,0005t^2. \quad (11)$$

Для барометров типа ИР:

$$m(t) = 0,030 + 0,040t - 0,002t^2, \quad (12)$$

$$\sigma(t) = 0,030 + 0,024t - 0,0020t^2. \quad (13)$$

Для манометров типа МБП:

$$m(t) = 0,004 + 0,029t, \quad (14)$$

$$\sigma(t) = 0,013 + 0,016t, \quad (15)$$

где $m(t)$ – математическое ожидание систематической составляющей основной погрешности в момент времени t (гПа); $\sigma(t)$ – среднее квадратическое отклонение основной погрешности в момент времени t (гПа); t – текущее время (годы).

Полученные типовые модели дрейфа систематической $m(t)$ и случайной $\sigma(t)$ составляющих основной погрешности ртутных барометров и манометров позволяют прогнозировать их среднюю наработку до метро-

логического отказа, вызванного необратимыми случайными процессами изменения их метрологических характеристик, а также оценить оптимальное значение коррекции систематической составляющей основной погрешности.

Оптимальное значение коррекции поправки дрейфа систематической составляющей основной погрешности может быть найдено из известного [1] выражения:

$$\Delta_0(t) = (\Delta_1 + \Delta_2)/2 - m(t), \quad (16)$$

где Δ_1 и Δ_2 — верхнее и нижнее значения предела допускаемой систематической составляющей основной погрешности.

Следует отметить, что если $t \geq (\Delta_2 - \Delta_1)/2m(t)$, то $\Delta_0(t)$ необходимо устанавливать при положительных значениях как можно ближе к Δ_1 , а при отрицательных значениях — к Δ_2 . Однако при этом значение $\Delta_0(t)$ должно выбираться таким образом, чтобы при возможном появлении кратковременных обратимых изменений основной погрешности барометры или манометры оставались в работоспособном состоянии. Решение этой задачи требует определения моделей кратковременного дрейфа основной погрешности, которые описывают обратимые метрологические отказы, определения зоны допуска, в которой возможна регулировка дрейфа основной погрешности.

В настоящее время при поверке допускается регулировка систематической погрешности во всем диапазоне пределов допускаемой погрешности, что в ряде случаев является причиной возникновения как обратимых, так и необратимых метрологических отказов сразу после поверки.

Одним из процессов, способствующих возникновению обратимых метрологических отказов ртутных барометров и манометров, является случайный процесс изменения во времени поверхностного натяжения рабочей жидкости, вызванный капиллярными явлениями, происходящими в барометрической трубке. В силу того что на поверхности всякой жидкости существуют особые условия, на ней создаются несимметричные силы. Поверхностное натяжение вызывает молекулярное давление, направленное внутрь жидкости. Молекулярное давление зависит от рода жидкости и формы ее поверхности. Как известно [2], молекулярное давление на криволинейную поверхность выражается формулой:

$$p = k + \sigma \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R_1} \right), \quad (17)$$

где p — молекулярное давление на криволинейную поверхность; k — молекулярное давление на горизонтальную поверхность; σ — коэффициент поверхностного натяжения; R, R_1 — радиусы кривизны поверхностей рабочей жидкости, взятые в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Второй член выражения (17) определяет избыток или недостаток молекулярного давления на криволинейную поверхность по отношению к молекулярному давлению на горизонтальную поверхность. Избыток или недостаток давления зависит от формы мениска ртути. Если мениск

выпуклый (R и R_1 – положительны), то наблюдается избыток давления, а если вогнутый (R и R_1 – отрицательны), то наблюдается недостаток молекулярного давления.

Таким образом, уменьшение ртутного столба в сифонно-чашечных барометрах и манометрах под действием капиллярных сил зависит от разности кривизны менисков в барометрическом и коротком колене. В чашечном барометре молекулярное давление в трубке больше, чем в чашке, так как кривизна поверхности ртути в трубке больше, чем в чашке. Вследствие этого, в чашечном барометре будет наблюдаться уменьшение ртутного столба под влиянием избытка молекулярного давления в барометрической трубке.

Избыток молекулярного давления может быть определен по следующей известной [2] формуле:

$$\Delta p_{\text{и}}(t) = \frac{2\sigma_{\text{п}}(t)}{R(t)}, \quad (18)$$

где $p_{\text{и}}(t)$ – избыток молекулярного давления в момент времени t ; $\sigma_{\text{п}}(t)$ – поверхностное натяжение ртути в момент времени t ; $R(t)$ – радиус кривизны мениска ртути в момент времени t . Величина $R(t)$ изменяется во времени в основном в зависимости от тенденции давления. Величина $\sigma_{\text{п}}(t)$ изменяется во времени в основном в зависимости от загрязнения как самой ртути, так и поверхности барометрической трубки ее окислами. Уменьшение показаний барометров и манометров из-за избытка молекулярного давления входит в инструментальную поправку, определяемую при их проверке, и, следовательно, изменение во времени $\Delta p(t)$ может вызывать существенные изменения основной погрешности барометров и манометров. Как показали результаты многолетних исследований ртутных барометров и манометров, модель обратимого метрологического отказа, вызванного влиянием динамических характеристик тенденции измеряемого процесса, может быть представлена в следующем виде:

$$\Delta(\Delta p/\Delta t) = m_0(t) + 0,35\Delta p/\Delta t, \quad (19)$$

где $\Delta(\Delta p/\Delta t)$ – систематическая составляющая основной погрешности в момент времени t (гПа); $\Delta p/\Delta t$ – тенденция изменения давления (гПа/ч); $m_0(t)$ – систематическая составляющая основной погрешности при $\Delta p/\Delta t = 0$.

В общем виде модель обратимого метрологического отказа, вызванного как изменением высоты мениска ртути, так и капиллярной депрессией, приближенно можно выразить в следующем виде:

$$\Delta_k(\Delta p/\Delta t, t) = 0,50(\omega_0 - \omega(t)) + m_0(t) + 0,35\Delta p/\Delta t, \quad (20)$$

где $\Delta_k(\Delta p/\Delta t, t)$ – систематическая составляющая погрешности (гПа); ω_0 – высота мениска ртути при выпуске СИ из производства (мм); $\omega(t)$ – высота мениска ртути в барометрической трубке при эксплуатации в момент времени t (мм).

Модель вида (20) позволяет нормировать предельные условия возникновения обратимых метрологических отказов типа сбоя и прогнози-

ровать их возникновение непосредственно при эксплуатации. Так, например, при изменении высоты мениска ртути на 1 мм возникает метрологический отказ ртутных барометров типа СР-А, СР-Б и манометров МБП, так как предел их основной погрешности составляет 0,50 гПа, а для барометров типов КР, ИР предельное изменение высоты мениска не должно превышать соответственно 0,4 и 0,6 мм, что, очевидно, должно контролироваться при их поверке. Допускаемая в настоящее время при поверке ртутных барометров и манометров тенденция давления $\pm 0,50$ гПа/ч может вызывать погрешность $\pm 0,034$ гПа, что при устойчивом знаке тенденции может существенно искажать их поправки (на 8,5 %).

Следующим источником обратимых метрологических отказов являются неточности измерения термометром при барометре и манометре его температуры. Механизм возникновения метрологического отказа обусловлен неидентичностью измеряемой температуры средней температуре ртути, шкалы, чашки барометров, манометров. Как показали результаты исследований [4], модель обратимого метрологического отказа, вызванного влиянием указанного выше фактора, может быть представлена в следующем виде:

$$\Delta(t) = - \frac{p(\alpha(t_1 - t) - \beta(t_2 - t))}{1 + \alpha(t_1 - t)} \quad (21)$$

для сифонно-чашечных ртутных барометров и манометров;

$$\Delta(t) = - \frac{p(\alpha(t_1 - t) - \beta(t_2 - t))}{1 + \alpha(t_1 - t)} - 1,33 \frac{\nu}{A} (\alpha - 3\eta)(t_3 - t) \quad (22)$$

для чашечных барометров. Здесь $\Delta(t)$ – систематическая составляющая основной погрешности (гПа); β – коэффициент объемного расширения ртути ($\beta = 0,0001818$ °C); α – коэффициент линейного расширения шкалы ($\alpha = 0,0000184$ °C); p – измеряемое давление (гПа); ν – общий объем ртути в барометре (мм³); A – эффективная площадь чаши (мм²); η – коэффициент линейного расширения, определяющий расширение чаши и стеклянной трубки ($\eta = 0,000010$ на 1 °C); t_1 , t_2 , t_3 – средняя температура ртути, шкалы и чаши соответственно (°C); t – температура, измеряемая термометром при барометре и манометре.

Как показали результаты исследований, в условиях поверки градиенты температуры, как правило, не превышают $\pm 0,5$ °C, что составляет в соответствии с выражением (20) систематическую составляющую $\pm 0,087$ гПа при давлении 1070 гПа. Однако в реальных условиях эксплуатации барометров и манометров, особенно в зимнее время, градиенты температуры достигают 2–3 °C, что вызывает метрологические отказы типа сбоя. Например, при градиентах температуры 2,9 °C наблюдаются обратимые метрологические отказы барометров типа СР-А, СР-Б и манометров МБП, которые самоустраняются при стабилизации температуры.

В качестве модели надежности ртутных барометров и манометров, обобщающей рассмотренные выше случаи, можно предложить модель непрерывного марковского процесса с немонотонными реализациями,

которые при изменении параметра могли бы выходить за допустимый уровень погрешности и возвращаться обратно. Модель надежности по обратимым метрологическим отказам типа сбоя описывается диффузным распределением вида

$$P_m(t) = \left[1 - \exp \left(-\frac{2m^2(t)}{\sigma^2(t)} \right) \right] \cdot \Phi \left[\frac{x_{\max} - m(t)}{\sigma(t) \sqrt{x_{\max} t / m(t)}} \right]. \quad (21)$$

Физический смысл модели (21) состоит в том, что случайные реализации дрейфа основной погрешности не могут выйти за некоторые физические пределы $x_{\max}$ и возвращаются самопроизвольно в пределы допуска, что соответствует физике рассмотренных выше процессов возникновения метрологических отказов ртутных барометров и манометров.

Таким образом, в результате исследований определены основные механизмы обратимых и необратимых метрологических отказов ртутных барометров и манометров, разработаны и обоснованы модели их отказов и надежности, что позволяет реализовать оптимальное управление их состоянием при эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дружинин Г. В. Надежность автоматизированных производственных систем. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 480 с.
2. Кедров В. И. Метеорологические приборы. — Л.: Гидрометеоиздат, 1947. — 420 с.
3. МИ 83—76. Методика определения параметров поверочных схем. — М.: Изд-во стандартов, 1978. — 67 с.
4. Окоренков В. Ю. Разработка и обоснование теоретических моделей процессов, определяющих изменение метрологической надежности средств измерений. — Труды ГГО, 1985, вып. 476, с. 24—40.
5. Окоренков В. Ю. Численный прогноз и оптимальное управление метрологической надежностью средств измерений (комплекс программ). — ОФАП Госкомгидромета. ВЦ ВНИИГМИ—МИЦ, 1985, инв. № Ж 051050923.

МЕТОДИКА ФОРМАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ КЛИМАТИЧЕСКИХ НАГРУЗОК НА МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

Общеизвестно, что климатические факторы внешней среды негативно влияют на технические изделия и материалы, ибо расшатывают их внутреннюю структуру, изменяют рабочие свойства, а иногда даже химический состав. В этом отношении особые нагрузки испытывают метеорологические средства измерений (МСИ), эксплуатируемые во всех климатических районах и зонах загрязнения воздуха в условиях открытой атмосферы. Учет нагрузок, вызванных влиянием атмосферы при установлении межповерочных интервалов (МПИ) этих средств измерений, представляет практический интерес, так как позволяет экономить денежные средства, расходуя их на поверку только тех МСИ, метрологическая надежность которых уменьшилась до минимума [5].

Вообще говоря, МПИ для МСИ в системе Госкомгидромета СССР установлены нормативными документами типа РД 52.04.9-83 [1, 10]. К сожалению, из-за недостатков организации, скудности сведений с мест эксплуатации, несовершенства испытаний и экспериментов данные, собранные для подготовки РД, были невысокого качества. На их основе удалось установить (а следовательно, и учесть) лишь наиболее общие закономерности изменения свойств МСИ во времени и типичные причины отказов. Выделить же эффект воздействия климатических нагрузок по этим данным оказалось невозможным, поэтому поправки к МПИ, учитывающие эти нагрузки, в настоящее время получают расчетным путем по климатическим данным. Так, в РД 52.04.9-83 по среднегодовым значениям скоростей ветра, приведенным в Справочнике по климату СССР (ч. 3, вып. 1-34), определяется градация, учитывающая общую наработку, а следовательно, и износ вращающихся узлов первичного измерительного преобразователя анеморумбометров, вместе с ней определяется и соответствующий МПИ.

В публикации [5] в основу расчета положен другой более общий термодинамический, энтропийный подход. С точки зрения этого подхода атмосферные воздействия выводят МСИ из энергетического равновесия с внешней средой; как следствие между ними возникает энергообмен, сопровождающийся термической диссипацией части энергии в окружающую среду. В предельно неблагоприятном случае потери происходят за счет внутренней энергии МСИ; из-за этого возрастает внутренняя разупорядоченность их структуры, растет энтропия. В соответствии с таким воззрением расчет поправочных коэффициентов к МПИ строится на определении количества произведенной (в результате атмосферного воздействия) энтропии с использованием статистических параметров влияющих факторов, приведенных в ГОСТ 16350-80. Климат СССР [3].

Однако аппарат энтропийного, термодиссипативного метода еще только разрабатывается: не отработаны модели расчета энергопотерь для ряда воздействий, например для случаев пыльных бурь, изменений

химического состава воздуха при его загрязнении жидкими и твердыми частицами примесей и т. д.. Эта незавершенность усугубляется еще и отсутствием необходимых данных, например, данных о продолжительности увлажнения поверхностей технических изделий и образцов материалов в условиях атмосферы. Хотя некоторые оценки такого рода содержатся в ГОСТ 9.039–74 [2], но они не полные, так как представляют лишь сумму периодов выпадения атмосферных осадков и росы. В этой сумме не учтены периоды высыхания и периоды увлажнения зимой от разогрева образцов Солнцем.

Изложенное позволяет констатировать, что расчетный метод определения поправок на климатическую нагрузку к МПИ занимает доминирующее положение, а перспективы его совершенствования связаны, с одной стороны, с созданием и применением специализированных устройств наблюдений наподобие регистраторов поверхностного увлажнения [4, 6], а с другой, – с дальнейшим развитием самой методики расчета.

Развитие упомянутых выше моделей энтропийного термодиссипативного подхода сдерживается нехваткой знаний, например, об особенностях химических и фотохимических реакций, происходящих в загрязняющих примесях воздуха. В этом отношении расчетный метод можно несколько развить уже в настоящее время (не ожидая прогресса в смежных областях знаний) путем его формализации.

Цель настоящей статьи – исследование допустимости и практической ценности такой формализации для расчета поправочных климатических коэффициентов к МПИ.

В основе формального подхода лежат представления теории информации К. Шеннона о дезинформационном действии случайных помех на процесс транспортировки информации.

Легко предположить, что мы задались целью транспортировки информации во времени о взаимодействующей паре физических объектов: о техническом изделии и окружающей его воздушной среде, отвечающей требованиям нормальности. С точки зрения энергообмена технические изделия и такая среда находятся в динамическом равновесии. Атмосферные воздействия нарушают равновесие и выступают в качестве помехи процессу транспортировки информации об этой паре. Определив интенсивность дезинформационного действия помехи относительно воздушной среды, мы тем самым устанавливаем и степень неблагоприятности атмосферных воздействий на техническое изделие – второго объекта взаимодействующей пары. Отсюда следует принципиальная допустимость оценок атмосферных условий (их близости к так называемым нормальным условиям) для расчетов искомых поправочных климатических коэффициентов к МПИ. В этом находит своеобразное отражение внутренняя связь природы информационной энтропии с природой термодинамической энтропии.

Согласно К. Шеннону, количество дезинформации, вносимой атмосферными воздействиями, может быть определено через разность энтропий $q = H(X) - H(X/X_B)$ – энтропии $H(X)$ значений контролируемой метео-

рологической величины в нормальных условиях и энтропии $H(X/X_B)$ неопределенности значения (X) в интервале неопределенности вокруг полученного в условиях атмосферного воздействия показания (X_B) контрольного прибора, т. е. энтропии в условиях воздействий. Например, при равномерном распределении контролируемой величины в допустимом интервале ее отклонений в нормальных условиях $d = 2\Delta$ и при равномерном распределении контролируемой величины в интервале предельных значений воздействий от X_1 до X_2 энтропия $H(X) = \ln d = \ln 2\Delta$, а $H(X/X_B) = \ln(X_2 - X_1)$ и количество вносимой воздействием дезинформации во взаимодействующую пару

$$q = \left| \ln d - \ln(X_2 - X_1) \right| = \left| \ln \frac{d}{X_2 - X_1} \right| = \left| \ln \frac{1}{N} \right|, \quad (1)$$

где N — число градаций, интервалов, характерных для нормальных условий, уместающихся в диапазоне воздействия $X_2 - X_1$.

Предположим, что контролируется такой параметр, как температура воздуха. Согласно стандартам, допускаемые отклонения по этому параметру в нормальных условиях равны $(25 \pm 5)^\circ\text{C}$, т. е. $d = 10^\circ\text{C}$. Предположим, что контрольный термометр позволил зафиксировать температуру воздуха -15°C , тогда $X_2 = 30^\circ\text{C}$, $X_1 = -15^\circ\text{C}$. Не располагая сведениями о законе распределения вероятности появления отдельных значений воздействий при температуре от 30 до -15°C , мы вынуждены предположить их равную вероятность. Такое предположение позволяет применить формулу (1) и получить значение дезинформации, вносимой во взаимодействующую пару таким отклонением температуры, равное $|q| = -\ln[10/(30 + 15)] \approx 1,5$ бит.

Сходным образом по формуле (1) могут быть оценены другие виды атмосферных воздействий, связанные с отклонениями значений других метеорологических величин от их нормальных значений: атмосферного давления, влажности воздуха и т. д.

Однако приведенный пример пригоден для оценки степени неблагоприятности именно мгновенных отклонений контролируемых метеорологических величин. Значительно больший интерес представляют интегральные оценки отклонений за длительные сроки, например за год. Такие оценки опираются на результаты статистической обработки, в частности на климатические гистограммы, и поэтому более надежны. При работе с климатической гистограммой нет необходимости предполагать, что вероятность значений влияющей величины имеет равномерное распределение, так как закон распределения плотности вероятности представлен гистограммой.

Анализ дезинформационного действия случайных помех с различными законами распределения вероятности привел К. Шеннона к выводу, что вносимая помехой дезинформация не только определяется мощностью помехи (амплитудой отклонения), но еще и зависит от вида закона распределения плотности вероятности, т. е. от вида климатической гистограммы.

Однако, отказавшись при наличии гистограммы от условия равномерного распределения вероятности между градациями значений помехи, мы сталкиваемся с другой проблемой – проблемой применения формулы (1). Формула работоспособна только при сопоставлении двух равномерных законов распределения плотности вероятности, а один из них при интегральных оценках оказывается гистограммой, поэтому и формула (1) становится неприменимой. В этом случае может быть использован известный из информационной теории измерений прием замещения реальной кривой закона распределения или гистограммы на эквивалентный ей по энтропии прямоугольник равномерного закона.

Эквивалентное замещение позволяет в размере основания прямоугольника равномерного закона учесть как мощность атмосферной помехи через ее среднеквадратическое значение (σ), так и вид кривой гистограммы распределения вероятности различных значений помехи, т. е. учесть ее главные дезинформационные характеристики. Так, если закон распределения атмосферной помехи нормальный, размер основания прямоугольника эквивалентного замещения можно найти из соотношений

$$H(X/X_B) = (\ln(\sqrt{2\pi e} \cdot \sigma)) = (X_2 - X_1)^*, \text{ т. е. } (X_2 - X_1)^* = \sqrt{2\pi e} \cdot \sigma.$$

Аналогичным образом для треугольного закона распределения Симпсона имеем $(X_2 - X_1)^* = 2\sqrt{3e}/2 \cdot \sigma$ [7, 9].

Если распределение представлено гистограммой, то в соответствии с [9] справедливо выражение

$$(X_2 - X_1)^* = 2n \ln \exp \left(-\frac{1}{n} \sum_{i=1}^k m_i \ln m_i \right), \quad (2)$$

где k – количество разрядов, на которые разделен статистический ряд для построения гистограммы; l – длина интервала каждого разряда; n – полное число данных для построения ряда; m_i – количество данных, попавших в i -й интервал; $*$ – индекс интервала, полученного в результате энтропийного замещения.

Как следует из работы [5], для расчета МПИ удобны относительные интегральные оценки агрессивности условий климатических районов. При этом принимается, что в нормальных условиях при отсутствии атмосферных воздействий, т. е. в интервале коэффициент ресурсосбережения K_{AT} равен 1. При нарушении условий нормальности коэффициент K_{AT} может быть получен из отношения

$$K_{AT} = 1 - K = 1 - \frac{q}{q_{\max}} = 1 - \frac{\ln[d_n/(X_2 - X_1)^*]}{\ln[d_n/(X_2 - X_1)_{\max}^*]}, \quad (3)$$

где $\max$ – индекс воздействия максимальной интенсивности; n – индекс нормальности условий; K – коэффициент агрессивности атмосферных условий.

Если нормальное значение параметра атмосферы со своим интервалом $d_n = 2\Delta_n$ находится вблизи центра интервала $(X_2 - X_1)^*$ и делит его на

части со своими максимальными значениями атмосферной помехи, то для всего интервала воздействий интегральная оценка определяется средним значением

$$K_{AT_{cp}} = \frac{K_{AT}^n + K_{AT}^p + 1}{3}, \quad (4)$$

где л, п – индексы левой и правой частей разделенного интервала;

$$K_{AT}^{л(n)} = 1 - K^{п(n)} = 1 - \frac{\ln[\Delta_n/(X_2 - X_1)^*]}{\ln[\Delta_n/(X_2' - X_1')^*_{\max}]}. \quad (5)$$

При расположении точки нормального значения на краю интервала формула (4) принимает вид

$$K_{AT_{cp}} = \frac{K_{AT}^{п(n)} + 1}{2}. \quad (6)$$

По материалам табл. 6 ГОСТ 16350–80 для всех климатических районов по соотношениям (5) и (6) рассчитан ряд средних ресурсосберегающих коэффициентов $K_{AT_{cp}}$, а с помощью их получен ряд средних оценок агрессивности атмосферных условий по формуле

$$K_{cp} = 1 - K_{AT_{cp}}. \quad (7)$$

При расчетах воздействий температуры воздуха ниже 20 °С (индекс „л”) X_2 и X_2' принимались равными 30 °С, $\Delta_n = 5$ °С, а X_1' – равным абсолютному минимуму температуры, зарегистрированному в Оймяконе, т. е. – 71 °С. В качестве X_1 в соотношении (5) использовались значения годового минимума температуры воздуха в представительных пунктах климатических зон при вероятности 0,5. В результате расчета получен ряд K_{cp} , аналогичный ряду (А) в работе [5]:

А1.....	1,00	0,95	0,94	0,96	0,91	0,92	0,87
А1.....	0,84	0,83	0,80	0,79	0,68	0,78	0,76

Сходным образом был получен ряд оценок K_{cp} климатических районов, аналогичный ряду (Б) в работе [5], отображающий степень неблагоприятности атмосферы при воздействиях высоких температур воздуха. При расчете для температур воздуха выше 30 °С (индекс „п”) X_1 и X_1' принимались равными 20 °С, а X_2' – равным абсолютному максимуму температуры воздуха, зафиксированному в Термезе, т. е. 50 °С. В качестве X_2 использовались значения годовых максимумов температуры воздуха в представительных пунктах климатических районов при вероятности 0,05. Полученный ряд имеет вид:

В1.....	0,69	0,41	0,78	0,49	0,41	0,69	0,65
В1.....	0,61	0,69	0,73	0,65	0,69	0,86	1,00

По материалам табл. 25 ГОСТ 16350–80 для климатических районов был рассчитан ряд средних оценок агрессивности атмосферы, вызванной влиянием отклонений относительной влажности от нормального значения 62,5 %. Учитывая, что допускаемые отклонения от этого значения составляют 17,5 %, при расчете полагали $\Delta_n = 17,5 \%$. В результате проведенного расчета был получен ряд – аналог ряда (В) в работе [5]:

В1.....	0,69	0,71	0,73	0,75	0,73	0,75	0,75
В1.....	0,75	0,77	0,77	0,77	0,73	0,02	1,00

Подобным образом по материалам табл. 17 ГОСТ 16350–80 были определены значения величины K_{cp} для климатических районов, отражающие воздействия на технические изделия прямого солнечного излучения. В результате получен ряд – аналог ряда (Г) в работе [5]:

Г1.....	0,96	0,97	0,93	0,92	0,90	0,97	0,95
Г1.....	0,97	0,94	0,93	0,97	0,97	1,00	0,99

Каждый из климатических факторов вносит свой вклад в общую агрессивность. Так, в соответствии с диаграммой П. И. Коха [8] (приняв вклад влияния отрицательных температур за 100 %) имеем вклад положительных отклонений температуры воздуха 93 %, относительной влажности воздуха – 77 %, прямой солнечной радиации – 72 %. Учитывая такие доли вклада, при почленном сложении всех четырех рядов получим ряд – аналог ряда (Е) в работе [5]:

Е1.....	2,88	2,58	2,63	2,66	2,50	2,84	2,74
Е1.....	2,69	2,74	2,77	2,69	2,58	2,30	3,17

Как правило, мСи имеют единое всеклиматическое исполнение и МПИ для них устанавливается один в расчете на самую большую нагрузку. Естественно, для менее напряженных в климатическом отношении районов этот интервал может быть удлинен. Так, из ряда (Е1) следует, что наиболее напряженный – это район 11₁₂ – очень жаркой сухой. Нормируя ряд (Е1) на его максимальное значение (3,17), можно получить обратные ценкам агрессивности поправочные климатические коэффициенты к МПИ, аналогичные коэффициентам ряда (З) в работе [5]:

З1.....	1,1	1,2	1,2	1,2	1,3	1,1	1,2
З1.....	1,2	1,2	1,1	1,2	1,2	1,4	1,0

Из сопоставления ряда (3) и ряда (31) следует, что оценки климатических условий района 11_{12} как самого тяжелого при термодинамическом подходе и при формальном информационном совпадают. Подобным же образом практически совпадают оценки ряда других районов: 1_1 ; 11_{10} ; 11_1 ; 11_4 . Среднее значение коэффициента ряда (3) составляет 1,4, а ряда (31) 1,2, что указывает на то, что формальный подход дает более „осторожные“ оценки. Об этом свидетельствуют также максимальные значения коэффициентов рядов: если для первого значение равно 1,7, то для ряда (31) — только 1,4. Оценки второго ряда нивелированы больше, чем первого.

В целом же из изложенного можно сделать главный вывод, что коэффициенты, учитывающие воздействия атмосферы по формальным признакам, также пригодны для использования, как и климатические коэффициенты, полученные из термодинамических представлений. При этом в отличие от последних коэффициенты формального подхода могут учитывать не только отклонения значений измеряемых метеорологических величин от нормального значения, но также и негативные метеорологические явления: туман, переход температуры через 0°C , наличие пыльных бурь и т. д. Это является определенным преимуществом предложенного метода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Изменение № 1 к РД 52.04.9-83. — Л.: Отпеч. на множит. аппарате, ГГО, 1985. — 4 с.
2. ГОСТ 9.039—74. Единая система защиты от коррозии и старения. Коррозионная агрессивность атмосферы. — М.: Изд-во стандартов, 1976. — 20 с.
3. ГОСТ 16350—80. Климат СССР. Районирование и статистические параметры климатических факторов для технических целей. — М.: Изд-во стандартов, 1981. — 30 с.
4. Кожевников Б. Л. О юстировке регистратора поверхностного увлажнения. — См. наст. сб.
5. Кожевников Б. Л. Поправочные коэффициенты к межповерочным интервалам метеорологических средств измерений. — Труды ГГО, 1986, вып. 510, с. 122—127.
6. Кожевников Б. Л., Романов Б. В. Регистратор поверхностного увлажнения металлов. — Труды ГГО, 1973, вып. 313, с. 134—138.
7. Кожевников Б. Л. Эффективность учета законов распределения погрешностей. — Труды ГГО, 1981, вып. 452, с. 25—31.
8. Кох П. И. Климат и надежность машин. — М.: Машиностроение, 1981. — 174 с.
9. Новицкий П. В. Основы информационной теории измерительных устройств. — Л. Энергия, 1968. — 136 с.
10. РД 52.04.9-83. Межповерочные интервалы для средств измерения давления, скорости воздушного потока, характеристик солнечной радиации, эксплуатируемых в системе Госкомгидромета. — Л.: Отпеч. на множит. аппарате, ГГО, 1983. — 7 с.

О ЮСТИРОВКЕ РЕГИСТРАТОРА ПОВЕРХНОСТНОГО УВЛАЖНЕНИЯ

В работе [9] описан регистратор поверхностного увлажнения, предназначенный для специальных метеорологических наблюдений на сеттанций по испытаниям образцов металлов на устойчивость к атмосферой коррозии. За последнее время интерес к прототипам и аналогам [1-4] одобного устройства заметно вырос. Это вызвано, с одной стороны, силивающимся вниманием общества к экологии, к вопросам благоприятности атмосферных условий для жизни человека, животных и растений, а с другой – потребностями практической деятельности, в частности, перативным метеорологическим обслуживанием полетов воздушных удов, оптимизацией климатической защиты технических изделий и ооружений. Капельножидкие пленки, сформированные росой, оказывают существенное влияние на физиологические процессы в растениях, собенно произрастающих в местах с малым количеством осадков [6]. ленки влаги необходимы также для жизнедеятельности грибков и лесени [5]. Тонкие слои воды на поверхности физических объектов лужат средой для растворения газов и солей. Образующиеся при этом лектролиты вызывают коррозию металлов, снижение объемного и оверхностного сопротивления изоляционных материалов и зачастую риводят к поражению технических изделий в целом [7]. Капельножидие водные покрытия остекления кабин транспортных средств ухудшают идимость, затрудняют управление.

С точки зрения метрологов, регистратор поверхностного увлажнения РПУ), описанный в публикации [9], представляет собой индикатор электропроводности для обнаружения и записи периодов существования на оверхности материальных объектов капельножидких и смешанных имически активных пленок воды. Принцип действия регистратора снован на скачкообразном увеличении проводимости электролитической ячейки приемного элемента при появлении пленки водного электроита между электродами.

Приемные электролитические ячейки РПУ в первоначальном виде представляли собой стандартный прямоугольный образец металла 80x120x3 мм; образцы таких размеров используют при исследованиях на оррозионную устойчивость металлов в атмосфере на испытательных ганциях. На поверхности образца был укреплен накладной электрод из эго же металла 180x10x3 мм. В процессе модификации была разработана есколько иная конструкция, исключающая краевые эффекты. Основу гой конструкции составил круг диаметром 100 мм из трехмиллиметрового листа стали Ст. 3, на поверхности которого также был закреплен руг меньшего диаметра (80 мм), изготовленный из того же листа и изолиованный от первого фторопластовой пленкой толщиной 20 мкм. Кроме эго, для обнаружения водных пленок на поверхностях любых объектов, апример на листьях растений, номенклатура приемных электролитических ячеек при модификации была дополнена гибкими конструкциями на

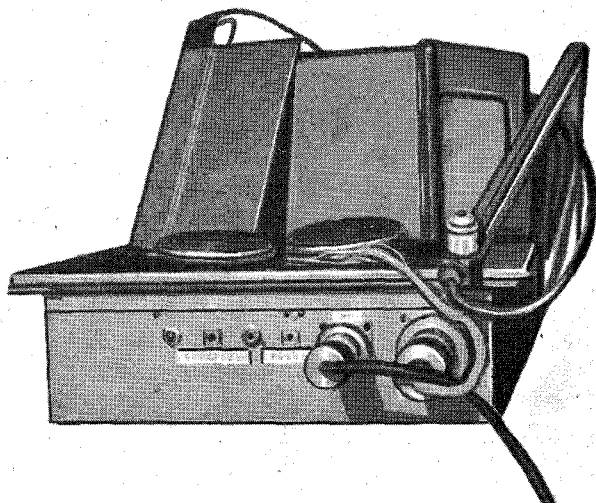


Рис. 1. Типы приемных ячеек.

основе витых тонкопроволочных электродов с венифлексовой изоляцией. Все типы приемных ячеек можно видеть на рис. 1.

Приемные элементы в первоначальном варианте индикатора включались в качестве одного из плеч измерительного моста переменного тока, при этом во второе, компенсирующее плечо вводился резистор с пороговой проводимостью, шунтированный конденсатором. Питание моста осуществлялось от источника переменного тока прямоугольной формы с частотой 100 Гц через две обмотки трансформатора, которые служили другими плечами измерительного моста. Первичная обмотка трансформатора была запитана от мультивибратора. Напряжение разбаланса моста с измерительной диагонали поступало на усилитель и синхронный детектор, на выходе которого и было установлено пороговое устройство. Это устройство приходило в действие при достижении сигналом напряжения срабатывания порогового реле, которое в свою очередь включало основной и резервный пишущий механизм отметчика времени. Каждый РПУ имел пять параллельных измерительных каналов с общим блоком питания, общим устройством регистрации — десятиканальным щитовым отметчиком времени, а также общим автоматическим прерывателем питания измерительных мостов.

Настройка и доведение погрешности измерительных каналов РПУ до установленных значений, т. е. их юстировка, проводились индивидуально для каждого канала магазином сопротивлений, шунтированным емкостью, компенсирующей емкость соответствующей приемной электролитической ячейки на пороге срабатывания. Погрешность измерительного канала доводилась до $\pm 1,5\%$ от значения порога проходимости 14,3 мксм, что соответствует сопротивлению 70 кОм. При проведении натурного эксперимента с двумя РПУ [8] было установлено, что дополнительная погрешность срабатывания каналов на пороге, вызванная отклонениями

температуры окружающего воздуха в пределах $\pm 20^\circ\text{C}$ и отклонениями напряжения питания сети в пределах $\pm 15\text{ В}$, составила $\pm 2\%$.

С целью улучшения рабочих характеристик, в том числе метрологических, и удовлетворения возрастающих требований заказчиков проведенная модернизация РПУ помимо перевода на современную элементную базу была направлена на совершенствование самой структурной схемы индикатора.

В первую очередь была устранена систематическая составляющая погрешности измерения каналов на пороге срабатывания, на которую приходилась значительная часть вышеупомянутой допускаемой погрешности $\pm 1,5\%$ от значения порога срабатывания.

Под ее влиянием при подключении имитатора порогового состояния ячейки срабатывала только часть каналов РПУ, тогда как другая часть не срабатывала, хотя все каналы отвечали по точности требованию $\pm 1,5\%$. Это ухудшало рабочие свойства индикатора, служило источником методических погрешностей РПУ, так как при прочих равных условиях в реальной атмосфере каналы регистрировали периоды увлажнения разной длительности. Причем разница в длительности записей увеличивалась с возрастанием времени нахождения приемных ячеек в пороговом состоянии, как правило, — в туманах.

Для устранения упомянутого источника погрешностей при модернизации была изменена структурная схема РПУ: параллельные измерительные каналы были заменены одним каналом с коммутируемым входом и выходом. Такое изменение структурной схемы практически гарантировало устранение систематической составляющей погрешности измерений и тем самым однозначную реакцию измерительного канала на входной сигнал вне зависимости от входа, по которому он пришел.

Измерительный канал и его коммутатор представлен на схеме рис. 2, где через Я1, Я2, ... обозначены приемные электролитические ячейки, через К1.1, К2.1, ... — контакты реле Р1, Р2, ... для подключения ячеек к измерительному устройству; К7.1, К8.1, ... — контакты реле Р7, Р8, ... для соответствующего переключения пишущих механизмов самописца — отметчика времени. Задающая часть коммутатора представляет собой генератор прямоугольных импульсов с частотой следования 1 Гц, генератор имеет кварцевую стабилизацию, выполненную на микросхеме К176 ИЕ5. Импульсы генератора поступают на делитель с коэффициентом деления 12, представляющий собой два последовательно соединенных делителя с коэффициентами деления 3 и 4. С делителя импульсы с частотой следования $F_{\text{след}} = 1/12\text{ Гц}$ поступают на десятичный счетчик с дешифратором, который выполнен на интегральной микросхеме К176 ИЕ8. При этом у дешифратора используются только первые пять выходов, сигналы с которых поступают на выделитель канальных импульсов и далее на электронные ключи. Нагрузкой каждого из электронных ключей служит пара реле типа РЭС-10, соединенных параллельно. Длительность канального импульса составляет $\tau_{\text{и}} = 500\text{ мс}$, т. е. половину секунды. Таким образом, электронный коммутатор работает в двух направлениях и позволяет опросить в течение 1 мин пять датчиков — пять приемных электролити-

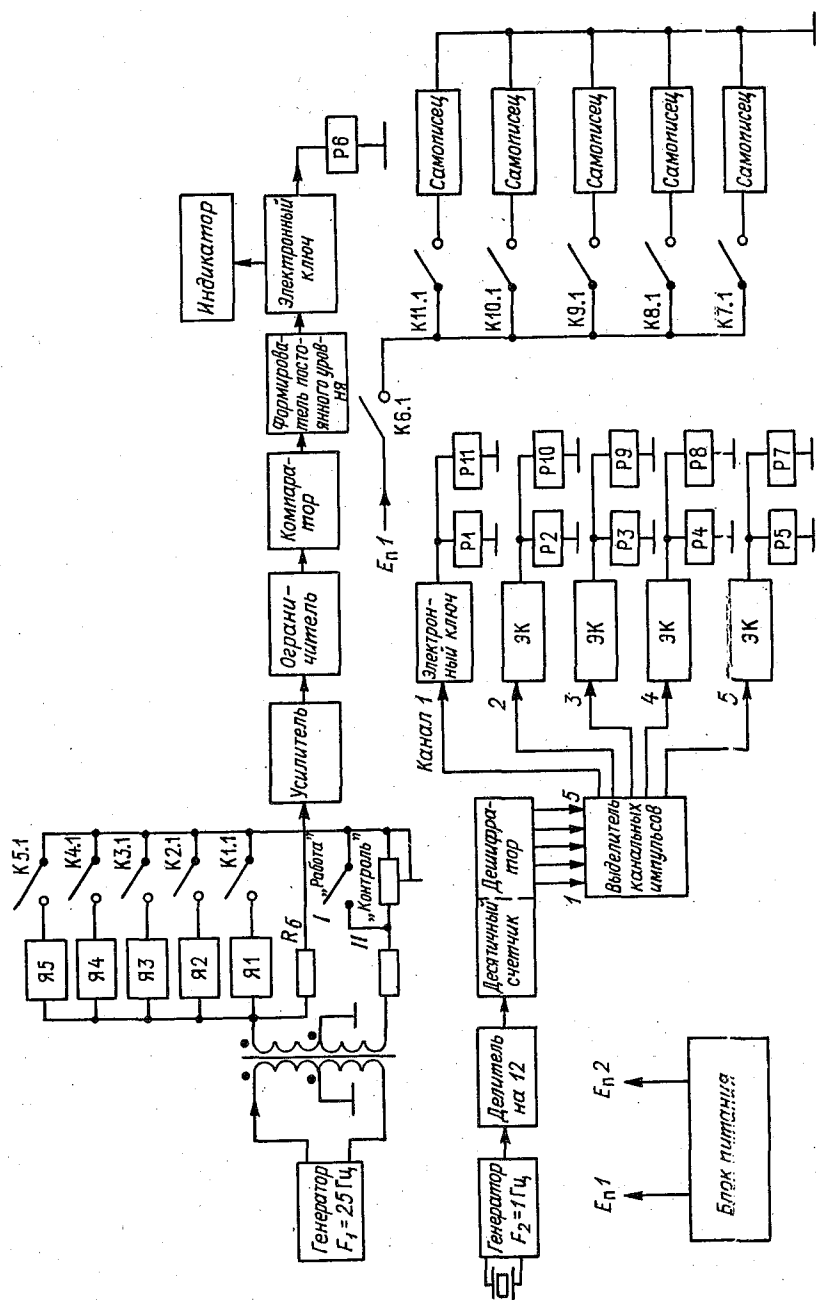


Рис. 2. Схема измерительного канала и его коммутатора.

ческих ячеек Я1, Я2, ..., Я5. В целом электронный коммутатор выполнен на 10 интегральных микросхемах серии К561 и К176 и 10 транзисторах.

Применение интегральных микросхем, выполненных по КМОП-технологии, позволило существенно поднять надежность коммутатора и свести до минимума потребляемую энергию. Описанный коммутатор обладает также еще таким положительным свойством, как нечувствительность к питающему напряжению: коммутатор работает при изменении питающих напряжений от +9 до +12 В и не требует стабилизатора напряжения питания.

Для повышения точности измерительного канала при модернизации его схема также была переработана. Схема питания измерительного моста была выполнена на таймере КР1006 ВИ1 и на интегральной микросхеме К531 ЛАЗП, имеющей мощный выход, а также на трансформаторе с отводами от средних точек первичной и вторичной обмоток. Частота следования прямоугольных импульсов от такой схемы составляет $F_{\text{след}} = 40$ мкс. Схема запитана от стабилизатора напряжения +5 В, выполненного на транзисторе КТ817В и на стабилитроне КС147А. В результате схема питания измерительного моста обеспечивает парафазный сигнал с амплитудой 2,5 В.

В процессе модернизации определенные изменения были внесены в сам измерительный канал. В новой модификации канал состоит из входного усилителя с большим входным сопротивлением, выполненным на операционном усилителе КР544 УД2А, в котором для повышения точности измерений предусмотрена балансировка нуля усилителя. В состав канала был введен также ограничитель, прецизионный двоярный компаратор ИМС521 СА1, позволяющий установить порог срабатывания при разбалансе измерительного моста с точностью до 3 мВ. Также был введен формирователь импульсов и электронный ключ, выполненный на ИМС155 ЛАЗ и 155 ЛН1 и на транзисторах КТ315В и КТ817В, включенных по схеме Дарлингтона. Нагрузкой электронного выходного ключа канала является реле Р6 типа РЭО-10, зашунтированное конденсатором большой емкости. С контактов этого реле при его срабатывании поступает напряжение 12 В на контрольный светодиод и через контакт К6.1 на основной и дублирующий пишущий механизм отметчика времени, подключенные в данный момент коммутатором к выходу измерительного канала. Питание измерительного канала осуществляется от стабилизированного источника напряжения ± 12 В. Уровень переменной составляющей в питающих напряжениях установлен меньше порога срабатывания компаратора, т. е. меньше 3 мВ. Схема вторичного питания также была переработана с учетом всех вышеописанных изменений.

В отношении повышения точности измерений РПУ особо следует отметить изменения, которые были внесены в схему измерительного моста. В предшествующем варианте в плечи моста были включены резистор и приемная электролитическая ячейка. Сопротивление этой ячейки, находящейся в сухом состоянии, значительно превосходит сопротивление резистора, а во влажном состоянии — существенно меньше этого сопротивления. И только в короткие промежутки времени их электро-

проводности сравнимы, но именно эти короткие периоды и являются рабочими, так как позволяют зарегистрировать переход поверхности из одного состояния в другое. В остальное время измерительный мост находится в разбалансированном состоянии, что затрудняет его работу и вызывает неопределенность в моменты перехода, т. е. в конечном счете — погрешность.

В отличие от описанной схемы в новом варианте РПУ измерительный мост априорно сбалансирован, причем с напряжением разбаланса, близким к нулю, а приемная ячейка подключается к нему коммутатором только на короткое время (0,5 с), подключается при этом параллельно одному из постоянных плеч моста. В случае когда приемная ячейка сухая и имеет большое сопротивление, такое подключение не влияет на баланс моста. С увеличением увлажненности поверхности приемной ячейки растет ее электропроводность, а следовательно, и эффект от шунтирования плеча измерительного моста. На выходе моста появляется напряжение разбаланса и, когда оно достигает порога компаратора, происходит его срабатывание и соответствующая пара пишущих механизмов отметчика времени начинает регистрацию периода увлажнения. При этом на лицевой панели РПУ загорается контрольный светодиод, сигнализирующий о срабатывании измерительного канала.

Наиболее важным элементом новизны в модернизированном РПУ является применение в нем встроенного устройства контроля метрологических характеристик, позволяющего периодически через произвольные интервалы времени юстировать измерительный канал. Для этого на лицевую панель выведен переключатель режима работы РПУ из нормального в контрольный. Если в нормальном режиме на вход измерительного моста коммутатор периодически подключает приемные ячейки Я1, Я2, ..., то в режиме контроля работа коммутатора приостанавливается, а вход измерительного моста оказывается свободным. Нажатием специальной кнопки „контроль“, также выведенной на лицевую панель РПУ, оператор может подключить к этому свободному входу имитатор порогового состояния приемной ячейки. При свободном входе, как было отмечено выше, измерительный мост априорно сбалансирован, измерительный канал находится в исходном состоянии, сигнальный светодиод на лицевой панели не светится. При нажатии кнопки „контроль“ на вход измерительного моста подключается имитатор порога, вызывает его разбаланс, равный 2 % порогового значения выходного напряжения. Так, если порог проводимости установлен на уровне 14,3 мкСм (70 кОм), то сопротивление имитатора, выполненного на резисторах ПТМН-1, составляет $68,5 \pm 0,2$ кОм. При подключении такого сопротивления, имитирующего повышенную примерно на 2 % проводимость приемной ячейки, измерительный канал РПУ должен сработать, о чем должен сигнализировать оператору контрольный светодиод на лицевой панели. При отсутствии сигнала оператор делает вывод о наличии погрешности измерительного канала и устраняет ее перебалансировкой измерительного моста. Для этого в одно из плеч моста включен переменный резистор типа СП5-2В, к регулятору которого конструкцией РПУ обеспечен свободный доступ.

ем самым оператор выполняет либо контроль юстировки РПУ, либо саму юстировку. После проведения этой операции РПУ переключателем переводится в режим нормальной работы, в режим измерений и регистрации:

Использование встроенного устройства контроля и юстировки, а также применение единого измерительного канала повышенной чувствительности позволили практически удвоить точность модернизированного РПУ и за счет этого существенно уменьшить методическую погрешность записей периодов увлажнения приемных элементов.

В заключение следует отметить возможности по дальнейшему совершенствованию РПУ путем автоматизации самой операции юстировки, применения встроенного микропроцессора с выходом на цифропечать. Уже в настоящее время такой РПУ с автоматической юстировкой может быть положен в основу датчика атмосферных осадков для автоматических информационно-измерительных систем или в основу индикатора систем сбора и химического анализа воды выпадающих гидрометеоров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. с. № 697886 (СССР). Измеритель продолжительности атмосферной коррозии /Б. Л. Кожевников. Заявл. 26.06.78, № 2636189. Оpubл. 15.11.79. — В кн.: Свод изобрет. СССР, 1979, № 42.
2. А. с. № 440629 (СССР). Измеритель толщины жидких осадков /Б. Л. Кожевников. Заявл. 09.11.72, № 1848347. Оpubл. 25.08.74. — В кн.: Свод изобрет. СССР, 1974, № 31.
3. А. с. № 357503 (СССР). Измеритель продолжительной атмосферной коррозии /Б. Л. Кожевников. Заявл. 01.04.71, № 16416661. Оpubл. 31.10.72. — В кн.: Свод изобрет. СССР, 1972, № 33.
4. А. с. № 357539 (СССР). Микрокоррозионный элемент /Б. Л. Кожевников. Заявл. 01.04.71, № 1641662. Оpubл. 25.08.74. — В кн.: Свод изобрет. СССР, 1972, № 31.
5. Благник Р., Занова В. Микробиологическая коррозия. — М.: Химия, 1965. — 254 с.
6. Карпенко В. Н. Роса. — Л.: Гидрометеиздат, 1974. — 102 с.
7. Кожевников Б. Л. О регистрации капельножидких пленок поверхностного увлажнения изделий. — Труды ГГО, 1973, вып. 313, с. 128—133.
8. Кожевников Б. Л. Результаты эксперимента с регистраторами фазовых пленок увлажнения. — Труды ГГО, 1976, вып. 346, с. 49—54.
9. Кожевников Б. Л., Романов Е. В. Регистратор поверхностного увлажнения металлов. — Труды ГГО, 1973, вып. 313, с. 134—138.

СОДЕРЖАНИЕ

Б. Л. Кожевников, В. Ф. Фомин. Актуальные задачи метрологии метеорологических измерений	1
В. Ф. Фомин. Применение энтропии Колмогорова в метеорологических измерениях.	2
В. Ф. Фомин. Измерения и теория необратимости динамических систем	3
Ю. В. Рогалев. Анализ методов поверки средств измерения параметров ветра	5
В. Ю. Окоренков. Анализ методов поверки средств измерений атмосферного давления	5
Б. В. Куров. Анализ методов поверки датчиков влажности воздуха	6
Ю. В. Рогалев, К. Г. Скворцов. Анализ результатов исследований по хранению рабочего эталона единицы скорости воздушного потока	7
Ю. В. Рогалев, Б. В. Куров, Н. П. Фатеев. Ведомственная поверочная схема для средств измерений скорости воздушного потока	8
В. Ю. Окоренков. Основные аспекты теории метрологической надежности для метеорологических средств измерений	9
В. Ю. Окоренков, М. З. Ахмедов. Автоматизированная система управления метрологическим обеспечением метеорологических средств измерений	10
В. Ю. Окоренков, В. И. Кусуров. Обнаружение метрологических отказов метеорологических средств измерений	11
В. Ю. Окоренков. Исследования метрологической надежности метеорологических термометров	12
В. Ю. Окоренков. Метрологическая надежность метеорологических средств измерений скорости воздушного потока	13
В. Ю. Окоренков. Исследование надежности средств измерений метеорологической дальности видимости и высоты нижней границы облаков	14
В. Ю. Окоренков. Исследование метрологической надежности средств измерений атмосферного давления	15
Б. Л. Кожевников. Методика формальной оценки климатических нагрузок на метеорологические приборы	16
Б. Л. Кожевников, В. В. Железнов. О юстировке регистратора поверхностного увлажнения	17