

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР  
ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ  
И КОНТРОЛЮ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

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

*Выпуск*

**491**

МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
И ВОПРОСЫ ПОВЕРКИ  
МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ

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



ЛЕНИНГРАД ГИДРОМЕТЕОИЗДАТ 1985

778

УДК 551.501+551.508.824:389

В сборнике представлены результаты исследований принципов построения рабочего эталона скорости воздушного потока. Приводится анализ погрешностей механического, пневмометрического, теплового, искрового, лазерного и других методов измерений. Рассматриваются вопросы метрологической надежности, аттестации и поверки метеорологических приборов. Оценивается влияние метеорологических условий на качество приборов.

Сборник предназначен для специалистов-метеорологов, а также для преподавателей и учащихся высших и средних учебных заведений.

551.508

М 1903040000-III 48-84(I)  
069(02)-85

© Главная геофизическая  
обсерватория им. А. И. Воей-  
кова (ГГО), 1985.

Ленинградский  
Гидрометеорологический ин-т  
БИБЛИОТЕКА  
Л-д 195126 Малоохтинский пр., 98

## ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ РАБОЧЕГО ЭТАЛОНА СКОРОСТИ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА

Точные измерения скорости воздушных потоков необходимы для удовлетворения потребностей народного хозяйства в достоверных метеорологических прогнозах, решения различных проблем охраны окружающей среды, при комплексном исследовании взаимодействия океана и атмосферы, а также в других областях науки и техники.

В настоящее время в эксплуатации находится большое количество средств измерений (СИ), скорости ветра, основанных на различных принципах измерения. Для надлежащего метрологического обеспечения (МО) в ряде ведомств и в частности в системе Госкомгидромета СССР /7/, разработаны локальные поверочные схемы. Однако в масштабах страны, единство измерений в этой области не обеспечено ввиду отсутствия эталона единицы скорости воздушного потока и общесоюзной поверочной схемы для данного вида измерений.

До настоящего времени в качестве образцового СИ (ОСИ) скорости воздушных потоков применяются следующие СИ и поверочные установки:

- образцовая установка высшей точности /5/,
- дифференциальные напорные трубки Пито,
- аэродинамическая труба (АТ), в которой измеряется скорость воздушного потока по разности давления в сечениях входа и выхода конфузора,
- термоанемометры (ТА),
- механические анемометры группы А.

Образцовая установка высшей точности обеспечивает воспроизведение и измерение скорости воздушного потока с  $\delta = 1-1,5\%$  в диапазоне 0,5-100 м/с. Данная установка представляет собой АТ замкнутого типа с открытым рабочим участком. Скорость потока измеряется с помощью лазерного анемометра и по перепаду давлений в сечениях входа и выхода конфузора. До создания рабочего эталона эта установка является пока исходным образцовым средством в данной области измерений.

Дифференциальные напорные трубки (ДНТ) I-го разряда являются исходными ОСИ в системе Госкомгидромета СССР. Диапазон и погрешность измерения скорости воздушного потока напорными трубками определяются характеристиками дифференциальных манометров, применяемых в качестве регистрирующих приборов в комплекте с трубками. Для ДНТ I-го разряда применяются дифференциальные манометры класса точности не выше 0,02. Исследования показали, что существующие дифференциальные манометры обеспечивают измерение скорости ДНТ I-го разряда с  $\delta = 1,2-2\%$ , начиная с 5 м/с.

При градуировке и поверке СИ скорости воздушного потока применяются образцовые аэродинамические трубы, которые изготавливаются по индивидуальным проектам.

Для диапазона скоростей менее 5 м/с серийно выпускаемые ОСИ отсутствуют. Иногда для этой цели используется зависимость скорости воздушного потока в рабочей части АТ от числа оборотов импеллера, которая при аттестации АТ устанавливается с помощью термоанемометра. Исследования показали, что погрешность определения средней скорости воздушного потока указанным методом находится в пределах от 5 до 10 % (рабочие СИ имеют погрешность 19-55 %) /2/. Существенным недостатком этого метода является необходимость индивидуальной градуировки АТ для каждого поверяемого типа СИ.

Для аттестации ОСИ 2-го разряда в диапазоне скоростей 0,3-5 м/с были разработаны и аттестованы опытные образцы двухсопловой АТ /3/. Исследования показали, что такие АТ обеспечивают воспроизведение и измерение скорости по перепаду давления на малом конфузоре с погрешностью не более 2 % /4/.

Для аттестации АТ и измерения скорости воздушного потока в диапазоне 0,2-5,0 м/с в настоящее время применяются термоанемометры, которые аттестуются в двухсопловой АТ методом непосредственного сличения с ДНТ 1-го разряда /6, 7/. Исходные ОСИ 1-го разряда аттестуются в гидродинамической установке гравитационного типа /5/.

Для создания рабочего эталона скорости воздушного потока необходимо решить три основные задачи.

В первую задачу входит создание технического средства воспроизведения скорости воздушного потока в диапазоне 0,2-60 м/с, охватывающем весь диапазон измерения скорости ветра существующими СИ. При этом создаваемый воздушный поток должен удовлетворять необходимым требованиям по неравномерности поля скоростей в рабочей зоне, турбулентности пульсаций, стабильности потока во времени и скосу потока в любой точке в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

Вторая задача состоит в разработке средств измерения скорости воздушного потока, удовлетворяющих всем необходимым требованиям, предъявляемым к ОСИ.

И, наконец, третья задача включает в себя разработку методики оценки метрологических характеристик измерительного комплекса в целом. К этим характеристикам следует отнести: предел допускаемой основной погрешности измерения скорости потока измерительным комплексом и предел допускаемой основной погрешности определения коэффициента сопла АТ.

Решение первой задачи не представляет в принципе каких-либо трудностей. В настоящее время разработаны и внедрены различного ти-

па и класса АТ способные воссоздать потоки необходимого качества в широких пределах скоростей.

На основе анализа метрологического обеспечения средств измерений скорости воздушного потока можно сформулировать основные требования к рабочему эталону: диапазон создаваемых скоростей 0,2-60 м/с, предел допускаемой основной погрешности  $\Delta_d \leq \pm (0,05 + 0,01V) \text{ м/с}$ .

Рабочий эталон должен быть выполнен в виде СИ или группы СИ, которые легко транспортируются с целью удобства передачи размера единицы скорости воздушного потока нижестоящим по поверочной схеме ОСИ.

На основании этих требований и критического анализа различных методов и средств измерения скорости воздушного потока в качестве наиболее перспективных для создания рабочего эталона следует выделять следующую группу методов измерений:

- оптический метод (лазерный измеритель скорости);
- пневмометрический метод (дифференциальная трубка Пито);
- механический метод (анемометры разных типов);
- термоанемометрический метод (термоанемометр, принцип действия которого основан на измерении частоты вихреобразования).

Лазерные измерители скорости, ввиду их определенных достоинств, являются практически идеальными СИ. Их можно было бы использовать в качестве рабочего эталона единицы скорости воздушного потока. Однако ввиду сложности настройки, калибровки и обработки результатов измерений в настоящее время они пока не могут быть положены в основу рабочего эталона. Этот метод целесообразней применить в Государственном эталоне единицы скорости воздушного потока.

Преимущество дифференциальных трубок Пито определяется главным образом постоянством их градуировки для довольно широкого диапазона скоростей, практически от 5,0 до 70 м/с, т.е. почти весь диапазон рабочего эталона. Исследования, проведенные во ВНИИМ показали возможность применения этого СИ также при скоростях ниже 5 м/с. Однако ввиду отсутствия регистрирующего прибора для измерения незначительных перепадов давления в диапазоне малых скоростей ( $V < 5 \text{ м/с}$ ), а также согласно требованиям к метрологическим характеристикам, трубка Пито в качестве СИ в составе эталона использована быть не может. Таким образом, анализ метрологических характеристик существующих приборов показывает возможность применения трубок Пито в составе рабочего эталона как СИ лишь в диапазонах скоростей 5-60 м/с. Предел допускаемой основной погрешности в этом случае должен быть не более  $\Delta_d \pm (0,05 + 0,01 V) \text{ м/с}$  при условии учета атмосферного давления, температуры и влажности воздуха.

В диапазоне скоростей 0,2-5,0 м/с могут быть применены механический и термоанемометрический методы измерения скорости воздушного потока. Имеется принципиальная возможность создания и разработки

крыльчатых анемометров требуемой точности с нижним пределом измерения 0,2 м/с. У термоанемометров, принцип действия которых основан на принципе измерения частоты вихреобразования, отсутствует основной недостаток термоанемометрического метода - нестабильность градуировочной кривой от температуры окружающей среды.

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы.

1. В диапазоне скоростей 0,2-10 м/с могут быть рекомендованы в качестве перспективных - термоанемометрический или механический метод измерения скорости воздушного потока.

2. В диапазоне скоростей 5,0-60 м/с может быть рекомендован пневмометрический метод измерения скорости воздушного потока.

#### Список литературы

1. Афиногенов Л. П., Грушин С. И., Романов Е. В. Аппаратура для исследований приземного слоя атмосферы. - Л.: Гидрометеиздат, 1977, с. 79-81.
2. Блантер Д. Я., Роголëв Ю. В. Результаты метрологической аттестации образцовых аэродинамических труб. - Труды ГГО, 1981, вып.432, с. 63-72.
3. Блантер Д. Я., Куров Б. В., Роголëв Ю. В. Результаты метрологического исследования образцовой двухсплошной аэродинамической трубы. - Труды ГГО, 1981, вып.452, с. 43-51.
4. Блантер Д. Я., Кузьмин В. А., Попов А. И. Труба для градуировки измерителей малых скоростей воздушного потока. - Труды "ВНИИМ им.Д.И.Менделеева", 1976, вып.194 (254), с. 66-68.
5. Гуткин Б. Г., Кузьмин В. А., Тартаковский Л. Ф. Поверочные гидродинамические стенды. - Труды метрологических институтов СССР, 1975, вып.157 (217), с. 84-92.
6. Качурин Л. Г. Электрические измерения аэрофизических величин. - М.: Высшая школа, 1967, с. 212-222.
7. Фатеев Н. П. Поверочные схемы для метеорологических измерений. - Труды ГГО, 1973, вып.313, с. 145-155.

В.А.Кузьмин, Ю.В.Роголëв, Н.П.Фатеев

#### АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ АБСОЛЮТНЫХ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА

К абсолютным методам измерения скорости воздушного потока относятся следующие методы: время-пролетный, оптический, ультразвуковой.

Время-пролетный метод основан на определении скорости движения частиц среды или субстанций, в качестве которых могут быть различные механические и химические частицы, а также аэрозоли и т.д. Скорость при этом определяется по формуле:

$$v = \frac{l}{t}, \quad (1)$$

где  $l$  - длина базы, на которой происходит регистрация частиц;  $t$  - время пролета на базе.

Одной из наиболее распространенных разновидностей время-пролетного метода является корреляционный метод. Он основан на определении временного сдвига между двумя сигналами, отраженными от двух точек движущейся поверхности. Временной сдвиг определяется путем вычисления взаимной корреляционной функции этих сигналов и отыскания его максимума. Этот метод относится к бесконтактным методам измерения и является весьма перспективным для измерения воздушных потоков. В основе многих схем бесконтактного измерения скорости лежит так называемый метод меток потока /5/. Заключается он в следующем: в потоке создают определенные образования (метки), физические свойства которых отличны от свойств самого потока; по скорости перемещения этих образований вместе с потоком судят о скорости самого потока. Для газовых (воздушных) потоков могут быть применены ионные, тепловые и оптические метки. Измерители скорости, основанные на методе меток, разделяют на приборы с периодическим образованием меток, с нерегулярным образованием меток и с равномерно распределенными в потоке метками /4/.

При использовании приборов с периодическим образованием меток измеряется либо время прохождения меток вместе с потоком между двумя сечениями потока, либо частота прохождения меток около регистратора, при этом используется соотношение, аналогичное (1):

$$v = \frac{l}{\Delta t} \quad (2)$$

или

$$v = l f, \quad (3)$$

где  $v$  - скорость потока;  $l$  - расстояние между двумя детекторами метки (базы);  $\Delta t$  - время движения метки;  $f$  - частота формирования метки.

Логическим развитием измерителей скорости по методу меток явились разработанные в последнее время корреляционные измерители скорости, получающие все более широкое распространение /1, 2, 6, 8/.

Метки (тепловые) в виде псевдослучайных бинарных последовательностей создаются формирователем меток и перемещаются вместе с потоком мимо малоинерционных преобразователей температуры (термопары). Полученные на выходе преобразователей электрические сигналы

$f_1(t) \approx f_2(t) \approx f_1(t - \tau)$  усиливаются и подаются на коррелятор, состоящий из блока регулируемой задержки (БРЗ), включаемого в канал опережающего сигнала  $f_1(t)$ , множительного устройства и интегратора (или сглаживающего фильтра) И. Взаимно-корреляционная функция выходных сигналов вида

$$R(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T f_1(t) f_2(t - \tau) dt \quad (4)$$

имеет максимум при равенстве регулируемой задержки ( $\tau$ ) и транспортного запаздывания ( $\tau_r$ ) сигнала второго преобразователя по отношению к сигналу первого преобразователя. В (5) величина  $T$  - период интегрирования или постоянная времени сглаживающего фильтра. Транспортное запаздывание  $\tau_r$  есть

$$\tau_r = \frac{l}{v} \quad (5)$$

Регулятор экстремума поддерживает значение на максимальном уровне воздействия на БРЗ. Шкала БРЗ градуируется непосредственно в значениях скорости:

$$U = S = \frac{Kl}{\tau} \quad (6)$$

где  $K$  - коэффициент учитывающий неравномерность распределения скорости по сечению потока. Значение скорости определяется с помощью измерителя скорости (ИС). При увеличении скорости потока и постоянстве частоты выдачи меток плотность меток уменьшается, что приводит к сужению спектра сигналов преобразователя и расширению пика корреляционной функции, а следовательно, к снижению точности измерения скорости потока. Для сведения к минимуму этого эффекта необходимо увеличивать частоту выдачи меток путем введения самонастраивающегося формирователя меток в соответствии с сигналом БРЗ в зависимости от скорости потока. Такой самонастраивающийся корреляционный измеритель скорости поддерживает плотность меток постоянной в широком диапазоне скоростей потока и обеспечивает более высокую точность измерения скорости. Корреляционные измерители скорости удовлетворяют требованиям, предъявляемым современной промышленностью к приборам такого рода (высокая точность, широкий диапазон измерений, независимость показаний измерителя скорости от параметров потока, высокая надежность). Точность измерения скорости таким методом 1-3 %.

Взаимно-корреляционный метод является по существу разновидностью компенсационного метода. Сущность этого метода заключается в том, что время транспортного запаздывания сигнала второго преобразователя  $T_T$  с большой точностью уравнивается эталонной задержкой БРЭ, включенной в канал первого преобразователя. Момент равенства двух временных задержек фиксируется по наличию взаимной корреляционной функции входных сигналов. Положение максимума может быть определено очень точно, чем и объясняется высокая точность этого метода.

В /6/ приводятся исследования, которые показали принципиальную возможность определения скорости по информации, получаемой из одной точки движущейся среды. Для измерения используется автокорреляционная функция входного сигнала /7/. Основным преимуществом этого метода является отсутствие составляющих погрешности измерения скорости, обусловленных наличием базы, таких, например, как погрешности вызванные малыми размерами базы, неточностью ее установки относительно траектории движения и т.д. Автокорреляционный измеритель скорости является обычно разомкнутой измерительной схемой и его погрешность равна сумме погрешностей всех звеньев. Существенной погрешностью является погрешность вычисления ординаты автокорреляционной функции, которая составляет не менее 1%. Интересная перспектива использования измерительных систем с одним преобразователем открывается при анализе зависимости спектральной плотности входного сигнала  $S_\omega$  от скорости. При наличии автоматического спектрального анализатора можно создать замкнутую схему экстремального регулирования, автоматически отслеживающую положение максимума спектральной плотности  $S_\omega$ . В таких схемах экстремальный регулятор автоматически отыскивает максимальное значение  $S_\omega$ , воздействуя на спектральный анализатор СА. Следует отметить, что корреляционные измерители скорости, работающие на этом принципе, позволяют измерять также турбулентные пульсации скорости воздушного потока.

К методу меток относится также и ионизационный метод. Ионизатор, создающий метки, располагается на пути потока воздуха (газа). Ионизированный объем перемещается вместе с потоком газа и регистрируется ионизационным счетчиком. В качестве ионизаторов могут быть использованы электрический разряд (искровой или высокочастотный), излучение (рентгеновское или ультрафиолетовое), быстрые частицы (искусственно ускоренные или выбрасываемые при радиоактивном распаде). Недостатком искрового разряда является ударное возмущение потока в результате выделения большого количества энергии. Недостатком ионизаторов, использующих излучение радиоактивных изотопов, является малая мощность излучений, а также опасность облучения персонала при работе с открытыми воздушными потоками. В работе /12/ показано, что погрешность измерения скорости стационарного газового потока при

длине базы  $l = 5$  мм (расстояние между ионизатором и регистратором ионизации), составляет 2 %.

Последние годы быстрыми темпами развиваются так называемые оптические бесконтактные методы измерения скорости потока. Наиболее широкое распространение получили оптические методы, основанные на эффекте Доплера.

Эффект Доплера заключается в том, что при относительном перемещении источника и приемника электромагнитных колебаний, частота колебаний, воспринятых приемником  $\nu_1$ , отличается от частоты источника  $\nu_0$ . В этом случае

$$\nu_1 = \nu_0 \left( 1 \pm \frac{\omega}{\alpha} \cos \beta \right), \quad (7)$$

где  $\omega$  - скорость относительного движения;  $\alpha$  - скорость света;  $\beta$  - угол между направлением движения источника и линией, соединяющей приемник и источник (знак "плюс" - источник приближается, знак "минус" - источник удаляется).

Эффект Доплера имеет место также при рассеянии направленного излучения на частицах движущейся среды. Эффект Доплера при рассеянии излучения приемника движущейся средой положен в основу создания доплеровских измерителей скорости воздушного потока. Возможность для разработки таких измерителей чрезвычайно возросла с появлением лазеров, являющихся в свою очередь идеальными источниками монохроматического излучения.

Рассмотрим случай рассеяния света на частицах, движущихся вместе с потоком воздуха, при неподвижном источнике монохроматического излучения с длиной волны  $\lambda_0/13/$ . Излучение распространяется со скоростью света  $a$  в направлении единичного вектора  $\hat{K}_0$  и падает на частицу  $M$ , движущуюся со скоростью  $\bar{\omega}$ , причем  $|\bar{\omega}| \ll a$ . Число волн (или кажущаяся частота) воздействия на движущуюся частицу определяется выражением

$$\nu_p^* = \frac{a - \bar{\omega} \hat{K}_0}{\lambda_0} = \nu_0 \left[ 1 - \frac{\bar{\omega}}{a} \hat{K}_0 \right]. \quad (8)$$

Выражение (8) определяет также число волн, рассеиваемых движущейся частицей в единицу времени. Если в направлении излучения, рассеиваемого движущейся частицей, установлен неподвижный приемник, то поскольку кажущаяся частота воздействия на частицу составляет  $\nu_p^*$ , то кажущаяся длина волны рассеяния определяется выражением

$$\lambda_p^* = \frac{a \lambda_0}{a - \bar{\omega} \hat{K}_0}. \quad (9)$$

После рассеяния фронта одной волны частица движется в направлении

фронта этой волны (по направлению вектора  $\hat{K}_p$ ) со скоростью  $\omega \hat{K}_p$ . В момент рассеяния фронта следующей волны через время, равное  $1/v_p^*$ , фронт первой волны будет от этой частицы на расстоянии  $l$ , равном:

$$l = \frac{a - \overline{\omega} \hat{K}_p}{v_p^*} \quad (10)$$

Для неподвижного наблюдателя кажущаяся длина волны рассеянного света составляет:

$$\lambda_p = \lambda_0 \left[ \frac{a - \overline{\omega} \hat{K}_p}{a - \overline{\omega} \hat{K}} \right] \quad (11)$$

а частота рассеянного света определяется выражением

$$v_p = \frac{a}{\lambda_0} \left[ \frac{a - \overline{\omega} \hat{K}_p}{a - \overline{\omega} \hat{K}} \right] \quad (12)$$

Доплеровское смещение частоты  $\Delta v_d$  имеет вид:

$$\Delta v_d = \frac{1}{v_0} = \left[ \frac{\overline{\omega} (\hat{K}_p - \hat{K}_0)}{1 - \frac{\overline{\omega} \hat{K}_p}{a}} \right] \quad (13)$$

Поскольку  $|\overline{\omega}| \ll a$ , то

$$\Delta v_d = \frac{1}{v_0} \overline{\omega} \hat{K} \quad (14)$$

где  $\hat{K} = \hat{K}_p - \hat{K}_0$ ,  $\hat{K}$  - разностный единичный вектор. В результате замены единичных векторов волновыми

$$\hat{K} = \overline{K} \frac{\lambda_0}{2\pi} \quad (15)$$

выражение для количественного определения  $\Delta v_d$  примет вид

$$\Delta v_d = \frac{1}{2\pi} \overline{\omega} \overline{K} \quad (16)$$

Таким образом, доплеровская частота однозначно определяет скорость движения частицы.

Сравнения результатов измерений скорости потока, выполненных лазерным доплеровским измерителем скорости (ЛДИС) и трубкой Пито /9/ показали, что наблюдается хорошее согласование результатов измерений (расхождение не превышает 0,6%). Наиболее успешно в настоящее время ЛДИС применяют для исследования средних скоростей воздушных потоков в большом диапазоне измерений ( $10^{-4}$ - $10^4$  м/с) /10/.

Следует отметить, что лазерные анемометры накладывают определенные требования на параметры частиц, которые в основном сводятся к

тому, чтобы их размер был как можно меньше, а плотность была близка к плотности среды.

Поведение частиц в турбулентном потоке также зависит от частоты турбулентных пульсаций. Чем выше частота, тем больше будет несоответствие скорости частицы скорости исследуемого потока. Кроме того отставание частиц происходит тем быстрее, чем сильнее отличаются плотности частиц и среды и чем выше частота исследуемых пульсаций.

Большого внимания заслуживают лазерные измерители скорости воздушного потока, основанные на время-пролетном методе, заключающемся в измерении времени прохождения искусственно созданной неоднородностью фиксированного расстояния. Чаще всего схема представляет собой зомд, состоящий из трех тонких проволочек, установленных на строго фиксированных расстояниях, причем две из них измерительные, расположенные в свою очередь перпендикулярно импульсной. Импульсная проволочка разогревается импульсным лазером с частотой, задаваемой генератором задержки импульсов. Нагретые области газа переносятся потоком по течению струи. Принимающие (измерительные) проволочки действуют так же как обычный проволочный анемометр и чувствительны к небольшим изменениям температуры.

Усиленные сигналы поступают в блок измерения времени. Время пролета вводится в ЭВМ, где происходит вычисление скорости путем деления известного расстояния (базы)  $l$  между измерительными нитями на время пролета  $t$ , т.е.  $V = l/t$ . Такие устройства наряду с преимуществами обладают и рядом недостатков, одним из которых является то, что требуется искусственное запыление воздушного потока, а это вносит трудности в процессы измерения, кроме того выходной сигнал в этом случае становится нелинейной функцией скорости.

Определение скорости воздушного потока ультразвуковым методом основано на измерении сноса луча ультразвуковых колебаний потоком, времени прохождения ультразвуковых колебаний, сдвига фазы ультразвукового колебания в зависимости от скорости потока и частоты следования ультразвуковых импульсов [1]. В работе [3] показано, что в усовершенствованных одноканальных ультразвуковых анемометрах погрешность измерения скорости потока не превышает 1%. Недостатком одноканальных схем является непостоянство скорости звука при изменении параметров окружающей среды (изменении температуры, влажности и давления газа).

В двухканальных ультразвуковых анемометрах эти недостатки могут быть в значительной мере или полностью исключены. Эти приборы представляют собой объединение двух одноканальных систем, в одной из которых направление распространения звука совпадает с направлением потока, а в другой — противоположно ему. Для приборов, основан-

ных на измерении времени прохождения ультразвуковых колебаний в потоке рабочая формула имеет вид

$$\Delta t = \tau_1 - \tau_2 = \frac{L}{a-v} - \frac{L}{a+v} = \frac{2Lv}{a^2-v^2} \approx \frac{2Lv}{a^2}, \quad (17)$$

где  $v$  - скорость потока;  $L$  - расстояние между излучателем и регистратором;  $a$  - скорость света. Разность фаз акустических колебаний в точках регистрации рассчитывают с помощью следующего выражения:

$$\Delta \varphi = 2\pi f \left( \frac{L}{c-v} - \frac{L}{c+v} \right) \approx 2\pi f \frac{2Lv}{c^2}. \quad (18)$$

Из анализа выражения (19) видно, что даже при увеличении чувствительности прибора вдвое, зависимость фаз от скорости звука сохраняется. Применение 2-х канального ультразвукового анемометра позволяет исключить эту зависимость. Максимальная погрешность определения скорости потока будет определяться погрешностью измерения длины базы  $\Delta L$ , числа импульсов  $\Delta N$  и времени осреднения  $\Delta t$ :

$$\frac{\Delta v}{v} = \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta t}{t} + \frac{\Delta(n-n_1)}{n-n_1}. \quad (19)$$

Длина базы может быть измерена с точностью до 1 мм. Время осреднения с погрешностью до 0,5 % от задаваемого значения. Пересчетное устройство может дать погрешность в 1 импульс на каждые 100 импульсов разности. Исходя из этого, если  $L = 0,2$  м,  $t = 10$  мин, то максимальная погрешность измерения скорости потока составит 2 % от измеряемой величины. Излучатель и регистратор, установленные непосредственно в потоке, вносят возмущения и искажают поток и его характеристики. Для исключения этого влияния излучатели и приемные преобразователи устанавливают на границе струи под некоторым углом  $\alpha$  к направлению потока и таким образом, что базы  $L$  каналов пересекаются. Рабочая формула имеет вид

$$v = \frac{Nd}{t \sin 2\alpha}, \quad (20)$$

где  $N$  - разность числа импульсов в каналах;  $d$  - диаметр рабочего сечения аэродинамической трубы;  $t$  - время осреднения. С учетом (20), суммарная относительная погрешность измерения скорости потока  $\Delta v$  будет равна

$$\frac{\Delta v}{v} = \frac{\Delta N}{N} + \frac{\Delta d}{d} + \frac{\Delta t}{t} + \frac{\Delta(\sin 2\alpha)}{\sin 2\alpha}. \quad (21)$$

При наиболее неблагоприятных условиях она не превышает 2,5 %. Погрешность измерения увеличивается за счет асимметрии каналов.

Недостатком ультразвуковых анемометров является сложность аппаратуры, а также рассеяние энергии ультразвука на неоднородностях турбулентного потока.

На основании проведенного анализа абсолютных методов измерения скорости воздушного потока можно сформулировать следующие выводы:

1. Хотя метод меток имеет свои преимущества, он все же связан с рядом ограничений, которые накладывают свойства самих меток. К таким ограничениям следует отнести короткое время существования меток (в случае ионных - это время рекомбинации, в случае тепловых - это скорость выравнивания температур). Отсюда следует, что необходимо увеличивать мощность формирователей меток и уменьшать расстояние (базу) между излучателем и регистратором.

2. Использование оптических методов измерения параметров потока с помощью ЛДИС позволяет создать анемометры, имеющие широкий диапазон измерения скоростей ( $10^{-6}$ - $10^4$  м/с), хорошее пространственное разрешение (число независимых измерений в единице объема  $10^3$  мм<sup>-3</sup>, хотя принципиально можно достичь разрешения  $10^9$  мм<sup>-3</sup>) высокую чувствительность, малую погрешность измерений (не более 1,5 % в диапазоне скоростей, встречающихся в естественных условиях).

3. Лазерные доплеровские измерители скорости по сравнению с пневмометрическими и термоанемометрическими измерителями скорости имеют ряд преимуществ:

- они непосредственно определяют значения локальных скоростей потока;

- не вносят возмущения в поток;

- имеют высокое пространственное разрешение;

- не нуждаются в градуировке;

- имеют малую погрешность (от долей до единиц процента);

- практически безинерционны.

Быстродействие ЛДИС позволяет применять их для исследования турбулентности и нестационарности потока, причем эти характеристики потока могут быть измерены с точностью не ниже 2-10 %. Основным недостатком ЛДИС является сложность аппаратуры и необходимость введения в поток в качестве центров рассеивания примесей, которые в свою очередь должны нормироваться по размеру и количеству. Наиболее перспективным является оптический метод в сочетании с корреляционным.

4. Недостатком ультразвуковых анемометров является сложность аппаратуры, а также рассеивание энергии ультразвука на неоднородностях турбулентного потока. Не всегда удается свести к минимуму составляющую погрешность, обусловленную влияющими факторами среды (температуры, влажности и давления воздуха).

### Список литературы

1. Деревянко Н. Ф. О возможности измерения турбулентности корреляционным методом. - НТФ, 1962, № 2.
2. Деревянко Н. Ф. и др. Измерение турбулентности газовых потоков оптическими методами. - ДАН СССР, 1968, № 4.
3. Заливадный В. С. Ультразвуковой измеритель нестационарных потоков. - Приборостроение, 1963, № 1, с. 18-23.
4. Ильинский В. М. Бесконтактное измерение расходов. - М.: Наука, 1965.
5. Катыс Г. П. Система автоматического контроля полей скоростей и расходов. - М.: Наука, 1965.
6. Козубовский С. Ф. Корреляционные экстремальные системы. Справочник. - Киев: Наукова думка, 1973.
7. Козубовский С. Ф. Об автокорреляционных и спектральных методах измерения скорости движения. - Автоматика, 1963, № 1, с. 18-23.
8. Матюкас А. А. Измерение скорости потока фотоэлектронным методом. - В кн.: Техника. Материалы научной конференции. - Вильнюс, 1967.
9. Павловский В. А., Аристов Е. М. Доплеровская оптическая установка для измерения скорости воды. - Приборы и системы управления, 1972, № 11, с. 18-21.
10. Повх И. Л. Аэродинамический эксперимент в машиностроении. - Л.: Машиностроение, 1974.
11. Ринкевичус В. С. Лазерная анемометрия. - М.: Энергия, 1978.
12. Фатеев Н. П. Измерение температуры и скорости воздушного потока в свободной атмосфере ультразвуковым методом. - Труды ЛК ВИА, 1961, вып. 361.
13. Cooley W.C. Determination of air velocity by ion transmittance measurement. Rev. Sci. Instr., 1952, 23, N4.
14. Gooldstein R.J., Kraid P.K. Measurement of Laminar Flow development in a Synare Dust, Using a Laser Doppler Flowmeter. Saunh. Appl. Mech. Series E., XII, Vol 34 1967, N4.

В.А.Кузьмин, Ю.В.Роголёв, Н.П.Фатеев

#### АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ МЕХАНИЧЕСКОГО И ПНЕВМОМЕТРИЧЕСКОГО МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА.

Механический метод измерения скорости основан на воздействии воздушного потока и передаче его кинетической энергии приемному элементу СИ. Этот метод несмотря на ряд недостатков широко применяют

для измерения малых скоростей потока (0,2-1,0 м/с). Хотя известно, что точное измерение скорости в этом диапазоне представляет значительные трудности, поскольку перепад давлений очень мал и его трудно измерить. Из существующих СИ, работающих на этом методе, следует отметить крыльчатый анемометр /2/, пригодный для измерения скоростей потока в диапазоне 0,3-15 м/с, а также специальные типы анемометров для измерения малых скоростей, дающие вполне удовлетворительные результаты при скоростях близких к 0,18 м/с. Показания анемометра практически не изменяются при отклонении воздушного потока от своего нормального направления, перпендикулярного плоскости окружности крыльчатки. При скосе потока до  $20^\circ$  погрешность измерения скорости не превышает 1%. В показаниях хорошо отрегулированного анемометра, сопротивление трения в осях которого незначительно, не требуется вводить поправки на давление и температуру при условии, что ветроприемник вращается не слишком медленно. В области малых скоростей изменение плотности воздуха становится значительным и должно учитываться. При скорости потока  $U \approx 1,5$  м/с изменение плотности на 5% вызывает погрешность не более 1% истинной скорости  $U$ , так как при обычных условиях работы подобное изменение плотности практически не наблюдается. Однако поправку на изменение плотности при  $U \approx 1,5$  м/с вводить не обязательно. Существенную погрешность в показаниях анемометров могут вносить колебания (пульсации) воздушного потока. Но, если максимальное отклонение скорости  $U$  от среднего значения не превосходит 10%, а частота пульсаций потока не превышает  $f \leq 2$  Гц, погрешность определения скорости может не учитываться. Анемометры, измеряющие скорость воздушного потока с относительной погрешностью  $\delta \leq 30-2,5\%$ , применяются обычно как рабочие СИ.

Наибольшее распространение получил пневмометрический метод измерения скорости воздушного потока, который относится к косвенным методам. Этот метод основан на зависимости скорости потока  $U$  от температуры  $t$ , давления  $P$  и плотности воздуха  $\rho$ , т.е.  $U = F(t, P, \rho)$ . Из трех статических параметров непосредственно прямым методом может быть измерено давление  $P$ . Скоростные напоры можно описать с помощью уравнения Бернулли /5/

$$\frac{1}{2} \rho U^2 + P = C, \quad (1)$$

где  $\rho$  - плотность воздуха;  $U$  - скорость потока,  $P$  - давление в потоке,  $C$  - постоянная.

Первый член - это так называемый скоростной (или динамический) напор ( $P_{дин}$ ), второй член - статический напор ( $P_{ст}$ ), их сумма - полный напор ( $P_{п}$ ). Таким образом,

$$\frac{1}{2} \rho U^2 + P = P_{ст} + P_{дин}. \quad (2)$$

Если на пути воздушной частицы, движущейся по линии тока, находится какое-либо препятствие, то давление, действующее на это препятствие, будет равно полному напору  $P_{\Pi}$  в этой точке пространства:

$$P_{\Pi} = \frac{1}{2} \rho V^2 + P_0 \quad (3)$$

Давление  $P_{\Pi}$  можно измерить с помощью напорной трубки, помещаемой в поток; теоретически это возможно при выполнении следующих требований:

1. сечение трубки настолько мало, что в ней "помещается" только одна линия тока;
2. система замкнута (свободный конец трубки присоединен к манометру);
3. влияние вязкости на работу трубки не учитывается;
4. наличие трубки не нарушает условий движения потока.

Практика работы с трубками показала, что несмотря на эти ограничения трубка дает очень хорошие результаты при измерении  $P_{\Pi}$ .

Результирующее давление  $\Delta P$ , регистрируемое манометром, получим из выражения:

$$\Delta P = P_{\Pi} - P_{ст} = \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (4)$$

или

$$P_{дин} = \frac{1}{2} \rho V^2 = P_{\Pi} - P_{ст} \quad (5)$$

Из выражений (6) и (7) можно определить скорость:

$$V = \sqrt{\frac{2(P_{\Pi} - P_{ст})}{\rho}} = \sqrt{\frac{2 \Delta P}{\rho}} \quad (6)$$

Для одновременного измерения  $P_{\Pi}$  и  $P_{ст}$  удобнее всего пользоваться комбинированной насадкой, позволяющей определять  $\Delta P$ . Для получения более точного значения скорости необходимо учитывать изменения  $\rho$  в зависимости от барометрического давления, температуры и влажности воздуха /4/:

$$\rho = \frac{P_б}{21,1(273+t)} \left( 1 - 0,378 f \frac{P_{нп}}{P_б} \right), \quad (7)$$

где  $P_б$  - барометрическое (атмосферное) давление;  $f$  - относительная влажность воздуха;  $t$  - температура воздуха;  $P_{нп}$  - давление насыщенных водяных паров. Значения  $f$  и  $P_{нп}$  находятся по таблицам. С учетом (7), получим выражение для  $V$ :

$$V = \sqrt{42,2 \frac{273+t}{\rho_6} \left(1 - 0,378 f \frac{\rho_{\text{ин}}}{\rho_6}\right)^{-1} \Delta P} \quad (8)$$

Оценим влияние изменения давления и температуры воздуха на величину  $\rho$ . Так, например, если атмосферное давление изменилось к концу эксперимента на 660 Па (граничный случай), то относительное изменение  $\rho$  при  $t = \text{const}$  окажется равным 0,65%. Если при  $\rho = \text{const}$  температура воздуха изменится на  $\Delta t = 3^\circ\text{C}$ , то значение плотности  $\rho$  изменится на 1,05%. Следует отметить, что изменение температуры на  $\Delta t = 3^\circ\text{C}$  и более можно нередко наблюдать при проведении измерений. Расчет показывает, что изменение температуры влияет в большей степени на  $\rho$ , чем изменение барометрического давления и поэтому необходимо особенно тщательно контролировать температуру во время измерений скорости потока воздуха.

Рассмотрим процессы, происходящие при обтекании насадки потоком воздуха. Поток вблизи насадки разветвляется. В месте разветвления потока скорость сильно уменьшается, а непосредственно перед насадкой образуется как бы "застойная область" с крайне медленным течением. Если представить достаточно тонкую по сравнению с размером головки насадки струю, подходящую по оси насадки к месту разветвления потока, то можно предположить, что поток в этой области практически не движется, т.е.  $V = 0$ . При этом давление быстро растет и в критической точке доходит до значений полного давления  $P_{\text{п}}$ . В точках, находящихся недалеко от критической (по направлению потока), давление резко падает от  $P_{\text{п}}$  до  $P_{\text{ст}}$ . Далее, по мере удаления от передней кромки насадки опять увеличивается, асимптотически приближаясь к статическому. Наличие державки у приемника давления вызывает торможение потока (подпор); за счет этого повышается давление. Экспериментально несложно найти на корпусе насадки место, где давление будет равно статическому  $P_{\text{ст}}$ ; здесь обычно и располагают приемные отверстия для  $P_{\text{ст}}$ .

Были проведены исследования влияния угла поворота трубок относительно направления движения потока на результаты измерения скорости воздушного потока /1/, путем сравнения показаний трубки Пито и стандартного комбинированного инструмента  $NLP$ . Исследования показали, что с увеличением угла поворота значения давления уменьшаются. (Показания комбинированного инструмента представляют собой отношение  $P_{\alpha}/P_0$ , где  $P_{\alpha}$  - отсчет при угле поворота  $\alpha$ , а  $P_0$  - отсчет при угле  $\alpha = 0^\circ$ .)

Анализ полученных данных показал преимущество использования комбинированной насадки при расчете погрешности определения скорости потока при различных значениях угла поворота трубки. При малых скоростях

потока скоростные напоры настолько малы, что принято считать невозможным применение трубок Пито. При скоростях меньших 4–5 м/с предпочтительнее использовать приборы другого типа. Однако эти приборы обычно градуируются с помощью тех же трубок Пито. Были проведены исследования трубки при  $U < 6$  м/с. Исследования показали, что при  $U = 6$  м/с значение  $\xi$  изменяется медленно и при  $U \approx 1,5$  м/с отличается от значения  $\xi = 1$  (при  $U = 6$  м/с) не более, чем на 1%. При  $U \approx 1,2$  м/с,  $\xi = 1,01$ , а при дальнейшем уменьшении скорости значение  $\xi$  резко падает. Определим нижний предел  $U$ , при которой можно производить измерения с помощью насадки. Учитывая, что насадки достаточно надежно воспринимают давление при числе Рейнольдса  $Re = U d_H / \nu \geq 700$ , скорость получим из выражения

$$U \geq 700 \frac{\nu}{d_H} \quad (9)$$

где  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости;  $d_H$  – диаметр насадки.

Преимущество использования трубок Пито обусловлено главным образом постоянством их градуировочной характеристики в диапазоне скоростей потока 5–70 м/с; это постоянство может быть нарушено лишь в результате механического повреждения самой трубки.

Одним из широко распространенных методов определения скорости воздушного потока является метод измерения перепада давлений. В этом случае следует рассматривать и анализировать измерительную систему "трубка Пито – манометр". В диапазоне скоростей  $U < 5$ –6 м/с появляется погрешность, обусловленная не столько влиянием самой трубки, сколько влиянием используемого регистрирующего прибора (манометра, микроманометра). С помощью этого метода определяется скорость воздушного потока в аэродинамических трубах (АТ) замкнутого типа с открытой рабочей частью. Для двух сечений (сечения на входе и выходе конфузора) уравнение Бернулли можно представить следующим образом:

$$P_1 + \frac{\rho U_1^2}{2} = P_2 + \rho \frac{U_2^2}{2} + \frac{\xi' \cdot \rho \cdot U_2^2}{2} \quad (10)$$

Уравнение постоянства расхода на единицу площади сечений конфузоров запишем в виде

$$\rho U_1 F_1 = \rho U_2 F_2 \quad (11)$$

Из (10) и (11) определим перепад давлений:

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \frac{\rho U_2^2}{2} \left[ 1 + \xi' - \left( \frac{F_2}{F_1} \right)^2 \right] \quad (12)$$

Здесь  $\xi'$  - коэффициент гидравлических потерь между рассматриваемыми сечениями  $F_1$  и  $F_2$ ,  $F_1$  - площадь первого сечения,  $F_2$  - площадь второго сечения.

Из (2) получим  $U_2$  :

$$U_2 = \sqrt{\frac{2}{\rho} (\rho_1 - \rho_2) \mu} , \quad (13)$$

где  $\mu$  - коэффициент характеризующий данную АТ и равный

$$\mu = \frac{1}{1 + \xi' - \left(\frac{F_2}{F_1}\right)^2} . \quad (14)$$

Проанализируем далее погрешности, обусловленные применением в составе системы трубка Пито - манометр непосредственно манометра (или микроманометра). Для измерения перепадов давлений между  $P_{\Pi}$  и  $P_{СТ}$  применяют дифференциальные манометры механического типа с упругими чувствительными элементами; электрические преобразователи давления, преобразующие деформацию чувствительного элемента в электрический сигнал; жидкостные манометры.

Из манометров механического типа следует отметить манометр, состоящий из сильфонов и автоматического рычажного весового элемента, работающий на принципе уравнивания (компенсации) разности давлений /2/. Разность давлений при равенстве плеч рычага и эффективной площади сильфонов может быть рассчитана по формуле:

$$\Delta p = \frac{G t}{a F} n , \quad (15)$$

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

Манометрами этого типа можно измерять скорости потока от 13 м/с и выше и не могут быть использованы для наших целей.

Представляет интерес конструкция ёмкостного компенсационного манометра, в котором сила давления на мембрану уравнивается электростатическими силами /6/. Погрешность прибора составляет 0,1 % в диапазоне перепада давлений 0,14-1,4 кгс/м. Такая конструкция обеспечивает измерение скорости потока от 1,5 до 5,0 м/с в погрешностью 0,05 %.

Следует отметить, что при выполнении различного рода аэродинамических экспериментов давление и скорость изменяются в очень широких пределах и поэтому ни один из перечисленных выше типов манометров не может быть использован во всем диапазоне измеряемых давлений с достаточной степенью точности.

Наибольшее распространение в качестве регистрирующих приборов для измерения скоростей потока в АТ получили жидкостные микроманометры двух типов: манометры непосредственного отсчета и манометры "нулевого" типа. Сообщающиеся трубки жидкостных манометров непосредственного отсчета имеют U-образную форму; одна из трубок имеет значительно большее сечение, чем другая и выполнена в виде бабка. Высота столба жидкости, уравнивающая разность давлений  $P_1 - P_2$ , равна  $h = h_1 + h_2$ . Так как объем жидкости, вытесняемой из резервуара с площадью сечения  $F_2$ , равен объему жидкости, вошедшей в измерительную трубку с площадью сечения  $F_1$ , то разность давлений равна

$$P_1 - P_2 = h_1 \gamma \left(1 + \frac{F_1}{F_2}\right), \quad (16)$$

где  $\gamma$  - плотность жидкости, заливаемой в микроманометр. Отношение  $F_1 / F_2$  учитывает изменение уровня рабочей жидкости в резервуаре. Подобные манометры могут быть снабжены устройствами для измерения высоты столба жидкости с цифровым выходом.

Для увеличения чувствительности и повышения точности измерения малых разностей давлений узкую трубку манометра обычно устанавливают наклонно, под некоторым углом  $\alpha$  к плоскости установки манометра. В микроманометрах "нулевого" типа наклонная измерительная трубка подвижна, на ней вытравлена нулевая черта. Положение, при котором мениск жидкости совпадает с этой чертой, считается нулевым положением прибора. При измерении разности давлений трубку перемещают до совмещения мениска жидкости с чертой при помощи микрометрического винта. Наблюдение за мениском производится с помощью оптического устройства, перемещающегося вместе с трубкой. Погрешность отсчета столба жидкости в основном обусловлена точностью изготовления микрометрического винта. В качестве примера приборов компенсационного типа может служить микроманометр ММ, выпускаемый отечественной промышленностью. При измерении разности давлений один из сосудов перемещается вверх до тех пор, пока уровень жидкости в другом сосуде не придет в первоначальное положение. Разность давлений определяется по формуле

$$\Delta P = P_1 - P_2 = h \cdot \rho \cdot g, \quad (17)$$

где  $\rho$  - плотность жидкости (обычно используют дистиллированную воду);  $g$  - ускорение свободного падения;  $h$  - высота столба жидкости. Суммарная погрешность измерения будет включать погрешность отсчета  $\Delta h = 0,01$  мм и погрешность наблюдения равную 0,01 мм.

Если температура воды измерена с погрешностью  $\Delta t = \pm 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$ , то погрешностью определения  $\rho$  можно пренебречь. Поэтому суммарная случайная погрешность измерения  $\Delta P$  в соответствии с (17) вычисляется следующим образом:

$$\frac{\delta(\Delta P)}{\Delta P} = \frac{0.02}{h}$$

Манометры типа ММ измеряют разность давлений от 0,06 до 250 кгс/м или скорость потока от 1 м/с до 70 м/с и не могут быть применены в качестве регистрирующего устройства в комплекте с трубкой Пито.

С более высокой точностью разность давлений можно измерить с помощью микроманометров, в которых измерение высоты столба жидкости заменено измерением сил рычажными весами (колокольными микроманометрами непосредственного отсчета) или гидростатическими весами. Гидростатические весы позволяют измерять  $\Delta P$  от 0,005 до 10 кгс/м<sup>2</sup>, что соответствует следующим значениям скорости потока от 0,3 до 12 м/с. Такое регистрирующее устройство также не может быть использовано из-за ограниченности диапазона измеряемых скоростей.

Разность давлений, измеряемая с помощью микроманометров непосредственного отсчета с наклонной измерительной трубкой будет равна:

$$P_2 - P_1 = \gamma(h + H) = \gamma \left[ (h_1 - h_0) \sin \alpha + H \right], \quad (18)$$

где  $\sin \alpha$  - масштаб микроманометра;  $H$  - изменение уровня высоты жидкости в бачке, определяемое по формуле

$$H = \frac{F_1}{F_2} (h_1 - h_0). \quad (19)$$

Относительная максимальная погрешность измерения  $\Delta P$  определяется формулой:

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{\Delta(P_2 - P_1)}{P_2 - P_1} = \frac{\Delta \left[ \gamma(h_1 - h_0) \sin \alpha + \gamma H \right]}{P_2 - P_1} = \\ &= \frac{\Delta \gamma}{\gamma} + \frac{\Delta(h_1 - h_0)}{h_1 - h_0} + \frac{\Delta \sin \alpha}{\sin \alpha} + \frac{F_1}{F_2 \sin \alpha}. \end{aligned} \quad (20)$$

Погрешность определения угла наклона трубки, включая погрешность на неточность установки не превышает 0,2%. Предел допускаемой относительной погрешности измерения скорости воздушного потока системой трубка Пито - микроманометр можно определить, используя следующее выражение

$$\frac{\Delta U}{U} = \left| d \left[ \frac{1}{2} \ln \frac{2}{\rho} + \frac{1}{2} \ln (P_2 - P_1) \right] \right| \quad (21)$$

или

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta (\rho_2 - \rho_1)}{\rho_2 - \rho_1} \cdot 100 \% . \quad (22)$$

Расчет  $\Delta \rho$  с помощью (22) показал, что микроманометры типа ММ и ММН, а также микроманометры ЦАГИ и ЛПИ вносят существенную погрешность в измерение скорости потока, достигающую в малом диапазоне скоростей до 40-70 % измеряемой величины  $U$ .

На основании изложенного выше анализа обоих методов измерения скорости воздушного потока можно сделать следующие выводы:

1. Основным недостатком пневмометрического метода является его большая инерционность.

2. Погрешность, вводимой манометром при измерении пульсаций скорости, зависит от амплитудной и частотной характеристик пульсаций и от геометрических характеристик насадки.

3. Используемые в настоящее время регистрирующие устройства в системе трубка Пито - микроманометр не могут быть введены в состав рабочего эталона скорости воздушного потока. Необходима разработка нового регистрирующего устройства более высокого класса точности.

#### Список литературы

1. О у э р З. Измерение воздушных потоков. - М., 1935.
2. Приборы и установки для метеорологических измерений на аэродромах/ Под ред. Л.П.Афиногенова и Е.В.Романова. - Л.: Гидрометеоиздат, 1981, с. 76-87.
3. Справочник по гидрометеорологическим приборам и установкам/ Под ред. А.Б.Рейфера и др. - Л.: Гидрометеоиздат, 1976, с. 11-12.
4. Руководство по поверке метеорологических приборов. - Л.: Гидрометеоиздат, 1967, с. 144-192.
5. Я в о р с к и й Б. М., Д е т л а ф А. А. Справочник по физике. Изд. физ.-мат. литературы. - М., 1963, с. 309-311.
6. Opstellen J.J., Warmoltz N. A double-sided micromanometre. - Appl. Sei. Res., vol. 4 N 5, 1955.

## АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ ТЕРМОАНЕМОМЕТРИЧЕСКОГО И ИСКРОВОГО МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА

Термоанемометрический метод основан на известном физическом эффекте изменения температуры нагретого проводника, помещенного в воздушный поток при изменении скорости его обтекания этим потоком. Так как электрическое сопротивление проводника зависит от его температуры, то, измеряя при помощи соответствующих электрических схем изменение сопротивления, вызванное движением воздушного потока, можно определить скорость потока. На этом принципе построены существующие термоанемометры (ТА) /1, 4, 5/.

Основным преимуществом термоанемометрического метода по сравнению с пневмометрическим является его малая инерционность. Практика работы с ТА показывает, что измерение амплитуды давлений и скоростей при частоте пульсаций, превышающей несколько Герц, связано с существенными трудностями. Для получения более полных сведений, касающихся сложных законов движения газов, необходимо иметь возможность получить мгновенные значения скоростей воздушного потока. Исходя из этого, термоанемометрический метод является основным методом измерения турбулентности потока. Другим важным преимуществом ТА является их высокая чувствительность. При этом следует отметить, что в то время как чувствительность пневмометрического метода измерения скорости воздушного потока падает при уменьшении скорости потока, чувствительность ТА, наоборот, увеличивается. Следовательно, для измерения скоростей  $U < 5$  м/с безусловным преимуществом обладает ТА, хотя и требует более сложной измерительной аппаратуры.

Существенным достоинством ТА является и то, что измерительные преобразователи для них можно изготавливать в виде зондов весьма малых размеров, которые и являются основным конструктивным элементом ТА. От правильного выбора режима работы зависит точность измерения характеристик воздушного потока. Для исследований воздушных потоков широко используются преобразователи, изготавливаемые из вольфрамовой или платиновой проволоки диаметром 0,25-12 мкм и длиной 1-12 мм, а также пленочные преобразователи (пленка из вольфрама или платины толщиной 1-2 мкм, напыленная на кварцевое основание корпуса преобразователя).

Потери тепла на  $1^\circ\text{C}$  разности температур окружающей среды и проволоки определяются уравнением ТА, выведенным Кингом

$$Q = B\sqrt{U+C} \quad (1)$$

где  $B$  и  $C$  - функции температуры и свойства среды и проволоки. Для проволоки данных размеров при  $t = const$  и в одной и той же среде  $B$  и  $C$  есть постоянные, которые можно определить из заданных условий. В стационарном состоянии от проволоки в окружающую среду выделяется тепло:

$$Q = I^2 R / j, \quad (2)$$

где  $j$  - механический эквивалент тепла. Следовательно, с учетом (1) и (2) напишем

$$\frac{I^2 R}{j} = B \sqrt{U} + C. \quad (3)$$

Если температура проволоки поддерживается постоянной, то ее сопротивление ( $R$ ) остается постоянным и для данной проволоки и для воздушного потока, т.е.

$$I^2 = K \sqrt{U} + I_0, \quad (4)$$

где  $K$  - постоянная,  $I_0$  - сила тока в условиях неподвижной среды. Термоанемометр работает в этом случае в так называемом режиме постоянной температуры.

Обтекание потоком воздуха преобразователя ТА вызывает его охлаждение, что приводит к уменьшению сопротивления  $R$ . Чтобы избежать этого, необходимо увеличить  $I$ , но при этом произойдет еще большее падение напряжения  $U$ . В системе, работающей в режиме постоянной температуры, температура преобразователя ТА поддерживается постоянной с помощью усилителя, включенного в цепь обратной связи, компенсирующей тепловую инерцию нити или пленки.

В термоанемометрии применяется и другой метод, основанный на поддержании постоянной силы тока ( $I = const$ ). В этом случае скорость определяется по изменению сопротивления проволоки. Постоянство силы тока обеспечивается включением нити в электрическую цепь последовательно с источником питания (батарей) и реостатом. Сопротивление нити определяется в этом случае по разности потенциалов на ее концах, измеренной вольтметром с высоким сопротивлением. Начальный ток, соответствующий положению преобразователя в покоящемся воздухе, устанавливается с помощью балластного резистора, а во время измерения регистрируются показания вольтметра, соответствующие различным скоростям потока. Чем ниже температура охлаждаемой потоком нити, тем меньше сопротивление. Сопротивление можно рассчитать по следующей формуле:

$$R_w = R_H \left[ 1 + \alpha_H (T_w - T_H) \right], \quad (5)$$

где  $T_w$  - температура преобразователя;  $R_w$  и  $R_H$  - сопротивление преобразователя соответственно при температуре  $T_w$  и начальном значении  $T_H = 293$  °К;  $\alpha_H$  - температурный коэффициент сопротивления материала проволоки при  $T_H = 293$  °К.

При изменении скорости воздушного потока применяется схема с постоянной температурой преобразователя. В этом случае погрешность измерения скорости в диапазоне 0,5-7,0 м/с составляет 5-7 %. Основным недостатком ТА является зависимость его чувствительности от изменения характеристик окружающей среды, а также изменение градуировочных характеристик преобразователя от загрязнения последних.

Термоанемометрический метод позволяет также измерять турбулентность воздушного потока. При обтекании преобразователя турбулентным потоком, вектор скорости которого содержит пульсационную составляющую, сигнал на выходе усилителя ТА будет зависеть и от этой составляющей. В таком сигнале можно выделить его постоянную и переменную составляющие. Первую измеряют вольтметром постоянного тока, вторую - вольтметром переменного тока. Интенсивность турбулентных пульсаций  $\varepsilon$  определяется по формуле

$$\varepsilon = \frac{4U U'}{U^2 - U_0^2}, \quad (6)$$

где  $U'$  - напряжение, пропорциональное пульсационной составляющей скорости воздушного потока;  $U$  - показания ТА при текущем значении скорости воздушного потока;  $U_0$  - напряжение при скорости воздушного потока  $U = 0$ .

Если нить преобразователя устанавливается нормально вектору скорости набегающего воздушного потока, то переменная составляющая напряжения на выходе усилителя будет зависеть от продольной пульсационной составляющей скорости. В этом случае напряжение, измеряемое вольтметром переменного тока будет пропорционально указанной составляющей. Для измерения других пульсационных составляющих воздушного потока в конструкции ТА применяется X-образный преобразователь. Необходимая точность измерений может быть достигнута при условии, что частота изменения пульсационной составляющей скорости  $F_{лс}$  меньше собственной частоты колебаний регистрирующей аппаратуры  $F_{рл}$ , т.е.  $F_{лс} / < F_{рл}$ . Исследования соотношения сигнал - шум ТА показали, что уровень шума не превышает сигнала интенсивности (полезного сигнала) более чем на 0,073 % при  $U \approx 2$  м/с. Погрешность определения скорости ТА не превышает  $\pm 0,5$  %. Измерение низкочастотных пульсаций ограничено собственными шумами аппаратуры, а верхний предел 10-15 % ограничен трудностями обработки результатов измерений.

В последнее время появились так называемые вихревые измерители скорости потока, принцип действия которых основан на зависимости

периодичности отрыва вихрей, образующих вихревую дорожку, от скорости воздушного потока, набегающего на плохо обтекаемое тело. Периодичность отрыва вихрей характеризуется безразмерной частотой или числом Струхала:

$$St = \frac{f b}{U_0}, \quad (7)$$

где  $f^* = 1/T$  - частота отрыва вихрей, Гц;  $b$  - ширина поперечного сечения плохо обтекаемого тела, м;  $U_0$  - скорость течения потока, м/с. Частота вихреобразования может быть легко измерена ТА (анализатором спектра или частотомером). Этот метод в комплексе с термоанемометрическим можно считать перспективным.

Рассмотрим далее методы, основанные на использовании анемометрических свойств плазмы (анемометры с тлеющим и коронным разрядами или искровые анемометры).

В анемометрах с тлеющим разрядом используется зависимость напряжения пробоя  $U_{пр}$  воздушного промежутка между двумя электродами от длины этого промежутка  $l$ . Недостатками анемометров этого типа являются: нелинейная зависимость выходного сигнала от  $U$  и непостоянство (нестабильность) градуировочной характеристики во времени.

Более перспективными для этих целей являются высокочастотные искровые анемометры /2, 3/, работающие в двух режимах: в режиме прогиба и в режиме срыва искры. В режиме срыва искры они обеспечивают измерение скорости потока в диапазоне от 3-5 до 1-1,5 м/с. Этот режим работы аналогичен режиму работы анемометров с тлеющим разрядом. (При  $U > 1-1,5$  м/с они работают в режиме срыва искры.) Частота срывов искрового канала при воздействии динамического давления набегающего воздушного потока в довольно широком диапазоне скоростей (до 40 м/с) оказывается линейной функцией скорости потока.

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1. Термоанемометры целесообразно использовать в качестве образцовых средств измерений второго разряда в диапазоне малых скоростей.
2. Искровые анемометры также могут быть рекомендованы для использования в качестве образцовых средств измерения скорости воздушного потока.

#### Список литературы

1. Качурин Л. Г. Электрические измерения аэрофизических величин. - М.: Высшая школа, 1967. - с. 488.
2. Толстобров Б. Я., Зарубин Е. В., Бердовский И. Н. Об измерении ветровых и пульсационных характеристик в нижнем слое атмосферы на башнях и мачтах. - Труды ЦВ ГМО, 1976, вып. 7, с. 72-76.

3. Толстобров Б. Я., Фатеев Н. П. Измерение скорости воздушного потока абсолютными методами. - Труды ГГО, 1981, вып. 432, с. 10-17.
4. Фатеев Н. П., Кузьмин В. А., Блантер Д. Я., Ривлин А. Я. Измерение малых скоростей воздушного потока при поверке анемометров. - Труды ГГО, 1981, вып. 432, с. 3-9.
5. Constant Temperature Anemometry Equipment Catalog. DISA Electronic A/S. DK-2740 Skovlunde. Denmark. - Printed in Denmark, August, 1976, Publ. N 6204 E. -8p.

В.А.Кузьмин, Ю.В.Роголев, Н.П.Фатеев

#### МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ВЫБОРУ ОБРАЗЦОВЫХ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА

С целью выбора образцовых средств измерения (ОСИ) скорости воздушного потока, авторами были проведены исследования неустойчивости коэффициента дифференциальных трубок Пито (ДТП) различной конструкции.

Для проведения исследований были изготовлены ДТП с приемной частью сферической, конусной и овальной формы.

Исследования трубок проводились в аэродинамической трубе АДС-700/100 с применением лазерного доплеровского измерителя скорости (ЛДИС) - лазерного анемометра. Измерительный объем лазерного анемометра располагался в сечении потока рабочей части аэродинамической трубы, на расстоянии 100 мм от среза сопла. В этом же сечении располагались приемные отверстия статического давления испытываемых ДТП. Приемные отверстия ДТП и измерительный объем лазерного анемометра располагались симметрично относительно оси X трубы на расстоянии 100 мм от сопла по направлению потока. Таким образом, приемник измерял скоростной напор в точке с координатами  $X = 100$  мм,  $Y = +50$  мм,  $Z = 0$ , а измерительный объем лазерного анемометра имел соответственно координаты  $X = 100$  мм,  $Y = -50$  мм,  $Z = 0$ . Затем приемник ДТП и измерительный объем ЛДИС меняли местами.

В обоих положениях было произведено по 10 измерений при скорости потока 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50 и 55 м/с.

По результатам измерений динамического давления в трубе  $\Delta P_{тр} = P_{об} - P_{атм}$  и в приемнике  $\Delta P_{пр} = (P_o - P_{пр})$ , а также по показаниям ЛДИС, были определены скорости потока в рабочей части трубы в предположении, что статическое давление  $P_{ст}$  равно атмосферному  $P_{атм}$ .

( $P_{ст} = P_{АТМ}$ ) и коэффициент приемника ДТП равен единице. Скорость воздушного потока в трубе определяли с помощью выражений:

$$U_{ТР} = \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta P_{ТР} \mu_{ТР}} = \sqrt{\frac{2}{\rho_0} \frac{1013}{P_{АТМ}} \frac{T_{АТМ}}{288} F_{ТР} \Delta h \mu_{ТР}} \quad (1)$$

$$U_{ПР} = \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta P_{ПР} \xi_{ПР}} = \sqrt{\frac{2}{\rho_0} \frac{1013}{P_{АТМ}} \frac{T_{АТМ}}{288} F_{ПР} \Delta h \mu_{ПР}} \quad (2)$$

$$U_{ЛДИС} = \frac{S_M}{T} = \frac{2 S_M}{S + (N_{max} + 2N_{min})} = \frac{97,95 \cdot 10^{-6}}{(N_{max} + 2N_{min}) St \cdot 10^{-6}} \quad (3)$$

Были исследованы характерные зависимости  $U_{ТР}$ ,  $U_{ПР}$ , и  $U_{ЛДИС}$  от числа оборотов  $N$  вентилятора для всех испытаний в обоих положениях. Лазерный анемометр выдает время между метками  $St$  (в мкс) и число меток в периоде и полупериоде на экране измерителя.

Анализ полученных зависимостей показал, что значения скорости, рассчитанные с помощью уравнений (1) и (2), практически совпадают. В то же время значения скорости, измеряемой с помощью ЛДИС, во всем исследуемом диапазоне несколько занижены. Причина этого явления может быть выяснена при дальнейших исследованиях. В результате 10-кратного сличения показаний ДТП, имеющего приемник сферической формы, получены средние значения коэффициента  $\xi_{ср}$  при различной скорости воздушного потока в диапазоне 10-55 м/с (табл.1).

Таблица 1

$U$ м/с	10	20	30	40	50	55
$\xi_{ср}$	0,9788	0,9895	0,9925	0,9924	0,9961	0,9963

Среднее (из 10) значение коэффициента для всего диапазона скоростей, рассчитанное по методу наименьших квадратов, равно  $\xi = 0,9965 \pm 0,0003$ .

Исследования ДТП с приемником конической формы показали, что коэффициент  $\xi$  близок к единице:  $\xi = 1,0037$ . В диапазоне скоростей 20-60 м/с (табл.2) наблюдается тенденция к некоторому уменьшению значения среднего арифметического  $\xi$ . В табл.2 приведены также значения СК0, вычисленные по формуле

$$\sigma_{\xi} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum \delta_{\xi i}^2} \quad (4)$$

Таблица 2

Результаты исследований коэффициента  $\xi$  для ДТП с приемником конической формы

	$U$ , м/с				
	20	30	40	50	60
$\xi$	1,004	1,012	1,008	1,001	1,005
$\sigma_{\xi} \cdot 10^{-3}$	29,4	5,6	4,4	1,9	1,8
$\sigma_{\xi_{ср}} = \frac{\sigma_{\xi}}{\sqrt{n}} \cdot 10^{-3}$	8,9	1,7	1,3	0,56	0,54

Исследования влияния угла установки ДТП относительно оси воздушного потока показали, что в диапазоне  $0-20^{\circ}$ , при постепенном увеличении угла, происходит увеличение показаний приемника. Результаты сравнения трубок с коническим и сферическим приемниками показали, что коэффициент  $\xi$  трубки с коническим носиком (типа *NLP*) стабильный в более широком диапазоне скоростей воздушного потока.

В работе были проведены также исследования макета измерителя скорости, основанного на вихревом методе. Этот метод основан на том, что производится измерение частоты вихреобразования за плохо обтекаемым телом. Этот метод является весьма перспективным. Применение этого метода позволяет практически исключить основной источник погрешности, присущий термоанемометрам, а именно, нестабильность градуировочной характеристики. Исследования макета проводились на стенде ГДС 60/20. Воспроизводились скорости воздушного потока 0,2; 1,0; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0 м/с. За плохо обтекаемым телом (цилиндр диаметром 1 мм) устанавливался пленочный преобразователь в трубчатом кожухе с отверстиями. На каждой из устанавливаемых скоростей воздушного потока с помощью анализатора спектра определялась частота  $F$  срывов вихрей.

Как показал анализ полученных результатов, на отметке 0,2 м/с максимальная относительная погрешность измерения скорости этим методом не превышала  $\delta_{\text{макс}} = \pm 6\%$ . С увеличением скорости значение  $\delta_{\text{макс}}$  убывало и при  $U = 4$  м/с она составляла  $\delta_{\text{макс}} = \pm 1,7\%$ . В настоящее время авторами ведутся работы по изучению срыва потока за различными по форме плохо обтекаемыми телами (конус, клин, шар и т.п.) с целью получения сигнала максимально приближенного к синусоидальному.

Для сравнения были проведены исследования коэффициента  $\xi$  трубок Пито с применением лазерного анемометра (ЛА) фирмы "Малверн" типа Т-6200. Измерения проводились в диапазоне скоростей 0,5-5,0 м/с. При измерениях вычислялись значения скоростей потока по ЛА и одновременно

менно регистрировался период давлений, фиксируемый исследуемой трубкой Пито в комплекте с частотным дифференциальным манометром. Результаты исследований зависимости  $\xi$  от  $U$  в диапазоне 0,5-4,1 м/с приведены в табл.3.

Таблица 3

$U$ м/с	$\xi$	$U$ м/с	$\xi$	$U$ м/с	$\xi$
0,54	0,78	1,17	0,87	2,17	0,94
0,60	0,85	1,26	0,98	2,22	0,91
0,74	0,83	1,37	0,97	2,45	0,94
0,82	0,91	1,52	0,91	2,67	0,95
0,94	0,85	1,81	0,93	3,00	0,95
1,05	0,86	1,96	0,93	4,10	0,95

Анализируя результаты исследований необходимо отметить следующее:

1. Трубку Пито можно применять для измерения скоростей воздушного потока в диапазоне 0,6-5 м/с;

2. Коэффициенты трубки равны:  $\xi = 0,86 \pm 0,03$  (при  $U = 0,6-1,5$  м/с) и  $\xi = 0,95 \pm 0,03$  (при  $U = 1,5-5,0$  м/с);

3. Применение трубок Пито в диапазоне скоростей  $U < 5$  м/с возможно лишь при отсутствии пульсаций давления.

С целью выбора регистрирующего прибора в системе "трубка Пито - манометр" были также проведены исследования дифференциальных манометров ДМЭ-1-25 и ПД-5. Трудность в подборе или разработке регистрирующего прибора (манометра) заключается в том, что для определения скорости воздушного потока с помощью трубок Пито в диапазоне 0,5-5 м/с необходимо измерять разность статического и динамического напоров, составляющую десятые, а иногда даже сотые доли миллиметра водяного столба (по делениям микроманометра). Результаты исследований манометров ДМЭ-1-25 и ПД-5 показали, что относительная погрешность их градуировки в диапазоне давлений ниже 0,1 мм вод.ст. превысила 10%. Таким образом, для системы трубка Пито - манометр и для аттестации самих трубок Пито в качестве ОСИ в диапазоне  $U < 5$  м/с необходим более чувствительный манометр для измерения малого перепада давления.

Были проведены исследования порога реагирования чашечного анемометра МС-13. До реконструкции анемометра его значение составляло 0,85 м/с. В процессе исследований был предпринят ряд мер по улучшению конструкции чашечного анемометра. В результате замены часового механизма на бесконтактный преобразователь числа оборотов в импульсы с последующей регистрацией их на частотомере 43-34А с фотообразо-

вателя (порог уменьшился до 0,78 м/с). После замены стеклянных опор оси анемометра на специальные опоры порог реагирования снизился до 0,75 м/с. Исследования показали, что существенно снизить  $U_0$  не удалось; целесообразно провести исследования крыльчатых анемометров в качестве ОСИ в диапазоне скоростей 0,2-5,0 м/с.

В заключение рассмотрим методику аттестации трубок Пито с применением лазерного анемометра (ЛА) и методику аттестации самого ЛА. Метрологическая аттестация ДТП, рекомендуемых в качестве ОСИ, включает в себя экспериментальные исследования в воздушном потоке с целью получения коэффициента трубки  $\xi$  путем непосредственного сличения показаний трубки с показаниями ЛА с фотонной корреляцией типа Т-6200. Аттестуемая ДТП устанавливается в рабочую часть АТ таким образом, чтобы геометрическая ось приемной части совпала с горизонтальной плоскостью, проходящей через геометрическую ось рабочей части АТ. Измерительный объем ЛА размещается в центре выходного сечения сопла. При этом расстояние между измерительным объемом ЛА и плоскостью приемного отверстия полного давления ДТП должно быть не менее десяти диаметров исследуемой ДТП. Коэффициент  $\xi$  аттестуемой ДТП определяется по формуле

$$\xi = \frac{V_{\text{ЛА}}}{V_{\text{ТР}}}, \quad (5)$$

где  $V_{\text{ЛА}}$  - скорость воздушного потока, измеренная с помощью ЛА,  $V_{\text{ТР}}$  - скорость воздушного потока, измеренная с помощью аттестуемой ДТП.

Методика аттестации ДТП с помощью ЛА в техническом плане не сложна. Больше трудностей возникает при аттестации непосредственно ЛА "Малверн".

Аттестация ЛА производится путем непосредственного сличения его показаний с показаниями эталона и получения зависимости

$$V_{\text{ЛА}} = F(V_{\text{Э}}), \quad (6)$$

где  $V_{\text{ЛА}}$  - скорость потока, измеренная лазерным анемометром,  $V_{\text{Э}}$  - скорость потока, заданная эталоном.

Линейная скорость  $V_{\text{а}}$ , измеренная ЛА, вычисляется по формуле

$$V_{\text{а}} = \frac{\lambda}{2 \sin \theta \tau}, \quad (7)$$

где  $\lambda$  - длина волны излучения лазера ( $\lambda = 632,8$  мкм);  $2 \theta$  - угол между лучами, выходящими из расщепителя;  $\tau$  - время перемещения оптической неоднородности.

Измерение угла  $\theta$  производится следующим образом. Лучи лазера направляются таким образом, чтобы общая база  $N$  составляла  $N = 15$  м. Регулировкой расщепителя устанавливается соответствующий угол  $\theta$ . По заданным значениям  $X$ ,  $l$ ,  $N$  из следующей формулы можно определить угол  $\theta$ :

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{tg} \theta &= \frac{l}{2X}, \\ \operatorname{tg} \theta &= \frac{l}{2(N-X)}, \end{aligned} \right\} \operatorname{tg} \alpha = \frac{l+l}{2N}; X = \frac{l \cdot N}{l+l}. \quad (8)$$

где  $l$  - расстояние между лучами при выходе из расщепителя;  $L$  - расстояние между лучами на базе  $N$ ;  $X$  - расстояние от расщепителя до точки пересечения лучей (фокус).

Время  $\tau$  определяется по выходному сигналу фотонного коррелятора с помощью осциллографа. На экране высвечивается синусоида набранная из 64 дискретных точек. Расстояние между точками задается на передней панели коррелятора соответствующим переключателем. Период синусоиды определяется по количеству точек между максимумами и расстоянию между точками. Величина  $U$  задается эталоном с погрешностью не выше 0,01%. Результаты сличения показали, что погрешность измерения скорости в диапазоне 0,1-50 м/с не превысила 0,5%.

На основании экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Напорные трубки Пито могут быть применены в составе рабочего эталона скорости воздушного потока в диапазоне скоростей 0,6-5 м/с при условии разработки регистрирующего прибора (манометра) для измерения перепадов давления ( $\Delta P$ ), не превышающих 0,01 мм вод.ст. Кроме этого, при использовании трубок Пито необходимо соблюдать ряд требований, а именно: поток воздуха должен быть равномерным, а пульсации давления  $\Delta P$  отсутствовать (или сведены к минимуму).

2. Перспективным следует считать измеритель скорости потока воздуха, основанный на вихревом методе. В диапазоне скоростей потока 2,0-4,0 м/с относительная погрешность изменяется в диапазоне 6-1,7%. При соответствующей доработке средств измерений, основанных на этом методе, эту погрешность можно свести к минимуму.

3. Исследования механических анемометров типа МС-13 показали, что применение их в качестве образцовых средств измерений возможно лишь при снижении порога реагирования до 0,2-0,3 м/с; этого можно добиться при существенном изменении их конструкции. В качестве образцовых средств измерения скорости воздушного потока целесообразно использовать крыльчатые анемометры.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ СРЕДСТВ  
ИЗМЕРЕНИЙ СКОРОСТИ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА

Наиболее важным направлением метрологического обеспечения народного хозяйства страны является исследование метрологической надежности средств измерений (СИ).

Под метрологической надежностью понимается свойство СИ сохранять значения своих метрологических характеристик в заданных пределах в течение всего межповерочного интервала при определенных условиях эксплуатации. Так как метрологический отказ по характеру проявления является скрытым, очевидно, что метрологическая надежность представляет собой один из основных факторов обеспечения единства и достоверности измерений. Отсюда следует, что оценка качества метрологического обеспечения не может быть полной без учета метрологической надежности средств измерений.

Одним из наиболее важных метеорологических параметров является скорость воздушного потока. Задача обеспечения требуемого уровня метрологической надежности СИ скорости воздушного потока достаточно сложна и требует комплексного подхода к решению, а именно: всестороннего изучения условий эксплуатации СИ, оценки надежности СИ не только при выпуске их из производства, но и при эксплуатации.

Для исследования метрологической надежности СИ скорости воздушного потока был проведен ряд экспериментальных исследований по определению скорости изменения их метрологических характеристик во времени в течение 1 года. Так как указанные СИ эксплуатируются в широком диапазоне скоростей, то исследования проводились по всему диапазону для следующих типов СИ: анемометров М-47, М-49, МС-13, М63-МР, М63-М1. Для исследования метрологической надежности были использованы результаты контрольных испытаний указанных типов СИ на надежность проведенных на Сафоновском заводе ГМП.

Средства измерения скорости воздушного потока эксплуатируются в различных климатических зонах, что обуславливает различие режимов их эксплуатации, а именно различие интенсивности протекания процессов определяющих метрологическую надежность.

Метрологическую надежность СИ определяют следующие физические процессы: приработка, старение, износ. Кроме того, на надежность СИ оказывает влияние процесс управления надежностью, т.е. ремонт, поверка, аттестация, юстировка, подстройка параметров и т.п. Для исследования метрологической надежности СИ необходимо установить как влияют указанные процессы на погрешность измерения скорости воздушного

потока при различных режимах эксплуатации, а именно при различных скоростях воздушного потока. С этой целью в ГГО и ВНИИМ проведены исследования зависимости погрешности измерения скорости воздушного потока от скорости потока. Анализ результатов испытаний на Сафоновском заводе ГМП позволил получить аналогичные зависимости погрешности измерений от скорости в три момента времени в процессе эксплуатации, т.е. удалось установить как изменяются со временем эти зависимости. На рис.1-4 приведены полученные зависимости для указанных типов СИ и их изменение при непрерывной эксплуатации.

В результате анализа полученных зависимостей на ЭВМ /1/ получены аналитические выражения зависимости погрешности измерения скорости воздушного потока от скорости потока для каждого типа СИ, а также оценки коэффициентов, входящих в аналитические выражения: дисперсия (Д) и среднее квадратическое отклонение (СКО).

Анемометр типа М-47:

$$\Delta(V) = 0,292510 - 0,060478 V + 0,006861 V^2 - 0,000232 V^3 + 0,000002 V^4 + 0,000000073 V^5 \quad (1)$$

Д	СКО
---	-----

0,000489	0,022121
0,000158	0,012577
0,000006	0,002353
0,00000002	0,000146
0,0	0,000004
0,0	0,00000003

Доля объясненной вариации исходных данных составляет 99,97 %.

Анемометр типа М-49

$$\Delta(V) = 0,028758 + 0,039818 V + 0,000731 V^2 - 0,000127 V^3 + 0,0000024 V^4 \quad (2)$$

Д	СКО
---	-----

0,008204	0,090574
0,002051	0,045283
0,000019	0,004436
0,00000002	0,000147
0,00	0,000001

Доля объясненной вариации исходных данных составляет 99,91 %.

Анемометр типа МС3-М1

$$\Delta(V) = 0,381021 - 0,112684 V + 0,012552 V^2 - 0,000537 V^3 + 0,000011 V^4 - 0,00000008 V^5 \quad (3)$$

Д	СКО
0,170738	0,413204
0,020622	0,143607
0,000247	0,015723
0,0000005	0,000706
0,0	0,000014
0,0	0,00000009

Доля объясненной вариации исходных данных составляет 93,85 %.

Анемометр типа МСЗ-МР

$$\Delta(V) = 0,06741 + 0,048379V - 0,004041V^2 + 0,000163V^3 - 0,0000028V^4 + 0,00000002V^5 \quad (4)$$

Д	СКО
0,002575	0,050745
0,000721	0,026851
0,000011	0,003367
0,00000003	0,000162
0,0	0,000003
0,0	0,00000002

Доля объясненной вариации исходных данных составляет 96,75 %.

Полученные аналитические выражения (1)-(4) достаточно точно описывают исходные данные, полученные экспериментальным путем в аэродинамических трубах. Объем выборок, исследуемых СИ достаточно представительен (более 100 СИ), что позволяет сделать следующие выводы:

Существующее в настоящее время представление о линейной зависимости погрешности измерения скорости воздушного потока от скорости для исследованных типов СИ неправомерно и физически необоснованно. Линейная зависимость объясняет в некоторой степени лишь влияние функции преобразования приборов и не учитывает влияние процессов приработки, старения и износа приборов.

Физическим обоснованием достоверности нелинейного вида законов зависимости погрешности измерения от скорости воздушного потока является следующее. Различие режимов эксплуатации СИ при различных скоростях воздушного потока, а вследствие этого различие интенсивности протекания процессов приработки, старения и износа элементов конструкции СИ обуславливает неравномерность распределения погрешности измерения в зависимости от средней скорости, при которой эксплуатируется СИ. Наглядным подтверждением этому может служить изменение зависимости погрешности от скорости потока со временем. Особенно наглядно иллюстрируется процесс приработки элементов конструкции приборов при скоростях выше 10 м/с. Всего за  $T = 600$  часов приработки погрешность измерения скорости воздушного потока на скорости 50 м/с сни-

жается более, чем в 2 раза по сравнению с погрешностью, указанной в паспорте прибора. Для всех зависимостей (1)–(4), применение которых представлено на рис.1–4 имеют нелинейный вид.

Погрешность измерения скорости воздушного потока с помощью анемометров указанных типов для различных климатических зон может быть рассчитана по аналитическим зависимостям (1)–(4). Анализ полученных аналитических выражений позволяет сделать вывод о нелинейности распределения метрологической надежности для указанных выше типов СИ, а следовательно, и о необоснованности существующих в настоящее время единых межповерочных интервалов, постоянных для всех типов СИ и о необходимости оптимизации МПИ с учетом режимов эксплуатации СИ в различных климатических зонах СССР.

Наиболее благоприятным режимом эксплуатации СИ скорости воздушного потока, является диапазон скоростей 5–10 м/с, при которых моменты трения минимальны, а износ конструкции приборов незначителен.

Наименее благоприятным режимом эксплуатации СИ является скорость воздушного потока  $V = 35$  м/с. При этой скорости процессы старения и износа протекают наиболее интенсивно для всех типов рассматриваемых СИ (даже по сравнению со скоростями воздушного потока  $V = 40$ –50 м/с); это очевидно связано с конструкцией приборов.

Из полученных экспериментальных данных средняя скорость изменения погрешности измерения скорости воздушного потока во всем диапазоне скоростей равна:

$$\alpha_i = \frac{d\Delta}{dt} = \frac{0,06}{600} = 0,0001 \text{ (м/с)/ч,}$$

что при существующем МПИ = 12 мес (10000 ч) и линейной модели дрейфа погрешности  $\Delta$  во времени составит:

$$y_0(t) = \sum_{i=1}^{N-1} \alpha_i \cdot t = 0,0001 \times 10000 = 1,000 \text{ м/с.}$$

Оценка дрейфа погрешности измерения скорости воздушного потока за МПИ позволяет приблизительно оценить значение МПИ, при котором обеспечивается требуемая предельная погрешность измерения  $y_0 = 0,5 \pm 0,005y$ , т.е. МПИ = 6 мес.

С помощью полученных аналитических выражений (1)–(4) можно оценить погрешность измерения скорости воздушного потока в различных районах СССР.

В Европейской части, в Восточной Сибири и в Центральных районах Урала при скорости воздушного потока равной  $\bar{V} = 5$ –6 м/с погрешность измерения составит

$$\Delta(V) = 0,13$$
–0,17 м/с,  $\Delta(\bar{V}) = 0,23$ –0,27 м/с,  $\Delta(V) = 0,05$ –0,09 м/с,  $\Delta(\bar{V}) = 0,23$ –0,27 м/с,

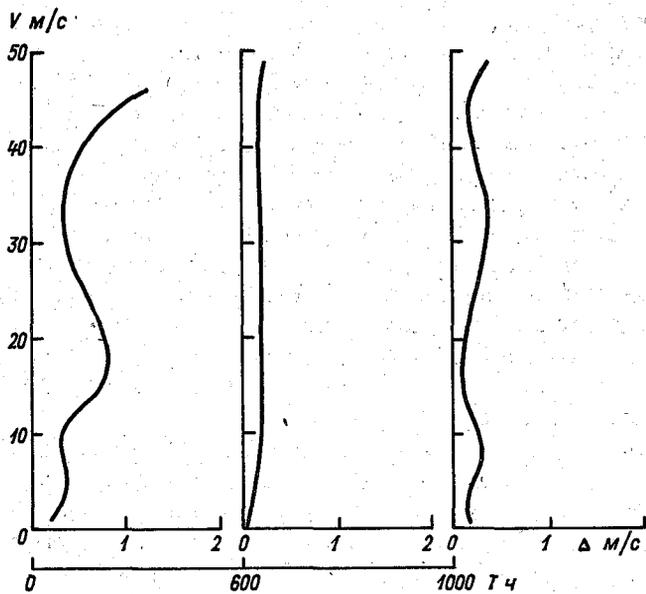


Рис. I

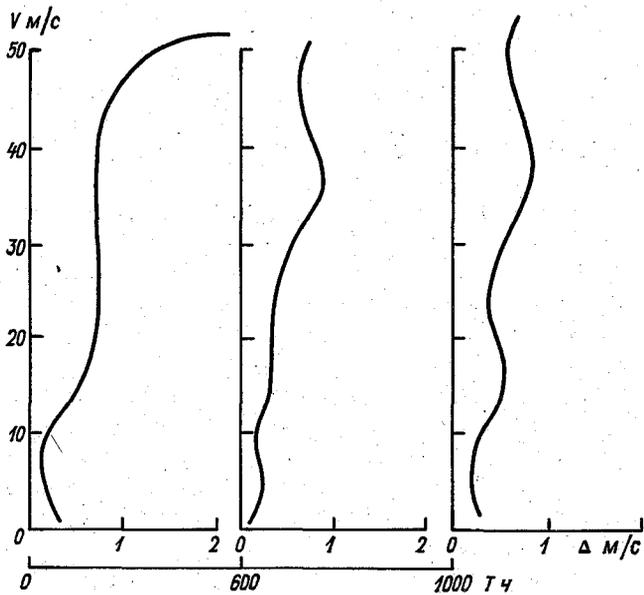


Рис. 2

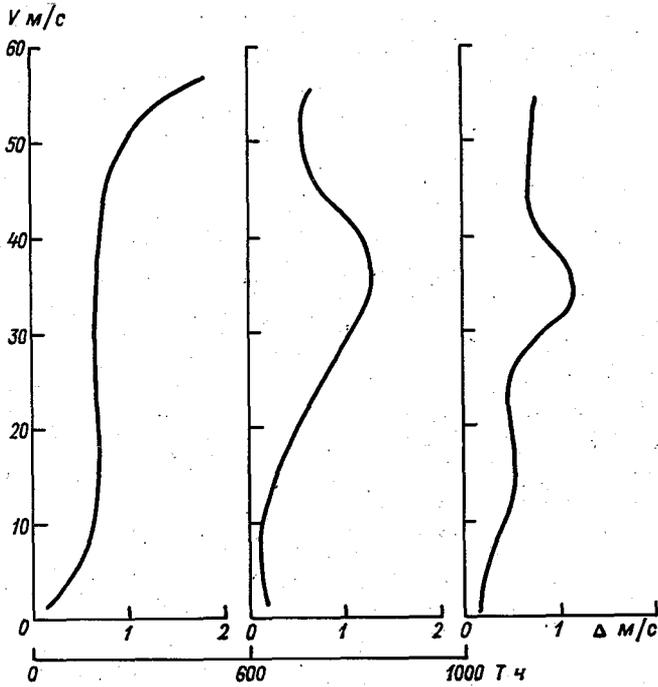


Рис.3

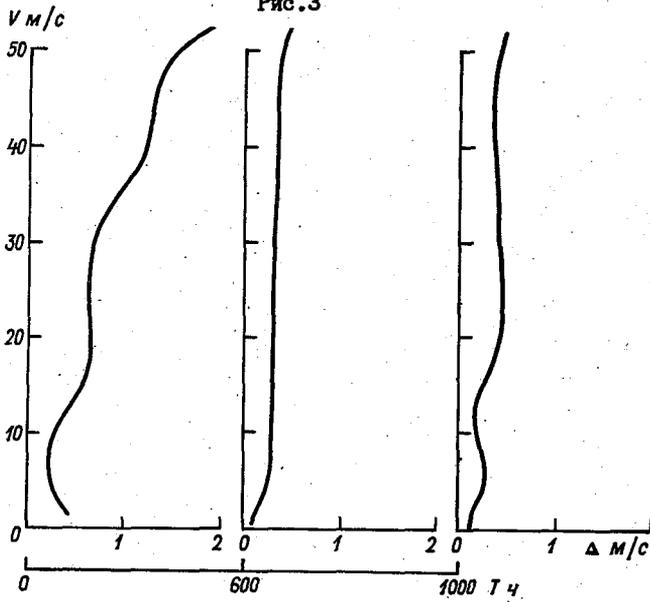


Рис.4

соответственно для анемометров типа М-47, М-49, М63-М1, М63-МР.

В Центральной Европе, Западной Сибири, Южном Казахстане при  $\bar{V} = 8-10$  м/с, а также в районах Крайнего Севера, на Каспии и Камчатке при  $\bar{V} = 15-20$  м/с погрешность измерения указанных типов СИ составит

$$\bar{V} = 8-10 \text{ м/с} - \Delta(V)_{\text{М-47}} = 0,10-0,14 \text{ м/с}; \quad \Delta(V)_{\text{М-49}} = 0,35-0,39 \text{ м/с};$$

$$\Delta(V)_{\text{М63-М1}} = 0,04-0,07 \text{ м/с}; \quad \Delta(V)_{\text{М63-МР}} = 0,22-0,26 \text{ м/с};$$

$$\bar{V} = 15-20 \text{ м/с} - \Delta(V)_{\text{М-47}} = 0,25-0,29 \text{ м/с}; \quad \Delta(V)_{\text{М-49}} = 0,41-0,45 \text{ м/с};$$

$$\Delta(V)_{\text{М63-М1}} = 0,57-0,61 \text{ м/с}; \quad \Delta(V)_{\text{М63-МР}} = 0,30-0,34 \text{ м/с}.$$

Кроме этого в системе Госкомгидромета СССР был организован сбор статистических данных эксплуатационной метрологической и технической надежности, указанных СИ. Тщательный анализ условий эксплуатации, причин выхода элементной базы приборов, а главное изучение изменения во времени законов распределения погрешности измерения по диапазону позволили сделать ряд важных, с практической точки зрения, выводов:

1. Изменение метрологической надежности по диапазону измерений носит нелинейный характер, что обуславливает необходимость расчета межповерочных интервалов для определенных, фиксированных точек диапазона.

2. Дополнительная приработка СИ скорости воздушного потока на месте эксплуатации в течении 10-14 дней позволяет почти вдвое уменьшить погрешность измерения по всему диапазону измерений.

3. Основными причинами выхода СИ из строя является их метрологический отказ и частая транспортировка.

Исследования метрологической надежности в настоящее время уже полностью автоматизированы и проводятся на ЭВМ.

Для этих целей разработан специальный пакет прикладных программ: "Численный прогноз и оптимальное управление" /1/, позволяющий проводить комплексное исследование, прогнозирование и многопараметрическую оптимизацию алгоритмов управления метрологической надежностью. Вследствие того, что экспериментальные исследования дрейфа метрологических параметров СИ скорости ветра сложные и дорогостоящие, основной необходимой информацией о метрологической надежности, на которую ориентирован пакет прикладных программ являются результаты заводских испытаний на надежность, проводимые в соответствии с ГОСТ 13216-74. В результате исследований метрологической надежности с помощью ЭВМ получены следующие аналитические выражения изменения математического ожидания наработки до метрологических отказов  $E_T(V)$  (в мес) в зависимости от скорости воздушного потока

для анемометра типа МС-13:

$$E_T(V) = 79,173 - 17,244V + 1,738V^2 - 0,025V^3; \quad (5)$$

для анемометров типа М63-М, М63-М1

$$E_T(V) = 7,326 + 0,578V - 0,044V^2 + 0,0006V^3; \quad (6)$$

для анемометров типа М-47, М-49

$$E_T(V) = 7,361 + 0,011V - 0,0009V^2 - 0,00001V^3. \quad (7)$$

Полученные выражения (5)–(7) позволяют представить общий вид законов распределения математического ожидания наработки до метрологических отказов по диапазону измерений для СИ скорости воздушного потока (рис.5–7). На рис.5 приведен общий вид распределения математического ожидания наработки до метрологических отказов для ручных анемометров типа МС-13 по диапазону. Из полученных результатов ясно, что существующий МПИ, равный 12 мес, может быть увеличен, по край-

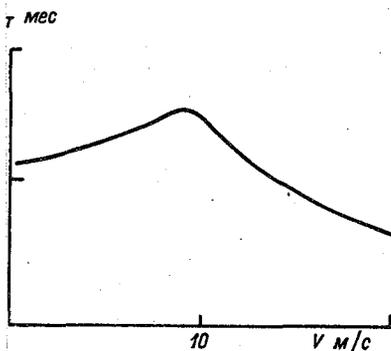


Рис.5

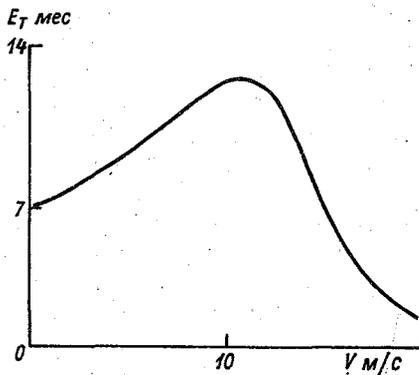


Рис.6

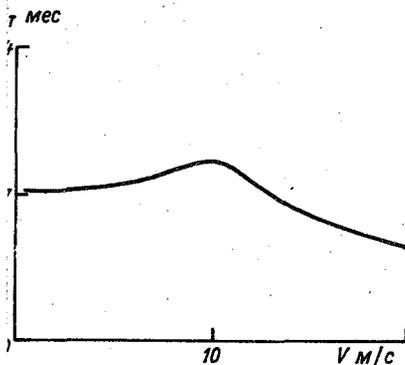


Рис.7

ней мере, в 3 раза. На рис.6 приведен общий вид распределения  $E_T(V)$  для СИ типа М63-М, М63-М1 по диапазону скоростей. Из полученных результатов ясно, что существующий МПИ, равный 12 мес, обеспечивает в некоторой степени лишь одну точку диапазона скоростей, а именно районы со средней скоростью 10 м/с, для остальных районов СССР МПИ должны быть существен-

но уменьшены, ориентировочно до 6–7 мес. На рис.7 приведен общий вид распределения  $E_T(V)$  для СИ типа М-49, М-47, полученные результаты свидетельствуют о том, что существующий МПИ значительно завышен, так как максимальное значение математического ожидания наработки до метрологического отказа при выпуске СИ производства

составляет всего 7,361 мес, что и определяет значение МПИ равное 7 мес.

Таким образом, из результатов исследований метрологической надежности СИ скорости воздушного потока можно сделать следующие выводы:

1. Межповерочные интервалы для СИ скорости воздушного потока должны назначаться по районам СССР, т.е. учитывать влияние агрессивности внешней среды на изменение во времени метрологической надежности.

2. Для СИ типа МС-13 МПИ могут быть существенно расширены. Ориентировочные значения МПИ характеризуются полученными аналитическими выражениями распределения математического ожидания наработки до метрологических отказов по диапазону скоростей.

3. Для СИ типа М-47, М-49, М63-М, М63-М1 для обеспечения метрологической надежности на требуемом уровне  $P = 0,80$  необходимо уменьшение МПИ ориентировочно до 8-7 мес.

4. Общий вид закона распределения наработки на метрологические отказы СИ скорости воздушного потока по диапазону измерений имеет одномодальное распределение с максимумом математического ожидания наработки до метрологических отказов на скорости 10 м/с.

Физически подобное явление объясняется достаточно просто.

При скоростях около 10 м/с моменты трения в осях СИ скорости воздушного потока пренебрежимо малы, а износ еще недостаточно значителен, т.е. это наиболее благоприятный режим эксплуатации.

При скоростях менее 10 м/с моменты трения значительно возрастают, а на скоростях 1-2 м/с соизмеримы с давлением воздушного потока на ветроприемники, поэтому погрешности измерения на малых скоростях растут, а следовательно наработка до метрологического отказа уменьшается. При скоростях более 10 м/с моменты трения пренебрежимо малы, но уже значителен износ элементов конструкции СИ. Наблюдается разбалтывание осей приборов, износ подшипников, изменение шероховатости поверхностей ветроприемников, резко падает надежность электронных элементов конструкции.

5. Проведенный комплекс исследований изменения метрологической надежности СИ скорости воздушного потока во времени позволил, аналитически оценить эксплуатационную метрологическую надежность СИ типа М-47, М-49, М63-М, М63-М1, МС-13 во всем диапазоне измеряемых скоростей воздушного потока, а также обосновать целесообразность оптимизации существующего для них единого МПИ и оценить ориентировочные значения МПИ с учетом одного из наиболее существенных факторов агрессивности внешней среды на месте эксплуатации.

#### Список литературы

1. Окоренков В.Ю. Численный прогноз и оптимальное управление метрологической надежностью средств измерений.-Труды ГГО, 1982, вып.452.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЯ СКОРОСТЕЙ В РАБОЧЕЙ ЗОНЕ  
АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ТРУБЫ

При метрологических исследованиях аэродинамической трубы (АТ) обязательным является исследование неравномерности потока в рабочей зоне.

Оценка неравномерности потока в /1/ производится с помощью коэффициента  $\mu$ , выражающего отношение максимальной скорости воздушного потока ( $V_{max}$ ) к средней скорости ( $V_{cp}$ ) в выбранном сечении рабочей зоны. Таким образом, коэффициент  $\mu$  характеризует неравномерность поля скоростей в определенном сечении и не позволяет оценивать неравномерность воздушного потока во всей рабочей зоне аэродинамической трубы.

Рассмотрим факторы, обуславливающие неравномерность поля скоростей в рабочей зоне АТ. К ним относится влияние несовершенства выполнения конструктивных элементов аэродинамической трубы (фактор А). Появляется при измерении в любом сечении. А также нестабильность измерительных приборов, ошибки операторов и др. (фактор В). Появляется при измерении в каждой точке сечения.

Для исследования неравномерности воздушного потока в рабочей зоне представляется целесообразным применить аппарат дисперсионного анализа /2/. Рассмотрим дисперсию как оценку неравномерности воздушного потока, которая позволяет установить степень влияния каждого из перечисленных факторов на результат измерения скорости воздушного потока. Суммарную дисперсию, характеризующую неравномерность распределения результатов измерений, можно представить в виде

$$\sigma_{\Sigma}^2 = \sigma_A^2 + \sigma_B^2, \quad (1)$$

где  $\sigma_{\Sigma}$  - суммарная дисперсия;  $\sigma_A$  - дисперсия, обусловленная фактором А;  $\sigma_B$  - дисперсия, обусловленная фактором В.

Скорость воздушного потока в любой точке рабочей зоны трубы можно представить в виде

$$V_i = \bar{V} + \Delta U_A + \Delta U_B, \quad (2)$$

где  $V_i$  - скорость воздушного потока в любой точке рабочей зоны;  $\bar{V}$  - средняя скорость воздушного потока в рабочей зоне;  $\Delta U_A$  - отклонение скорости от среднего значения, вызванное действием фактора А;  $\Delta U_B$  - отклонение скорости от среднего значения, вызванное действием фактора В.

Используя результаты сравнения дисперсий, можно установить взаимное влияние факторов А и В методом  $F$ -распределения [2]. Расхождение дисперсий указывает на существенное влияние того или иного фактора на результат измерений. Несущественное расхождение дисперсий позволит считать результаты взятыми из одной совокупности измерений с общей дисперсией, характеризующей неравномерность поля скоростей в рабочей зоне.

В качестве примера рассмотрим материалы исследований аэродинамической трубы. Измерения скорости  $U_i$  производились в трех сечениях ( $m = 3$ ) в 21 точке каждого сечения ( $n = 21$ ), т.е. всего произведено 63 измерения.

В результате измерений дисперсионного анализа, проведенного на основе данных измерений получено, что так как  $\sigma_B^2 > \sigma_A^2$ ,

$$F_B = \frac{\sigma_B^2}{\sigma_A^2} = \frac{0,0410}{0,0066} = 6,2.$$

При уровне значимости 5 % и при числе степеней свободы  $K_1 = m(n - 1) = 60$ ;  $K_2 = m - 1 = 2$ ;  $F$  табл.  $\approx 19,47$

Исходя из того, что  $F_B < F_{табл}$  следует, что влияние факторов А и В на неравномерность воздушного потока незначительно и в качестве дисперсии необходимо принять  $\sigma_p^2 = 0,0399$  и  $\sigma_z \approx 0,2$ .

Таким образом, неравномерность воздушного потока в рабочей зоне АТ, вычисленная по формуле

$$\Delta = \pm t \sigma \quad (3)$$

где  $\Delta$  - неравномерность поля скоростей,  $t$  - показатель Стьюдента,  $\sigma$  - среднее квадратическое отклонение, будет равна

$$\Delta = \pm 1,96 \cdot 0,20 = \pm 0,39 \text{ м/с или } 2,6 \%$$

И окончательно, измеренная скорость в любой точке рабочей зоны трубы равна

$$U_{16} = 15,09 \pm 0,39 \text{ м/с.}$$

Аналогично была произведена обработка результатов при других скоростях воздушного потока.

На основании проведенных расчетов можно сделать следующие выводы:

1. Дисперсия является наиболее полной характеристикой неравномерности воздушного потока в любой точке рабочей зоны.

2. Применение дисперсионного анализа позволяет оценивать влияние дестабилизирующих факторов на равномерность воздушного потока и, следовательно, целенаправленно воздействовать на всю систему "источник воздушного потока - средства измерений" при необходимости повышения точности и достоверности измерений.

### Список литературы

1. Блантер Д. Я., Роголёв Ю. В. Результаты метрологической аттестации образцовых аэродинамических труб. - Труды ГГО, 1981, вып. 432, с. 63-72.
2. Смирнов Н. Р., Дунин-Барковский И. В. Курс теории вероятностей и математической статистики. - М.: Наука, 1969.

Ю. В. Роголёв, Н. П. Фатеев

### НОРМИРОВАНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ И МЕТОДИКА АТТЕСТАЦИИ УСТАНОВОК ТИПА ПО-37

Погрешность установки ПО-37 (УПАР-01) складывается из двух основных составляющих: погрешности образцовых анемометров  $\delta_{АН}$  и погрешности аттестации (градуировки) установки группой образцовых анемометров (погрешность). Под составляющей  $\delta_{гр}$  следует понимать суммарную погрешность градуировки группы образцовых анемометров в аэродинамической трубе (АТ). Исходя из этого, предел допускаемой основной погрешности аттестации установки в целом  $\Delta_{Д(АТТ)}$  будет равен:

$$\Delta_{Д(АТТ)} = \sqrt{\left(\sum_i^n \delta_{АН_i}\right)^2 + \delta_{гр}^2} \quad (1)$$

Проанализируем исходные выражения для нормирования предела допускаемой погрешности непосредственно для группы образцовых анемометров и для установки в соответствии с требованиями локальной поверочной схемы /1/. Группа анемометров (аттестованных в АТ) в соответствии с поверочной схемой является "групповым" образцовым средством измерения скорости воздушного потока 2-го разряда в диапазоне измерения 1-20 м/с с суммарной погрешностью градуировки

$$\sum_i^n \delta_{АН_i} \leq \pm (0,1 + 0,02 V_{изм}) \text{ м/с} \quad (2)$$

В соответствии с требованиями поверочной схемы, а также методом прямых измерений и соответствующей обработкой результатов этих измерений, должен быть нормирован предел допускаемой погрешности для установки в целом так, как образцового средства воспроизводства и измерения скорости воздушного потока 3-го разряда. Исходя из того, что

соотношение погрешностей между разрядами поверочной схемы (образцовые анемометры - установка) - 2:1, выразим величину  $\Delta_{д(АТТ)}$  для установки в целом в следующем виде:

$$\Delta_{д(АТТ)} = \pm (0,2 + 0,04 U_{изм}) \text{ м/с} . \quad (3)$$

Перейдем теперь к вопросам, связанным с аттестацией установок ПО-37 и применением формул (1), (2), (3). При аттестации установки в целом, в конечном итоге, мы должны определить две метрологические характеристики. Во-первых - дисперсию точек по диапазону измерения.

$S_o^2$  и погрешность градуировки установки  $\sigma$  образцовыми анемометрами, а затем нормировать эту величину как предел допускаемой погрешности градуировки при заданной доверительной вероятности  $P = 0,95$ , т.е.  $2\sigma$  (или  $2\sqrt{S_o^2}$ ). Во-вторых определить погрешность аттестации установки в целом с учетом выражения (1). Обоснуем эти два положения, вернувшись к анализу выражения (3). Первый член этого выражения есть аддитивная составляющая погрешности (или погрешность нуля) -

$\Delta_{АД}$ ; второй член - это мультипликативная составляющая погрешности  $\Delta_{МТ}$ . Кроме этого, первый член выражения (3) определяет еще и порог реагирования установки  $U_o$ .

Как показали результаты аттестации ряда установок ПО-37 /2/, величина  $S_o^2$  и, соответственно,  $\sigma$  практически мало изменяются по диапазону измерения, и погрешность градуировки укладывается практически в интервале  $\pm 2\sigma$ . То есть кривая градуировки, рассчитываемая по экспериментальным отметкам, параллельна расчетной кривой и разброс этих точек относительно расчетной кривой равномерен. Таким образом, нормирование погрешности градуировки установки практически сводится к выполнению требования о недопустимости выхода этой погрешности за интервал, определяемый суммой  $\Delta_{АД}$  и  $\Delta_{МТ}$  для начальной отметки диапазона измерения, т.е.:

$$2\sqrt{S_o^2} = 2\sigma \leq \pm \sum_i^n (\Delta_{АД} + \Delta_{МТ}) . \quad (4)$$

Для остальных отметок диапазона величина этой погрешности не превышает величины, определяемой выражением (4), что является вполне справедливым исходя из вклада составляющей  $\Delta_{МТ}$  в выражении (3).

Погрешность аттестации установки в целом с учетом выражения (1) должна быть нормирована в виде:

$$\sqrt{\left(\sum_i^n \delta_{АН_i}\right)^2 + \delta_{ГР}^2} \leq \pm (0,2 + 0,04 U_{изм}) \text{ м/с} . \quad (5)$$

Объясним физический смысл полученных выражений (4) и (5). Действительно, при построении градуировочной кривой установки по любой из

исследованных отметок диапазона, погрешность градуировки, выраженная через  $2\sqrt{S_0^2}$  (или  $2\sigma$ ) не должна превышать значения, нормированного по (4). В тоже время погрешность аттестации установки в целом с учетом составляющих выражения (1) не превысит значения, нормированного по (5), т.к. аддитивная составляющая  $\Delta_{ад}$  есть величина **постоянная по всему диапазону измерения** ( $\Delta_{ад} = const$ ), величина  $2\sqrt{S_0^2}$  также постоянна ( $S_0^2$  и  $\sigma$  незначительно изменяются по диапазону измерения установкой скорости воздушного потока). Таким образом, основным критерием, определяющим границы интервала допустимого отклонения погрешности аттестации установки в целом, является значение мультипликативной погрешности в (3) и (5).

Исходя из выше изложенного, при нормировании погрешности установок типа ПО-37 в целом, необходимо использовать два критерия при контроле ее метрологических характеристик: погрешность отдельной градуировочной кривой установки, которая не должна превышать величины, нормированной по (4) и погрешность аттестации установки в целом, которая не должна превышать величины, нормированной по (5). Метрологический контроль этих двух характеристик даст полную информацию о точностных характеристиках установки и возможности ее применения.

В окончательном виде нормирующую формулу можно представить в виде:

$$\sqrt{\left(\sum_{i=1}^n \delta_{АН_i}\right)^2 + (2\sigma)^2} \leq \pm(0,2 + 0,04 V_{изм}) M/\sigma. \quad (6)$$

Перейдем далее к рассмотрению непосредственно методики аттестации установок ПО-37. При аттестации установки находится функциональная зависимость между показаниями образцовых анемометров  $V_{АН}$  и соответствующие им показания счетчика числа оборотов вентилятора установки  $N_{сч}$ , т.е.  $N_{сч} = f(V_{АН})$ . Многолетняя практика эксплуатации установок в Бюро поверки УГКС показала, что эта зависимость может быть описана линейным уравнением вида:

$$N_{сч} = k V_{АН} + b. \quad (7)$$

Расчет градуировочной кривой установки по экспериментальным данным сводится к нахождению коэффициентов  $k$  и  $b$  уравнения (7). Непосредственно обработка экспериментальных данных производится методом наименьших квадратов (МНК) [3], о применении которого будет сказано ниже.

Порядок аттестации следующий:

1. Устанавливается первый образцовый анемометр в установке и производятся измерения скорости воздушного потока по диапазону на

следующих отметках диапазона:  $U_0$  (порог реагирования), 1, 3, 5, 10, 15, 18 и 20 м/с. Указанные отметки диапазона можно брать близкими к этим, но при условии, что установленное значение скорости стабильно за период проведения измерений. На каждой отметке диапазона производятся синхронные отсчеты (не менее трех) по образцовому анемометру  $U_{АН}$  и счетчику числа оборотов установки  $N_{СЧ}$ . По полученным значениям вычисляют среднее значение  $\bar{U}_{АН}$  м/с и  $\bar{N}_{СЧ}$  дел/с.

2. Аналогичные измерения проводят со вторым, третьим, четвертым и пятым анемометрами и также для каждого из них вычисляют средние значения  $\bar{U}_{АН}$  м/с и  $\bar{N}_{СЧ}$  дел/с.

Полученные экспериментальные данные сводятся в таблицу. Рассмотрим методику обработки результатов аттестации МНК. Как было показано выше зависимость  $N_{СЧ} = f(U_{АН})$  описывается линейным уравнением вида (7). Задача состоит в том, чтобы по данным экспериментальным точкам и по уравнению (7) провести градуировочную кривую установки, которая была бы как можно ближе к истинной функциональной зависимости  $N_{СЧ} = f(U_{АН})$ , а сумма квадратов расстояний по вертикали от экспериментальных точек до кривой была бы минимальной.

Расчет коэффициентов  $k$  и  $b$  производится по формулам:

$$k = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{N}_{СЧ} \cdot \sum_{i=1}^n \bar{U}_{АН} - \left( \sum_{i=1}^n \bar{N}_{СЧ} \cdot \sum_{i=1}^n \bar{U}_{АН} \right) \cdot n}{\left( \sum_{i=1}^n \bar{U}_{АН} \right)^2 - n \sum_{i=1}^n \bar{U}_{АН}^2}, \quad (8)$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{N}_{СЧ} - k \cdot \sum_{i=1}^n \bar{U}_{АН}}{n}, \quad (9)$$

где  $n$  — число отметок диапазона, на которых производились измерения  $\bar{U}_{АН}$  и  $\bar{N}_{СЧ}$ . Полученные значения  $k$  и  $b$  подставляются в уравнение (7).

Для расчета погрешности градуировки (градуировочной кривой) установки по результатам измерений вычисляется дисперсия  $S_0^2$  и соответствующая ей  $\sigma$  по формулам:

$$S_0^2 = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{U}_{АН} \left( \sum_{i=1}^n \bar{U}_{АН} \right)^2 \left( n \cdot \sum_{i=1}^n \bar{N}_{СЧ} \bar{U}_{АН} - \sum_{i=1}^n \bar{N}_{СЧ} \cdot \sum_{i=1}^n \bar{U}_{АН} \right)^2}{n-2 \quad n(n-2) \quad \left[ n \cdot \sum_{i=1}^n \bar{N}_{СЧ}^2 - \left( \sum_{i=1}^n \bar{N}_{СЧ} \right)^2 \right] \cdot n(n-2)}, \quad (10)$$

$$\sigma = \sqrt{S_0^2}. \quad (11)$$

Задаваясь доверительной вероятностью  $P = 0,95$  и считая, что разброс экспериментальных точек подчиняется закону нормального распре-

деления, погрешность градуировочной кривой установки  $\delta_{гр}$  рассчитывается по формуле:

$$\delta_{гр} = 2 \sqrt{S_0^2} = 2 \sigma \quad (12)$$

Эта погрешность не должна превышать величины, нормированной по (4).

Результаты аттестации установки ПО-37 могут быть представлены в виде графика, или в виде градуировочной таблицы. Графическое представление результатов градуировки осуществляется путем построения градуировочной кривой по двум отметкам диапазона 1 м/с и 20 м/с. Градуировочная кривая рассчитывается по уравнению (7). Для контроля градуировочной кривой установки, рассчитанной по двум отметкам, целесообразно по уравнению (7) рассчитать и третью отметку диапазона, обычно для  $V = 10$  м/с. Рассчитанная точка должна лечь на кривую градуировки.

Результаты градуировки могут быть представлены и в виде таблицы с шагом квантования 0,1 м/с и 0,1 дел/с. Для расчета таблицы в уравнение (7) подставляются значения  $V_{АН}$  м/с и получают соответствующие им значения  $N_{СЧ}$  дел/с. Шаг квантования таблицы может быть и другим в зависимости от требований потребителя. Для оперативности и быстроты расчета таблицы может быть применена ЭВМ.

Зачастую возникает необходимость в уравнение (7) подставлять значения  $N_{СЧ}$  (дел/с) и получать значения  $V_{АН}$  (м/с). Исходя из этого уравнение (7) необходимо преобразовать к виду

$$\left. \begin{aligned} N_{СЧ} &= k \cdot V_{АН} + b \\ k \cdot V_{АН} &= N_{СЧ} - b \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

отсюда

$$V_{АН} = \frac{1}{k} N_{СЧ} - \frac{b}{k} \quad (14)$$

Рассмотрим на конкретном примере методику обработки результатов градуировки установки ПО-37 по МНК. В табл. 1 представлены результаты градуировки установки.

Таблица 1

$N_{СЧ}$ ДЕЛ/С	$V_{АН}$ М/С	$N_{СЧ} \cdot V_{АН}$	$N_{СЧ}^2$	$V_{АН}^2$	$\left(\frac{N_{СЧ}}{2}\right)^2$	$\left(\frac{V_{АН}}{2}\right)^2$
1	2	3	4	5	6	7
0,98	1,12	1,098	0,96	1,25		
2,69	3,04	8,180	7,24	9,24		

Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5	6	7
4,51	5,09	22,960	20,34	25,91		
6,34	7,18	45,520	40,20	51,55		
7,88	8,98	70,760	62,09	80,64	7600,35	10196,96
9,57	10,96	104,890	91,59	120,12		
11,41	13,21	150,730	130,19	174,50		
13,15	15,27	200,800	172,92	233,17		
14,56	17,13	249,413	211,99	293,44		
16,09	19,00	305,710	258,89	361,00		
$\Sigma=87,18$	$\Sigma=100,98$	$\Sigma=1160,05$	$\Sigma=1350,83$	$\Sigma=996,40$		

В табл. 1 в колонках 1 и 2 значения  $N_{сч}$  и  $\bar{U}_{ан}$  записываются в порядке возрастания, начиная с порога реагирования  $U_0$ . Произвести вычисления в соответствии с операциями, указанными в табл. 1 (колонки 3, 4, 5, 6 и 7). По колонкам 1, 2, 3, 4 и 5 произвести суммирование полученных данных вычислений. Далее произведем расчет коэффициентов  $k$  и  $b$  по формулам (8) и (9) при  $n = 10$ :

$$k = \frac{87,18 \cdot 100,98 - 1160,05 \cdot 10}{10196,96 - 10 \cdot 1350,83} = \frac{-2797,06}{-3311,34} = 0,84,$$

$$b = \frac{87,18 - 0,84 \cdot 100,98}{10} = \frac{2,36}{10} = 0,23.$$

Подставляя рассчитанные значения  $k$  и  $b$  в уравнение (7), получим

$$N_{сч} = 0,84 U_{ан} + 0,23. \quad (15)$$

По формуле (10) рассчитаем дисперсию  $S_o^2$ :

$$S_o^2 = \frac{1350,8}{8} - \frac{10197,0}{80} - \frac{(10 \cdot 1160,1 - 87,18 \cdot 100,98)^2}{(10 \cdot 996,4 - 7600,4) \cdot 80} =$$

$$= 41,392 - \frac{(2797,6)^2}{189088,0} = 41,392 - 41,391 = 0,001.$$

Отсюда значение  $\sigma$  равно:

$$\sigma = \sqrt{S_o^2} = \sqrt{0,001} = 0,03.$$

При доверительной вероятности  $P = 0,95$  значение  $2S = 0,06 \approx 0,1$ . Как показали расчеты, погрешность градуировочной кривой  $2\sigma$  не превышает величины нормированной по формуле (4), т.е.  $0,1 \leq 0,24$ .

Посмотрим далее, находится ли погрешность аттестации установки в целом в поле допуска, нормированном выражением (5). В табл. 2 приведен расчет суммарной погрешности для группы образцовых анемометров в АТ по формуле (2).

Таблица 2

	$V_{н/с}$						
	0,5	1,0	2,0	5,0	10,0	15,0	20,0
$\sum_i^n \delta_{н/с}$	0,11	0,12	0,14	0,20	0,30	0,40	0,50

В табл.3 приведены результаты расчета погрешностей, нормированных в соответствии с поверочной схемой с помощью выражения (3).

Таблица 3

	$V_{н/с}$						
	0,5	1,0	2,0	5,0	10,0	15,0	20,0
$\Delta_d$	0,21	0,24	0,28	0,30	0,40	0,50	0,60

По данным табл.2 и полученному значению погрешности градуировки установки ПО-37 рассчитаем погрешность аттестации установки в целом по формуле (1). Результаты расчета приведены в табл.4.

Таблица 4

	$V_{н/с}$						
	0,5	1,0	2,0	5,0	10,0	15,0	20,0
$\Delta_{д(атт)}$	0,12	0,13	0,15	0,21	0,31	0,40	0,50

Как видно из проведенного расчета, ни одна из точек диапазона при аттестации установки в целом не вышла за пределы допуска, нормированного выражением (5), что говорит о качественном проведении аттестации и пригодности установки к практическому применению. Аналогичные рассуждения можно отнести и к полученным погрешностям градуировочной кривой установки (см. табл.2 и формулу (4)).

#### Список литературы

1. Кассандрова О. Н., Лебедев В. В. Обработка результатов наблюдений. - М.: Наука, 1970, с. 104.
2. Фатеев Н. П. Передача размеров единиц физических величин и научно-технические мероприятия по разработке и внедрению локальных поверочных схем гидрометслужбы для метеорологических измерений. - Труды ГГО, вып.414, 1976, с. 9-19.
3. Фатеев Н. П., Роголаев Ю. В., Синицын Ю. Е.

П.Я.Никишков, В.Ю.Окоренков, Ю.В.Роголёв, Н.П.Фатеев

РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНОГО ОТКЛОНЕНИЯ УГЛА АТАКИ ВИНТОВ  
АНЕМОМЕТРОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ СОХРАННОСТИ ИХ ГРАДУИРОВОЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Для метрологического обеспечения средств измерений (СИ) скорости ветра при выпуске из производства и после ремонта используют образцовые аэродинамические трубы (АТ). Однако применение в этих целях АТ не всегда целесообразно. Поэтому используются косвенные методы проверки метрологических характеристик /1, 2/, основанные на определении оптимальных геометрических и механических параметров винтов, а также проверке работоспособности тракта с помощью имитирующих устройств.

В статье приводятся результаты исследования группы винтов анемометров типа М63-М1 проведенного с целью определения оптимального значения угла атаки  $\mathcal{Y}$  лопастей, при котором погрешность измерения скорости ветра минимальна. Для этого был проанализирован довольно большой статистический материал по исследованию аэродинамических свойств винтов и измерению номинального значения угла  $\mathcal{Y}$  за межповерочный интервал.

Оптимальное значение угла  $\mathcal{Y}$  можно определить с помощью исходного уравнения для винтового ветроприемника, связывающего скорость  $\mathcal{V}$  воздушного потока, действующего на винт, с числом оборотов  $N$  винта в единицу времени. Согласно /2/, эта зависимость может быть аппроксимирована уравнением

$$N = \frac{30}{\pi R_s} \operatorname{tg} (\mathcal{Y} - \gamma). \quad (1)$$

Выражение для выходной статистической характеристики винта  $\mathcal{V}$  с учетом (1) представим в виде

$$\mathcal{V} = B \frac{\pi R_s}{30 \operatorname{tg} (\mathcal{Y} - \gamma)}, \quad (2)$$

где  $B$  - коэффициент пересчета, устанавливаемый на масштабном делителе в пульте анеморумбометра;  $\mathcal{Y}$  - угол атаки лопастей винта;  $\gamma$  - угол между направлением момента трения и осью винта;  $R_s$  - радиус вращения винта.

Обозначим в (2) второй множитель правой части уравнения через  $k$ , тогда формула (1) примет вид:

$$N = k U. \quad (3)$$

Таким образом,  $k$  будет являться коэффициентом, характеризующим градуировочные свойства винта. Этот коэффициент функционально связан с величинами  $\psi$  и  $\gamma$  соотношением:

$$k = f(\psi, \gamma) = \frac{30}{\pi R_s} \operatorname{tg}(\psi - \gamma). \quad (4)$$

При изменении  $\psi$  ( $\Delta \psi$ ) соответственно получим выражение:

$$k = f(\psi, \gamma = \text{const}) = \frac{30}{\pi R_s} \operatorname{tg}[(\psi - \gamma) \pm \Delta \psi], \quad (5)$$

где  $\Delta \psi$  - отклонение угла атаки лопастей от некоторого номинального значения.

При производстве винтов на заводах-изготовителях, в идеальном случае добиваются выполнения следующего равенства:

$$B \frac{\pi R_s}{3a \operatorname{tg}(\psi - \gamma)} = \text{const}. \quad (6)$$

В случае выполнения (6), должны соблюдаться следующие условия:

$$\Delta_A \leq \pm (U_0 + 0,05 U) \text{ м/с} \quad (7)$$

или

$$B \frac{\pi R_s}{30 \operatorname{tg}(\psi - \gamma)} \leq \pm \Delta_A. \quad (8)$$

т.е. как выходная статистическая характеристика, так и предел допускаемой погрешности  $\Delta_A$  СИ параметров ветра не должны превышать нормированного для конкретного типа СИ значения. В условиях эксплуатации изменение  $\psi$  приводит к изменению аэродинамических свойств ветроприемника в целом, что может являться причиной выхода за пределы нормированного значения  $\Delta_A$  и, соответственно, статистической характеристики винта (1), (2). Моменты трения оси винта однозначно связаны с порогом реагирования  $U_0$  соотношением:

$$U_0 = \sqrt{\frac{2 M_{тр}}{cm \rho S R_s}} = 0,22 \sqrt{M_{тр}}. \quad (9)$$

Таким образом, по результатам прямых измерений  $\psi$  и  $M_{тр}$ , которые в свою очередь связаны с измеряемой скоростью ветра, можно определить эту скорость. Если считать, что  $\psi$  и  $M_{тр}$  не больше некоторого нор-

мированного значения, то погрешность измерения скорости ветра данным СИ не превысит значения, вычисленного по уравнению (7).

В качестве критерия нормированного отклонения  $\mathcal{Y}$  при изготовлении принято считать наибольшее отклонение любого из трех значений  $\mathcal{Y}$  каждой лопасти винта от их среднего значения  $\bar{\mathcal{Y}}$ , не превышающее 0,05 мм. Максимальное отклонение не должно отличаться от номинального значения более, чем на 0,8 мм, что соответствует допуску по углу атаки  $\pm 40$ . На практике принимают установочный (номинальный) отсчет по контршаблону равным 2 мм и требуют, чтобы отклонение среднего от установочного отсчета не превышало 0,8 мм.

Исходя из этого, ставится задача определения критерия нормирования  $\Delta \mathcal{Y}$  по 4-м лопастям для винта в целом в зависимости от изменения  $\mathcal{Y}$  и затем определение границы доверительного интервала отклонений  $\Delta \mathcal{Y}$ , при котором условия (7) и (8) будут выполняться с заданной доверительной вероятностью  $P$ .

Зададимся значением  $\Delta \mathcal{Y} = \pm 1^\circ$ . Практически угол  $\mathcal{Y}$  проверяется в наиболее широкой части лопасти. Эта точка находится на расстоянии  $z = 140$  мм от оси вращения винта при радиусе винта  $R_B = 200$  мм. Если  $\Delta \mathcal{Y}$  изменяется вдоль оси лопасти по линейному закону, т.е.

$\Delta \mathcal{Y} = A \cdot z$  (где  $A$  - приращение  $\Delta \mathcal{Y}$  на единицу длины лопасти), то при  $\Delta \mathcal{Y} = \pm 1^\circ$ ,  $z = 140$  мм и  $R_B = 200$  мм значение  $\Delta \mathcal{Y} = \pm 1,4^\circ$ . Известно, что при изготовлении винтов угол установки на конце лопасти должен иметь значение  $\mathcal{Y} = 50^\circ$ . Отсюда погрешность измерения числа оборотов  $\Delta N$  винта на его выходе можно представить в виде:

$$\Delta N = \frac{N_2 - N}{N} \cdot 100\% = \frac{tg[\mathcal{Y} \pm \Delta \mathcal{Y} - r] - tg(\mathcal{Y} - r)}{tg(\mathcal{Y} - r)} \quad (10)$$

Рассмотрим результаты экспериментальных исследований винтов в АТ. Исследования проводили для двух случаев. В первом случае определяли значения  $\mathcal{Y}$  винтов с различными сроками эксплуатации. Винты помещали в рабочую часть АТ, в которой создавали потоки с различными скоростями: 5, 15, 26 м/с. Во втором случае у новых анемометров искусственно изменяли  $\mathcal{Y}$  относительно установочного, равного  $37^\circ 30'$ . Скорость потока измерялась с помощью частотомера и микроанемометра.

Полученные результаты исследований винтов в АТ (табл. 1 и 2) обрабатывались на ЭВМ. Всего было просчитано 13 вариантов.

При **обработке** данных на ЭВМ использована программа "Численный прогноз и оптимальное управление метрологической надежностью СИ" из пакета прикладных программ, разработанная в отделе метрологии ГГО. Программа позволяет получать как стандартные характеристики полного регрессионного анализа, так и прогнозируемые значения выходных харак-

теристик винта при значениях скорости в АТ, а также их оценки в виде дисперсии и среднего квадратического отклонения (СКО). В качестве примера в табл.3 приведена выходная информация программы обработки исходных данных для винта № 1.

Таблица 1

Номер винта	Номер лопасти				Среднее значение угла атаки винта
	1	2	3	4	
1	37°30'	37°30'	36°54'	37°06'	37°15'
2	37°30'	37°30'	37°30'	37°30'	37°30'
3	37°30'	37°30'	37°30'	37°30'	37°30'
4	36°30'	37°54'	36°42'	36°42'	37°27'
5	37°48'	37°48'	37°42'	37°42'	37°45'
6	37°00'	37°00'	38°30'	37°06'	37°26'
7	38°00'	37°18'	37°18'	38°00'	37°39'
8	37°00'	36°42'	37°00'	36°54'	36°54'
9	37°30'	37°06'	37°06'	37°06'	37°12'
10	36°54'	36°48'	36°42'	37°00'	36°91'

Таблица 2

Номер винта	Номер лопасти				Среднее значение угла атаки винта
	1	2	3	4	
11	39°00'	38°00'	37°00'	36°00'	37°50'
12	40°00'	39°00'	36°00'	35°00'	37°50'
13	37°30'	37°30'	37°30'	37°30'	37°30'

Таблица 3

Скорость потока в АТ, м/с	Прогнозируемая выходная характеристика винта, м/с	Дисперсия	Среднее квадратическое отклонение
0,500	0,535	0,004	0,061
1,000	1,040	0,003	0,057
3,000	3,059	0,002	0,041
4,970	5,048	0,001	0,033
10,000	10,126	0,003	0,055
15,810	15,992	0,012	0,109
17,000	17,193	0,015	0,121
20,000	20,222	0,023	0,151
23,000	23,251	0,033	0,181
26,550	26,835	0,047	0,217

По минимальному значению дисперсии прогнозируемой выходной характеристики винта при заданных скоростях легко определить оптимальный угол  $\varphi$ . Из анализа данных видно, что оптимальный угол атаки лопасти равен  $37^{\circ}30'$ .

Следует отметить, что хотя ряд винтов имеет установочный угол атаки равный  $37^{\circ}30'$ , но для дальнейшей эксплуатации эти винты не пригодны ввиду деформации лопастей под воздействием агрессивных примесей атмосферы.

Рассмотрим далее вопрос нормирования отклонения  $\Delta \varphi$  угла атаки. При исследовании винтов выяснилось, что максимальное отклонение от номинального значения не превышает  $1^{\circ}$ . При этом, среднее значение (из 13)  $\bar{\varphi}$  для всех исследуемых винтов составило  $37^{\circ}21'$ . Отклонение среднего значения угла атаки от номинального для каждого винта не превысило  $30'$ . Для СИ скорости ветра нормирование  $\Delta v$  осуществляется по формуле (7). Погрешность измерения скорости в АТ ( $\Delta v_{AT}$ ) при продувке винтов определяют с помощью следующего соотношения, аналогичного (7):

$$\Delta v_{AT} = \pm (0,25 + 0,02 v) \text{ м/с.} \quad (11)$$

Коэффициент 0,02 (т.е. 2%) от мультипликативной составляющей погрешности приходится только на винт. Это достаточно жесткое требование, учитывающее возможный разброс выходной статистической характеристики винта за счет изменения  $\varphi$ . Результаты обработки полученных данных показали, что изменение аэродинамических свойств винта в основном зависит только от отклонения среднего значения угла атаки  $\bar{\varphi}$  винта от номинального  $\varphi_{ном}$  и в меньшей степени от отклонений по отдельным лопастям.

Таким образом, в качестве рекомендации можно предложить производить оценку метрологических характеристик винта путем определения отклонения среднего для 4-х лопастей от  $\varphi_{ном}$  значения угла атаки, причем

$$\bar{\varphi} - \varphi_{ном} \leq \pm 40' \quad (12)$$

В этом случае угол атаки любой лопасти винта может отличаться от номинального значения  $\varphi_{ном}$  на  $\pm 1,5^{\circ}$ , что не внесет существенной погрешности в выходную статистическую характеристику винта.

#### Список литературы

1. Блантер Д. Я., Роголёв Ю. В. Результаты метрологической аттестации образцовых аэродинамических труб. - Труды ГГО, 1981, вып.432, с. 63-72.

2. Суцинский Б. Л., Фатеев Н. П. Исследования по обоснованию методики контроля градуировочных характеристик измерительных преобразователей параметров ветра типа М63-М1 в условиях эксплуатации. - Труды ГГО, 1977, вып.392, с. 58-71.
3. Шестопалов Л. А., Кранцберг А. С. Унифицированный датчик ветра. - Труды НИИГМП, 1972, вып.26, с. 3-12.

Ю.В.Роголёв, Н.П.Фатеев

### РАСЧЕТ ИМИТИРУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ МЕТЕОЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ПОВЕРКЕ ЦЕНТРАЛЬНОГО УСТРОЙСТВА МЕТЕОСТАНЦИИ КРАМС

Поверка центрального устройства (ЦУ) автоматических метеорологических станций (АМС) осуществляется с помощью имитирующих устройств (ИУ) путем задания на их вход электрических сигналов, соответствующих определенному значению метеорологического параметра /1,2,3/.

Для расчета имитируемых сигналов напомним уравнения преобразования неэлектрических величин в электрические сигналы на выходе измерительного преобразователя (ИП). Для аналоговых ИП они имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} R_t &= f(t) = R_0 (1 + \alpha t) \\ R_1/R_2 &= f(P) \\ U &= f(Y) \end{aligned} \right\} , \quad (1)$$

для импульсных ИП:

$$N = f(U), \quad (2)$$

где  $R_t$ ,  $R_1/R_2$  и  $U$  соответственно, электрическое сопротивление, отношение сопротивлений и напряжение на выходе ИП температуры ( $t$ ), атмосферного давления ( $P$ ) и влажности ( $Y$ ).

Для реализации (1) ко входу ЦУ подключается имитирующее устройство, представляющее собой или набор высокочастотных сопротивлений, или чаще всего, магазин сопротивлений класса точности не выше 0,02 (обычно магазин сопротивлений типа МСР-60М). При расчете значений сопротивления  $R_t$  по (1), соответствующих определенным значениям температуры, используется приближенная формула вида

$$R_t = R_0 (1 + \alpha t_p), \quad (3)$$

где  $R_0$  - сопротивление ИП ПТС-500, соответствующее  $t_p = 0^\circ\text{C}$   
 $R_0 = 499,5 \text{ Ом}$ ;  $\alpha$  - температурный коэффициент платины, равный

$3,91 \cdot 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $t_p$  - платиновая температура,  $^{\circ}\text{C}$ . Значения  $R_0$  и  $\alpha$  взяты из паспорта ИП ПТС-500.

Так как зависимость  $R_t = f(t_p)$  для платины является нелинейной, то автоматически в ЦУ станции вводится поправка на нелинейность  $\Delta_H$ . На выходе ЦУ по каналу температуры регистрируется термодинамическая температура  $t_{тд}$ . Таким образом, в ЦУ осуществляется операция:

$$t_{тд} = t_p + \Delta_H. \quad (4)$$

Следовательно, на входе ЦУ следует имитировать  $t_p$  с учетом  $\Delta_H$ . Платиновая температура может быть рассчитана по формуле:

$$t_p = \frac{R_t - R_0}{\alpha R_0}. \quad (5)$$

Значение поправки  $\Delta_H$  для положительной и отрицательной областей имитируемых температур можно рассчитать, используя эмпирические формулы вида:

$$\Delta_H = 0,015 t_p \left( \frac{t_p}{100} - 1 \right) \quad (t \geq 0^{\circ}\text{C})$$

$$\Delta_H = 0,015 t_p \left( \frac{t_p}{100} - 1 \right) \left[ 1 + 0,073 \left( \frac{t_p}{100} \right)^2 \right] \quad (t \leq 0^{\circ}\text{C}) \quad (6)$$

Кроме поправки  $\Delta_H$  в результате измерения ( $t_{тд}$ ) на выходе ЦУ вводится постоянная поправка  $\Delta t = 0,05 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , учитывающая перегрев ИП ПТС-500 измерительным током схемы. На выходе ЦУ регистрируется значение  $t_{тд}$  с учетом  $\Delta_H$  и  $\Delta t$ :

$$t_{тд} = t_p + \Delta_H + \Delta t. \quad (7)$$

Для удобства расчетов  $t_p$  с учетом соответствующих значений  $t_{тд}$  и  $R_t$ , приведена табл. I.

Таблица I

$t_{тд} \text{ }^{\circ}\text{C}$	$t_p \text{ }^{\circ}\text{C}$	$R_t \text{ Ом}$	$t_{тд} \text{ }^{\circ}\text{C}$	$t_p \text{ }^{\circ}\text{C}$	$R_t \text{ Ом}$
-60,000	-61,478	619,569	0,000	0,000	501,453
-50,000	-51,145	599,388	+10,000	+10,135	519,294
-40,000	-40,850	579,282	+20,000	+20,239	539,028
-30,000	-30,589	559,242	+30,000	+30,315	558,707
-20,000	-20,361	539,266	+40,000	+40,368	578,340
-10,000	-10,165	519,353	+50,000	+50,375	597,884

Для примера рассмотрим случай, когда известно имитируемое значение  $R_t$ , но неизвестны  $t_p$  и  $t_{тд}$ . Пусть задано:  $R_t = 540 \text{ Ом}$ ,  $R_0 = 499,5 \text{ Ом}$ ,  $\alpha = 0,00391$ . По формуле (5) получим, что  $t_p =$

= 20,74 °C. По формуле (6) для  $t \geq 0$  °C рассчитаем поправку  $\Delta_H$  :

$$\Delta_H = 0,015 t_p \left( \frac{t_p}{100} - 1 \right) = 0,015 \cdot 20,74 \left( \frac{20,74}{100} - 1 \right) = 0,31 (-0,7926) = -0,25 \text{ °C.}$$

Далее по формуле (4) рассчитаем:

$$t_{тн} = t_p + \Delta_H = 20,74 - 0,25 = 20,49 \text{ °C.}$$

Окончательно, с учетом  $\Delta t$  рассчитаем значение  $t_{тн}$ , которое должно быть зарегистрировано на выходе ЦУ

$$t_{тн} = t_{тн} + \Delta t = 20,49 + 0,05 = 20,54 \approx 20,5 \text{ °C.}$$

Расчет имитируемых значений относительной влажности  $\Psi$  на входе ЦУ по "сухому" и "смоченному" термометрам психрометра заключается в реализации функциональной зависимости  $R_{тсух}/R_{тсм} = f(\Psi)$ .

Значения  $R_{тсух}$  определяются по формуле (3) или по табл.1. Для оперативности и удобства расчета температуры смоченного термометра используют данные табл.2.

Таблица 2  
Значения  $t_{см}$  при различных  $\Psi$  и  $t_{сух}$  среды

$t_{сух}$ . °C	$\Psi$ %				
	99-100	80	60	40	30
+30	29,9	27,3	24,2	20,7	18,8
+20	20,0	17,9	15,5	13,0	11,0
+10	10,0	8,5	6,8	5,1	4,3
0	0,0	-1,0	-1,6	-3,1	-3,6

Расчет значений  $R_{тсм}$  аналогично расчету  $R_{тсух}$  осуществляется по формуле (3), причем для определения значений температуры кратных 1 °C или 0,1 °C необходимо пользоваться методом линейной интерполяции исходя из следующего: 1 °C соответствует 1,9678 Ом.

Рассмотрим пример. Пусть требуется осуществить поверку ЦУ на отметке диапазона  $\Psi = 100$  % при  $t = 30$  °C. Из табл.1 получим, что  $R_{тсух(+30°)} = 558,707$  Ом. Из табл.2 соответственно берем значение  $t_{см} = +29,9$  °C. Методом линейной интерполяции рассчитаем значение  $R_{тсм}$  для  $t = +29,9$  °C. Так как  $R_{тсух(+20°)} = 539,028$  Ом (см. табл.1), то  $1,9678 \cdot 9 = 17,7111$  Ом или  $R_{тсм} = 539,028 + 17,7111 = 556,7391$ , что будет соответствовать  $t_{см} = +29,0$  °C и далее для  $t_{см} = +29,9$  °C получим  $0,19678 \cdot 9 = 1,77102$ . Окончательно получим, что  $R_{тсм} = 556,7391 + 1,77102 = 558,51$  Ом.

Таким образом, на входе ЦУ имитируется значение  $R_{t_{\text{сч}}} = 558,707 \text{ Ом}$  и  $R_{t_{\text{см}}} = 558,51 \text{ Ом}$ , что соответствует относительной влажности  $\Psi = 100 \%$ .

При  $t \leq 0 \text{ }^\circ\text{C}$  влажность воздуха измеряется ИП станции деформационным методом (волосной гигрометр). Выходом ИП является напряжение постоянного тока. В диапазоне измерения относительной влажности 30–100 % выходное напряжение  $U$  изменяется в диапазоне 0–1 В. Зависимость вида  $U = f(\Psi)$  является нелинейной и определяется свойством волоса, являющегося чувствительным элементом ИП. На вход ЦУ должно подаваться напряжение  $U$ , соответствующее определенным значениям влажности  $\Psi$ . Реализация зависимости  $U = f(\Psi)$  может быть решена с помощью делителя напряжений. Таким образом, необходимо в конечном счете рассчитать значения  $R_\Psi$  делителя, соответствующие определенным значениям  $\Psi$ . Зависимость выходного сопротивления  $R_\Psi$  делителя напряжения от относительной влажности  $\Psi$  может быть представлена формулой:

$$R_\Psi = C \Psi, \quad (8)$$

где  $\Psi = f(\Delta l)$ ,  $C$  – коэффициент пропорциональности. Удлинение волоса гитары  $\Delta l$  определяется числами Гей-Люссака. Зависимость  $\Delta l$  от  $\Psi$  представлена в табл.3.

Таблица 3

$\Psi \%$	0	30	40	50	60	70	80	90	100
$\Delta l \%$	0	52,8	63,7	72,2	79,2	85,2	90,5	95,4	100

Пользуясь формулой (8), преобразованной к виду:

$$R_\Psi = C \Delta l, \quad (9)$$

и полагая, что полное сопротивление делителя известно, рассчитаем значение коэффициента  $C$  для  $\Psi = 100 \%$ :

$$C = \frac{R_n}{100} = \gamma, \quad (10)$$

откуда

$$R_\Psi = \gamma \Delta l. \quad (11)$$

Принимая диапазон измерения ИП относительной влажности 30–100 %, можно рассчитать значения  $R_\Psi$  по формуле (11). В качестве примера рассчитаем значения  $R_\Psi$  для случая, когда полное сопротивление делителя  $R_n = 500 \text{ Ом}$ . По формуле (10) рассчитаем коэффициент  $C$ ; он равен 5, тогда расчетная формула (11) примет вид:

$$R_\Psi = 5 \Delta l. \quad (12)$$

Пользуясь табл.3 и формулой (12), рассчитаем  $R_{\psi}$ . Данные расчета представлены в табл.4.

Таблица 4

$\psi$ %	30	40	50	60	70	80	90	100
$R_{\psi}$ Ом	264,0	318,0	361,0	396,0	426,0	452,5	477,0	500,0

Реализация функциональной зависимости (1) для поверки ЦУ по каналу измерения атмосферного давления сводится к расчету отношения  $R_1 / R_2$  (т.е. к расчету имитируемых на вход ЦУ значений плеч потенциометра ИП  $R_1$  и  $R_2$ ) и одновременной имитации температуры при ИП атмосферного давления  $t_p$ . Значение  $t_p$  может быть взято из табл.1. Непосредственно расчет  $R_1$  и  $R_2$  необходимо осуществлять исходя из значения общего сопротивления  $R_{об}$  потенциометра ИП, диапазона измеряемых давлений  $\Delta P$  и начальной установки в ЦУ давления  $P_0$ . Для станции КРАМС значение  $R_{об}$  составляет:  $R_1 + R_2 = R_{об} = 5000$  Ом,  $\Delta P = 130$  гПа и  $P_0 = 950$  гПа. Исходные расчетные формулы имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} R_2 &= \frac{R_{об}}{\Delta P} (P_{им} - P_0) \\ R_1 &= R_{об} - R_2 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Для примера произведем расчет  $R_1$  и  $R_2$  при входных условиях:

$R_{об} = 5000$  Ом,  $\Delta P = 130$  гПа,  $P_0 = 950$  гПа,  $P_{им} = 978,25$  гПа.  
По формуле (13) получим:

$$R_2 = \frac{5000}{130} (978,25 - 950,00) = 817,28 \text{ Ом},$$

$$R_1 = 5000 - 817,28 = 4182,72 \text{ Ом}.$$

Таким образом, отношение сопротивлений  $R_1 / R_2 = 4182,72 / 817,28$  будет соответствовать имитируемому атмосферному давлению  $P_{им} = 978,25$  гПа. Аналогично можно рассчитать комбинации отношений  $R_1 / R_2$  и соответствующих им  $P_{им}$  для любой отметки диапазона  $\Delta P$ .

Расчет имитируемых значений скорости ветра  $U_{им}$ , как зависимости (2), осуществляется с помощью формулы:

$$U_{им} = \frac{F}{K}, \quad (14)$$

где  $k$  - коэффициент винта, вычисляемый из расчета, что частоте  $F = 108$  Гц соответствует значение скорости ветра 60 м/с, т.е.  
 $k = F / U = 108/60 = 1,8$ . Для примера в табл.5 приведены данные расчета по (14) зависимости  $U_{им} = f(F)$ .

Предложенная методика расчета имитируемых значений метеопараметров на вход ЦУ АМС может быть использована при проверке ЦУ станций М-106М, М-107 и др.

Таблица 5

Зависимость  $U_{им} = f(F)$

$F$ Гц	1,9	5,4	9,0	18,0	36,0	72,0	108,0
$U_{им}$ м/с	1	3	5	10	20	40	60

#### Список литературы

1. Рогогалёв Ю. В. Исследование погрешностей устройства автомагики и регистрации станции М-106М. - Труды ГГО, 1977, вып.392, с. 127-143.
2. Рогогалёв Ю. В. Исследования погрешностей центрального устройства метеостанции КРАМС. - Труды ГГО, вып.392, с. 117-126.
3. Рогогалёв Ю. В., Фатеев Н. П. Анализ погрешностей имитирующих устройств, применяемых при проверке автоматических метеорологических станций. - Труды ГГО, 1977, вып.392, с. 103-116.

Б.Л.Кожевников

#### ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ВЫПАДАЮЩИХ ОСАДКОВ НА КАЧЕСТВО МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

В публикации /4/ термодиссипативным методом оценено механическое воздействие атмосферных осадков на промышленные изделия, эксплуатируемые на открытом воздухе и в частности на метеорологические приборы. Вклад этих воздействий в общую агрессивность атмосферы оказался сравнительно небольшим. Однако известно /5/, что жидкокапельные пленки, образующиеся при выпадении жидких и смешанных осадков, играют весьма важную роль в развитии процессов, поражающих изделия.

Негативные последствия отклонения концентрации газообразной воды от нормы уже были оценены в работе /6/. Цель данной статьи - оценка усиления агрессивных свойств атмосферы выпадающими осадками вследствие изменения ими химического состава воздуха.

Согласно /1/, термический заряд диссипации возникает при энерго- и массообмене и по условиям, принятым в /8/, представляет собой необратимые потери энергии изделия или его модели. В этом случае имеет место равенство

$$k dA = T d\theta_d, \quad (1)$$

где  $dA$  - работа взаимодействия модели и среды,  $k$  - коэффициент необратимости,  $T$  - температура,  $\theta_d$  - термический заряд диссипации.

С энергетической точки зрения "вторжение" частиц осадков в исследуемый моль модели среды приводит к изменению внутренней энергии воздушной среды. При этом поток частиц осадков можно рассматривать как поток химического вещества через открытую многокомпонентную термодинамическую систему, для которой справедливы соотношения /7/:

$$\begin{aligned} dU &= TdS - pdV + \sum_i \mu_i dn_i \\ dG &= -SdT + Vdp + \sum_i \mu_i dn_i, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $p$ ,  $V$  - давление атмосферы и объем модели,  $U$ ,  $G$  - внутренняя энергия и энергия Гиббса,  $n_i$ ,  $\mu_i$  - число молей и химический потенциал  $i$ -ой компоненты. Согласно /3/, бесконечно малое приращение количества полной работы ( $dA'$ ), совершаемой системой при обратимом процессе, может быть найдено по формулам

$$dA' = TdS - dU - p dV, \quad (3)$$

$$dA' = Vdp - SdT - dG, \quad (4)$$

где  $dA' = dA - pdV$ .

Отсюда, при условии, что  $S$ ,  $V$  - *const*, получим

$$dA' = -dU = \bar{d}A. \quad (5)$$

Проведение анализа полувцикла обмена модели и среды при неизменных значениях  $S$  и  $V$  для условий атмосферы нерационально, так как экспериментальные данные получены для случаев, когда  $p$ ,  $T$  - *const*. При этих условиях из (4) и (5) получим

$$dA' = -dG = \bar{d}A - pdV,$$

$$dA = pdV - dG.$$

Обмен любыми видами энергии при любом направлении хода процесса сопровождается потерями /8/, поэтому последнее выражение запишем в виде

$$dA = |pdV - dG|$$

и подставив его в (1), получим

$$k |pdV - dG| = Td\theta_A$$

или

$$|k_M (pdV)| + |k_X (-dG)| = Td\theta_A, \quad (6)$$

где  $k_M$  и  $k_X$  - коэффициенты необратимости соответственно механической и химической энергии. Причем по /1/ для этих коэффициентов справедливы соотношения:

$$k_M = \frac{p'' - p}{p} = \frac{\Delta p}{p}, \quad k_X = \frac{\mu'' - \mu}{\mu} = \frac{\Delta \mu}{\mu},$$

где  $p''$ ,  $\mu''$  - значения потенциалов при нормальных условиях.

При  $p$ ,  $T$  - const из (2) следует, что  $dG_{p,T} = \sum_i \mu_i dn_i$ , тогда с учетом (6) получим

$$|k_M (pdV)| + |k_X \sum_i \mu_i dn_i| = Td\theta_A. \quad (7)$$

Принимая во внимание состав смеси в модели при выпадении осадков, разложим на составляющие второе слагаемое

$$|k_M (pdV)| + |k_D \mu_D dn_D| + |k_C \mu_C dn_C| + |k_J \mu_J dn_J| = Td\theta_A,$$

где  $D$  - индекс водяного пара в воздухе,  $C$  - индекс сухого воздуха,  $J$  - индекс жидких осадков.

Оценка усиления агрессивности атмосферы при изменениях соотношений концентраций сухого воздуха и водяного пара уже была проведена ранее в работе /6/, поэтому рассмотрим случай выпадения осадков при нормальных условиях. Полагая при этом, что поток частиц через моль модели стационарен, и, принимая во внимание обратимость полупериода обмена модели со средой в газовой фазе, при нормальных условиях можем записать  $k_M = k_D = k_C = 0$ . Тогда из последнего выражения с учетом соотношения для коэффициента  $k_J$  имеем:

$$|k_J \mu_J dn_J| = |\mu_J'' - \mu_J dn_J| = Td\theta_A.$$

Для однокомпонентной однофазной системы химический потенциал равен молярной энергии Гиббса /3/, т.е.  $\mu_J = G$ ,  $\mu_J'' = G''$ . Отсюда

$$|G'' - G| dn_J = Td\theta_A,$$

$$|\Delta G| dn_J = Td\theta_A.$$

Введем в анализ скорость производства термического заряда диссипации

$$\dot{\theta}_J = \frac{d\theta_A}{d\tau dN'} = \frac{|\Delta G| dn_J}{T d\tau dN'}$$

По условиям обмена в полупериоде избыточное количество воды в исследу-

емом моле среды либо превращается в пар и рассеивается в воздухе, либо протекает обратный процесс. Каждый полцикл длится от  $\tau_1$  до  $\tau_2$ , за это время в обмен вовлекается количество смеси от  $N'_1$  до  $N'_2$  и претерпевают превращение частицы осадков с содержанием воды от  $n_1$  до  $n_2$ . Проинтегрируем в этих пределах выражение для  $\theta_\varphi$ :

$$\int_{N'_1}^{N'_2} \int_{\tau_1}^{\tau_2} \dot{\theta}_\varphi d\tau dN' = \int_{n_1}^{n_2} |\Delta G| dn_x$$

$$\dot{\theta}_\varphi = \frac{|\Delta G| \Delta n_x}{T \Delta \tau \Delta N'}$$

Для сравнимости текущих мгновенных значений примем  $\Delta N' = 1$  моль,  $\Delta \tau = 1$  с. Тогда

$$\dot{\theta}_\varphi = \frac{|\Delta G| \delta}{T \Delta \tau} = \frac{|\Delta G| \delta}{T} \quad (8)$$

$\dot{\theta}_\varphi$  - парциальная (молярная) скорость производства термического заряда диссипации, развиваемая при фазовых переходах избыточной воды осадков в полцикле,  $\delta = \Delta n / \Delta N'$  - относительная молярная водность осадков,  $\delta$  - скорость изменения  $\delta$ . Согласно [3], расчет изменения энергии Гиббса ( $\Delta G$ ) для открытой термодинамической системы при испарении (конденсации) может быть выполнен на основе соотношения

$$\Delta G = \Delta G_r^0 + \sum_2 \Delta G_2 - \sum_1 \Delta G_1, \quad (9)$$

где  $\Delta G_r^0$  - стандартное изменение энергии Гиббса при температуре процесса  $T$ ,  $\sum \Delta G$  - сумма энергий Гиббса продуктов (2) и исходных веществ (1).

Для процесса  $H_2O$  (ж, 1 атм) =  $H_2O$  (ж, е) используем функцию

$$\sum_1 \Delta G_1 = V(e - 1),$$

где  $V$  - молярный объем жидкой воды,  $e$  - парциальное давление водяного пара. Приращение энергии Гиббса в процессе  $H_2O$  (п, 1 атм) =  $H_2O$  (п, е) найдем из выражения для изотермического расширения-сжатия идеального газа

$$\sum_2 \Delta G_2 = RT \ln e/e_1,$$

$e_1$  - давление пара, равное одной атмосфере. Таким образом, для реакции  $H_2O$  (ж, е) =  $H_2O$  (п, е) из (9) получим

$$\Delta G = \Delta G_r^0 - V(e - 1) + RT \ln e. \quad (10)$$

Если за исходный уровень отсчета принять энергию Гиббса водяного пара, то ее изменение при переходе жидкость-пар может быть определено

по формуле

$$\Delta G_r^o = (\Delta G_r^o)^n - (\Delta G_r^o)^* = RT \ln E_r,$$

где  $E_r$  - упругость насыщения над плоской поверхностью чистой воды при температуре воздуха  $T$ . Подставляя последнее выражение в (10), имеем

$$\Delta G = RT \ln(E_r e) - V(e - \gamma).$$

Все выше изложенное относилось к величине  $\Delta G$  при фазовом переходе пар-жидкая вода, однако переход пар-лед принципиально ничем не отличается, поэтому можно записать

$$\Delta G' = RT \ln(E_r' e) - V'(e - 1),$$

где  $E_r'$  - упругость насыщения над плоской поверхностью чистого льда при температуре  $T$ ,  $V'$  - молярный объем льда.

Принимая во внимание, что  $V \approx V' \approx 18 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$ , а значения  $e$  не превышают десятой доли атмосферного давления, исключим из-за малости последние члены в полученных выражениях. Тогда из соотношения (8) получим:

$$\dot{v}_o = \delta R \ln(E_r e) / \Delta \tau, \quad (11)$$

$$\dot{v}'_o = \delta R \ln(E_r' e) / \Delta \tau. \quad (12)$$

В табл. I приведены значения величин  $\dot{v}_o$  и  $\dot{v}'_o$ , для различных климатических районов при одинаковой водности осадков, равной  $4,16 \text{ г/м}^2$ ; для каждого района приведены средние годовые температуры воздуха  $t/2$ .

Таблица I

	Климатические районы									
	Ia	Iб	IIa	IIаб	IIб	IIбв	III	IVa	IVаб	IVб
$T \text{ } ^\circ\text{C}$	-12,5	-1,5	4,5	4,5	9,5	6,0	14,5	13,5	14,5	16,5
$\dot{v}_o, \dot{v}'_o$ мВт/(моль·К)	44	126	174	172	209	187	241	223	245	239

Величины  $E_r$  и  $e$  рассчитывались по средним годовым значениям температуры и относительной влажности воздуха для данного района. Вычисление величины  $\delta$  выполнялось также с учетом средней температуры. Из табл. I следует, что агрессивность избыточной воды при выпадении осадков зависит от температуры и усиливается с увеличением ее значений.

Для сравнения агрессивности атмосферных условий климатических зон и районов были рассчитаны суммы термических зарядов диссипации

(  $\Sigma \theta_p$  ). Расчеты выполнялись по формулам, описанным в работах /6, 7/. Значения общей продолжительности выпадения осадков за год (  $T_r$  ) по районам были взяты из /2/. Полученные результаты приведены в табл.2.

Таблица 2

	Климатические районы									
	Ia	Iб	IIa	IIаб	IIб	IIбв	III	IVa	IVав	IVб
$\Sigma \theta_p$ кДж/моль·К	199	275	918	540	458	894	1218	460	725	166
$T_r$ , час/год	1272	603	1462	869	610	1330	1404	573	824	192

Третью строку табл.2 занимают значения общей продолжительности осадков за год, выраженные в часах и заимствованные из /2/. Из табл.2 видно, что вклад избыточной воды выпадающих осадков в агрессивность атмосферы превышает вклад отклонений концентрации водяного пара от нормы в два-четыре раза /6/.

Важно отметить, что общая продолжительность осадков хотя и играет ведущую роль в суммарном эффекте воздействий такого рода, однако активность вещества осадков накладывает заметный отпечаток на конечный результат. Так 1404 часа с осадками в теплой влажной зоне (III) приводят к производству заряда в количестве 1218 кДж/(моль·К), а 1272 часа в очень холодном районе (Ia) вызывают возникновение заряда только в 199 кДж/(моль·К).

Выводы. Термодиссипативный метод позволяет оценить влияние осадков на изменение химического состава воздуха и на связанное с этим усиление агрессивности атмосферы.

К достоинству метода следует отнести возможность определения суммарного термического заряда диссипации с учетом активности вещества осадков.

#### Список литературы

1. Вейник А. И. Термодинамика. - Минск: Высшая школа, 1968. - 463 с.
2. ГОСТ 16350-70 Климат СССР. Районирование и характеристики климатических параметров для промышленных изделий. - М.: Изд-во стандартов, 1978. - 40 с.
3. Еремин Е. Н. Основы химической термодинамики. - М.: Высшая школа, 1978. - 391 с.
4. Кожевников Б. Л. Оценка механических воздействий выпадающих осадков на метеорологические приборы. - См. наст. сб.

5. Кожевников Б. Л. О регистрации капельножидких пленок поверхностного увлажнения изделий. - Труды ГГО, 1973, вып.313, с. 128-133.
6. Кожевников Б. Л. Оценка воздействия водяного пара атмосферы на средства измерений. - См. наст. сб.
7. Кожевников Б. Л. Влияние состава атмосферного воздуха на качество метеорологических приборов. - См. наст. сб.
8. Кожевников Б. Л. Влияние агрессивности атмосферы на межповерочные интервалы. - Труды ГГО, 1982, вып.465, с. 54-57.

Б.Л.Кожевников

#### ОЦЕНКА МЕХАНИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЫПАДАЮЩИХ ОСАДКОВ НА МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

В работах /3, 4/ термодиссипативным методом оценены необратимые последствия влияния на приборы и изделия химического состава атмосферного воздуха. Цель данной статьи - оценка вклада механических воздействий выпадающих осадков (жидких, смешанных и твердых) в агрессивность атмосферы с помощью этого же метода.

С энергетической точки зрения осадки представляют собой весьма грубое нарушение атмосферных условий, существовавших до момента их выпадения. Это особенно наглядно при выпадении осадков в чистой воздушной среде при нормальных условиях, когда агрессивность атмосферы равна нулю. "Вторжение" частиц осадков резко меняет свойства среды и создает условия для возникновения значительного энергообмена и связанного с ним процесса старения приборов и изделий.

Механические виды энергии (потенциальная  $W_n$  и кинетическая  $W_k$ ) также вовлекаются в обмен при выпадении атмосферных осадков. В соответствии с представлениями, лежащими в основе термодиссипативного метода /3, 4/, часть обмениваемой энергии изделия необратимо рассеивается в окружающей среде. Поэтому для упомянутых видов энергии можно записать уравнения:  $k_n dW_n = T d\theta_n$ ;  $k_k dW_k = T d\theta_k$ , где  $T$  - температура процесса обмена;  $\theta_n$  - термический заряд диссипации, рассеиваемый в среде;  $k_n$ ,  $k_k$  - коэффициенты необратимости обмена соответственно потенциальной и кинетической энергии. Введем в расчеты скорость производства термического заряда диссипации. Получим

$$\theta_n = \frac{d\theta}{d\tau dN'} = \frac{k_n dW_n}{T d\tau dN'}, \quad \theta_k = \frac{k_k dW_k}{T d\tau dN'}$$

где  $dN'$  - количество вещества, вовлекаемого в энергообмен между исследуемой средой и нормальной атмосферой за время  $d\tau$ .

Используя известные дифференциальные соотношения для обоих видов энергии [5], с учетом последних двух выражений можно записать: при условии  $H, g - const$

$$\dot{\theta}_n = \frac{k_n H g dm}{T d\tau dN'} \quad (1)$$

а при условии  $m - const$

$$\dot{\theta}_k = \frac{k_k V d(mV)}{T d\tau dN'} \quad (2)$$

где  $H$  - геометрическая высота места энергообмена над средним уровнем моря на широте  $45^{\circ}32'33''$ ;  $g$  - ускорение свободного падения в исследуемой точке;  $m$  - масса осадков в количестве вещества среды, вовлеченном в энергообмен;  $V$  - скорость падения частиц осадков;  $(mV)$  - импульс количества движения падающих частиц в веществе среды, вовлеченном в обмен.

Обе величины  $\theta_n, \theta_k$  являются непрерывными, изменяющимися от точки к точке. Будем сравнивать средние скорости производства термического заряда диссипации, развиваемые в одинаковых количествах вещества модели изделия от  $N_1'$  до  $N_2'$  за равные промежутки времени от  $\tau_1$  до  $\tau_2$ , в течение которых происходит полуцикл переработки избытка или недостатка энергии относительно ее нормальной концентрации. В этом случае из (1) и (2) находим:

$$\int_{N_1'}^{N_2'} \int_{\tau_1}^{\tau_2} \dot{\theta}_n d\tau dN' = \int_0^m k_n H g dm,$$

$$\int_{N_1'}^{N_2'} \int_{\tau_1}^{\tau_2} \dot{\theta}_k d\tau dN' = \int_0^V k_k V m dV.$$

Отсюда после очевидных преобразований следует

$$\dot{\theta}_n = \frac{k_n H g m}{T \Delta\tau \Delta N'} \quad (3)$$

$$\dot{\theta}_k = \frac{k_k m V^2}{2 T \Delta\tau \Delta N'} \quad (4)$$

В соответствии с принятыми моделями изделия и полуцикла его энергообмена пронормируем  $\Delta\tau$  и  $\Delta N'$ :  $\Delta\tau = 1$  с,  $\Delta N' = 1$  моль. По определению коэффициенты необратимости  $k_n, k_k$  могут быть найдены по общей формуле:  $k = (P_H - P)/P$ , где  $P$  - энергетический потенциал исследуемой среды.

дуемой среды,  $P_H$  - тот же потенциал в условиях нормальной атмосферы. Принимая во внимание, что  $P_H = Hg$ ,  $P_K = Hg$ , а  $(P_H)_H = (P_K)_H = 0$ , получим  $k_H = k_K = 1$ . С учетом этого окончательно имеем:

$$\dot{V}_H = \frac{H_0 \delta}{T \Delta \tau}, \quad (5)$$

$$\dot{V}_K = \frac{\delta V^2}{2 T \Delta \tau}, \quad (6)$$

где  $\delta$  - молярная водность осадков.

Анализ источников /1, 6, 7, 8/ показывает, что водность осадков может изменяться от сотых долей грамма в кубическом метре при слабом снеге до 14 г/м<sup>3</sup> (0,34 г/моль) при выпадении града средней интенсивности. Зависимость удельной (молярной) скорости производства термического заряда диссипации ( $\dot{V}_H$ ) при  $T = 298,15$  К,  $g = 9,80665$  м/с<sup>2</sup>, от водности можно представить таблицей. В первой строке табл.1 перечислены значения водности осадков в граммах на кубический метр, во второй - значения скорости  $\dot{V}_H$  на

Таблица 1					числены значения водности осадков в граммах на кубический метр, во второй - значения скорости $\dot{V}_H$ на высоте 100 м, выраженные в милливаттах на моль-кельвин, а в третьей - значения той же величины на высоте 1000 м.
0,1	1,0	2,0	4,0	10,0	
0,001	0,082	0,164	0,329	0,822	
0,008	0,822	1,645	3,289	8,223	

высоте 100 м, выраженные в милливаттах на моль-кельвин, а в третьей - значения той же величины на высоте 1000 м. Изменение другой величины  $\dot{V}_K$  в зависимости от скорости падения частиц осадков разных интенсивностей и видов иллюстрируется табл.2. В первой строке табл.2 перечислены значения скорости падения

Таблица 2				частиц осадков, во второй - значения скорости $\dot{V}_K$ в милливаттах на моль-кельвин. Значения скорости падения частиц выражены в метрах в секунду. Величина $\dot{V}_K$ найдена для температуры $T = 298,25$ К, при которой в одном кубическом метре газа находится 40,875 молей. При расчетах водность осадков для первых трех скоростей падения принималась равной 4,16 г/м <sup>3</sup> (0,102 г/моль). Это объясняется тем, что по /2/ интенсивности осадков продолжительностью 5, 30 мин и 12 ч близки значениям 2; 1; 0,1 мм/мин. Если при этом скорости падения частиц принять равными соответственно 8; 4; 0,4 м/с, то их водность оказывается равной 4,16 г/м <sup>3</sup> .
0,4	4,0	8,0	20,0	
0,00003	0,003	0,011	0,106	

Для сравнения агрессивности атмосферных условий климатических районов и зон по механическим воздействиям осадков были найдены суммы термических зарядов диссипации ( $\Delta \dot{V}_H$ ), ( $\Delta \dot{V}_K$ ), возникающих под их действием в течение года. Расчеты выполнялись по формулам, аналогичным описанным в /3, 4/. Ускорение свободного падения принималось равным  $g = 9,80665$  м/с<sup>2</sup>, высота  $H = 100$  м, молярная водность  $\delta = 0,102 \cdot 10^{-3}$  кг/моль, скорость падения частиц  $V = 0,4$  м/с.

Длительности выпадения осадков и средние значения температуры воздуха за год для районов и зон были взяты по /2/. Полученные результаты приведены в табл.3. В первой строчке даны условные обозначения районов и зон, принятые в /2/, а во второй и третьей - значения сумм  $\Delta \dot{V}_n, \Delta \dot{V}_k$  в килоджоулях на моль-кельвин и джоулях на моль-кельвин соответственно.

Таблица 3

Ia	Iб	IIa	IIав	IIб	IIбв	III	IУa	IУав	IУб
1,75	0,80	1,90	1,13	0,79	1,72	1,76	0,72	1,03	0,24
0,14	0,06	0,15	0,09	0,06	0,14	0,14	0,06	0,08	0,02

Из табл.3 видно, что вклад потенциальной энергии в воздействия осадков на два-три порядка больше вклада кинетической энергии. В условиях принятых ограничений четыре климатических района и зоны по вкладу потенциальной энергии имеют близкие значения. Во всех районах и зонах вклад суммы  $\Delta \dot{V}_k$  крайне незначителен. Однако есть основания предполагать, что полученные значения мало представительны, т.к. в исходных статистических материалах главные факторы для  $\dot{V}_k$  - ливневые осадки и град - отдельно не выделялись. А значения общей продолжительности выпадения осадков и их суммы за год не дают оснований предполагать большие интенсивности и, следовательно, большие скорости падения частиц. Суммы  $\Delta \dot{V}_k$  в табл.3 могут быть перекрыты уже в каждом отдельном случае выпадения града средней интенсивности продолжительностью 17-20 мин. Град с описанными выше параметрами дает сумму 0,1 Дж/(моль · К), что превышает многие значения.

**Выводы.** Термодиссипативный метод позволяет оценить агрессивность атмосферы, возникающую из-за механических воздействий осадков.

Агрессивность атмосферы, вызываемая кинетическим воздействием выпадающих осадков, пренебрежимо мала и ее рационально учитывать только для отдельных случаев выпадения града и ливней высокой интенсивности.

#### Список литературы

1. А л и б е г о в а Ж. Д. Структура полей жидких осадков за короткие интервалы времени. - Л.: Гидрометеонадат, 1975. - 133 с.
2. ГОСТ 16350-70 Климат СССР. Районирование и характеристики климатических параметров для промышленных изделий. - М., 1978. - 40 с.
3. К о ж е в н и к о в Б. Л. Влияние состава атмосферного воздуха на качество метеорологических приборов. - См. наст. сб.
4. К о ж е в н и к о в Б. Л. Оценка воздействия водяного пара атмосферы на средства измерений. - См. наст. сб.
5. К о ж е в н и к о в Б. Л. Оценка агрессивности атмосферных условий эксплуатации метеорологических средств измерений. - Труды ГГО, 1981, вып. 452, с. 21-28.

6. Литвинов И. В. Структура атмосферных осадков. - Л.: Гидрометеиздат, 1974. - 154 с.
7. Матвеев Л. Т. Основы общей метеорологии. Физика атмосферы. - Л.: Гидрометеиздат, 1965. - 876 с.
8. Хргиан А. Х. Физика атмосферы. Том 2. - Л.: Гидрометеиздат, 1978. - 318 с.

Б. Л. Кожевников

### ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ ВОДЯНОГО ПАРА АТМОСФЕРЫ НА СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

Из публикаций /1, 2, 9/ известна роль атмосферной влаги в разрушительных процессах, протекающих в метеорологических приборах, аппаратах и прочих изделиях. В связи с этим представляет интерес оценка вклада водяного пара в агрессивные свойства воздушной среды термодиссипативным методом.

Рассмотрим водяной пар как естественную компоненту воздушной смеси. Интенсивность накопления необратимых изменений в изделии при отклонении какой-либо составляющей воздушной смеси от нормальной концентрации может быть определена через скорость производства термического заряда диссипации ( $\dot{J}_x$ ) /7/. При изобарно-изотермичных условиях эта величина описывается следующим выражением:

$$\dot{J}_x = \frac{R}{\Delta\tau} \left| \frac{\ln \frac{p_i''}{p_i} \left( \frac{p_i}{\rho} \ln \frac{p_i}{\rho} \right)}{\ln \frac{p_i'' p_i}{(\rho_{*i})^2}} \right| + \frac{R}{\Delta\tau} \left| \frac{\ln \frac{p_j''}{p_j} \left( \frac{p_j}{\rho} \ln \frac{p_j}{\rho} \right)}{\ln \frac{p_j'' p_j}{(\rho_{*j})^2}} \right|, \quad (1)$$

где  $R$  - универсальная газовая постоянная ( $R = 8,314 \text{ Дж/(моль}\cdot\text{К)}$ );  $\Delta\tau$  - время полупериода энергообмена ( $\Delta\tau = 1 \text{ с}$ );  $p_i$  - парциальное давление  $i$ -ой компоненты;  $\rho$  - атмосферное давление;  $p_j$  - парциальное давление  $j$ -го остатка ( $p_i = \rho - p_j$ );  $p_i''$  - давление  $i$ -ой компоненты при нормальных условиях;  $\rho_{*i}$  - парциальное давление, при котором энергообмен становится полностью необратимым.

В соответствии с современными представлениями о нормальных атмосферных условиях /3, 4, 5/  $\rho = 1013,25 \text{ гПа}$ , относительная влажность воздуха равна 62,5 %, при температуре 25 °C  $p_i'' = 19,81 \text{ гПа}$  и, следовательно,  $p_j'' = 993,44 \text{ гПа}$ . Предположим, что полная необратимость обмена возникает при следующем условии: за максимальное значение принято давление насыщенного пара над кипящей водой при максимальном атмосферном давлении  $\rho_{*i \max} = 1113 \text{ гПа}$ , а за минимальное -

статочное давление водяного пара над порошком фосфорного ангидрида  
 $p_{*i \min} = 3 \cdot 10^{-9}$  гПа /8/.

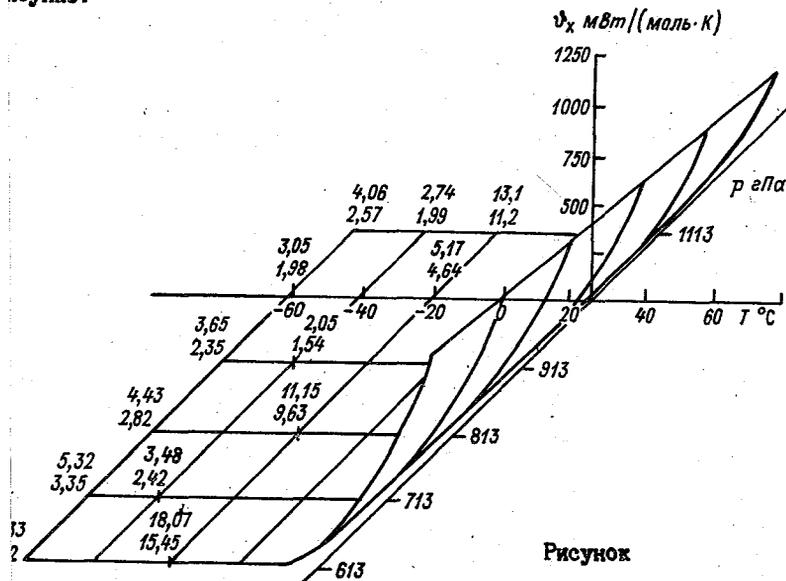
Для случая, когда давление водяного пара является избыточным,  
 т.е.  $p_i > 19,81$  гПа) из (1) получим:

$$(\dot{V}_x)_u = R \left| \frac{2,99 - \ln p_i}{-11,04 + \ln p_i} \frac{p_i}{\rho} \ln \frac{p_i}{\rho} \right| + R \left| \frac{8,90 - \ln p_i}{46,15 + \ln p_i} \frac{p_i}{\rho} \ln \frac{p_i}{\rho} \right| \quad (2)$$

и  $p_i < 19,81$  гПа получим другое соотношение

$$(\dot{V}_x)_n = R \left| \frac{2,99 - \ln p_i}{44,43 + \ln p_i} \frac{p_i}{\rho} \ln \frac{p_i}{\rho} \right| + R \left| \frac{6,90 - \ln p_i}{-7,13 + \ln p_i} \frac{p_i}{\rho} \ln \frac{p_i}{\rho} \right| \quad (3)$$

поверхности, отображающие зависимость величины  $\dot{V}_x$  от давления насыщенного водяного пара при различной температуре, представлены на рисунке:



Рисунок

дна из поверхностей, расположенная справа от наклонной линии температуры 0 °С, круто поднимается вверх. Ей принадлежит точка, в которой скорость производства термического заряда диссипации имеет максимальное значение равное 1256 мВт/(моль · К), (при T = 60 °С и p = 613 гПа). Слева от линии 0 °С в области отрицательных температур сходятся две поверхности. Одна (верхняя) рассчитана для пара в условиях насыщения относительно плоской поверхности чистой воды, а другая (нижняя) — относительно плоской поверхности чистого льда. В

связи с тем, что в масштабах рисунка эти поверхности слились, значения величины  $\dot{V}_x$  указаны для них непосредственно над отдельными точками. Причем верхнее значение соответствует случаю насыщения над водой, а нижнее - над льдом. Минимальное значение скорости  $\dot{V}_x$  равно 1,22 мВт/(моль · К) при  $T = -40$  °С и  $P = 1013$  гПа для случая над льдом.

Поверхности на рисунке отображают функцию  $\dot{V}_x(p, T)$  при условии насыщения, т.е. при 100 % относительной влажности воздуха. Естественно, что при меньших значениях относительной влажности отображающие точки будут находиться в области над изображенными поверхностями. Если в этих областях построить поверхность для относительной влажности 62,5 %, то этой поверхности будет принадлежать точка  $\dot{V}_x = 0$  мВт/(моль · К), находящаяся в месте касания поверхности начала координат.

В табл. I приведены значения скорости производства термического заряда диссипации мВт/(моль · К) при различных значениях относительной влажности и температуры.

Таблица I

T °C	Относительная влажность, %							
	100	84,5	64,5	54,5	44,5	34,5	14,5	4,5
42,5	377,73	293,98	182,90	131,84	87,43	42,45	8,01	8,62
22,5	33,76	13,80	2,88	5,83	8,06	9,45	8,56	5,11
2,5	9,83	9,73	9,22	8,77	8,15	7,33	4,70	2,30
-42,5	1,03	0,91	0,76	0,67	0,57	0,48	0,28	0,10

Градации таблицы были выбраны в соответствии с градациями, принятыми в работе /6/. Исходные значения парциального давления водяного пара при 100 % относительной влажности были приняты равными парциальному давлению насыщения над льдом для области отрицательных температур и равными парциальному давлению насыщения пара над плоской поверхностью чистой воды при положительной температуре воздуха. Расчет проводился по формулам (2) и (3) при нормальном давлении атмосферы  $p = 1013,25$  гПа. Результаты, приведенные в таблице, выражены в милливаттах на моль-кельвин.

Для сравнения агрессивности условий атмосферы различных климатических районов и зон был рассчитан предельно возможный разрушительный эффект воздействия водяного пара. Этот эффект определяется суммарным количеством термического заряда диссипации  $\Delta \dot{V}_x$  (кДж/моль · К), произведенного в данных климатических районах за год. Расчет выполнялся по формуле

$$\Delta \dot{V}_x = \sum_{i=1}^m \left( \dot{V}_x \right)_m t_m$$

где  $\bar{v}_x$  – среднее значение скорости производства термического заряда диссипации в течение одного полуцикла обмена длительностью  $t_m = 1$  с,  $m$  – количество возможных полуциклов за год ( $m = 31,536 \times 10^6$ ). При расчете были использованы таблицы, в которых приведено число часов за год с определенными сочетаниями температуры воздуха и относительной влажности, приведенные для представительных пунктов климатических районов в публикации /6/. Для районов, по которым, если такая информация отсутствовала, расчет выполнялся по средним годовым значениям обоих параметров /6/. Полученные результаты приведены в табл.2. В первой строке даны условные, принятые в /6/, обозначения климатических районов и зон, а во второй – значения суммы  $\Delta \bar{v}_x$  в килджоулях на моль-кельвин.

Таблица 2

Ia	Iб	IIa	IIав	IIб	IIбв	III	IVa	IVав	IVб	Среднее
170	260	255	240	290	259	304	300	309	277	266

Из таблицы видно, что вклад водяного пара в агрессивность атмосферы от района к району изменяется мало. Среднее по районам значение  $\Delta \bar{v}_x$  составляет 266 кДж/(моль · К), минимум наблюдается в очень холодном районе, и составляет 170 кДж/(моль · К), максимум – в жарком умеренно влажном районе и составляет 309 кДж/(моль · К).

Выводы. Термодиссипативный метод позволяет оценивать агрессивность атмосферы, вызываемую отклонением парциального давления водяного пара воздуха от нормального значения;

Минимальное воздействие водяного пара характерно для очень холодного климатического района, а максимальное – для жаркого умеренно влажного.

#### Список литературы

1. Благник Р., Занова В. Микробиологическая коррозия. – М.: Химия, 1965. – 107 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 4401-73 Стандартная атмосфера. Параметры. – М.: Изд-во стандартов, 1974. – 118 с.
4. ГОСТ 8.395-80 Государственная система обеспечения единства измерений. Нормальные условия измерений при поверке. Общие требования. – М.: Изд-во стандартов, 1981. – 6 с.
5. ГОСТ 15150-69 Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды. – М.: Изд-во стандартов,

1978. - 40 с.
6. ГОСТ 16350-70 Климат СССР. Районирование и характеристики климатических параметров для промышленных целей. - М.: Изд-во стандартов, 1978. - 44 с.
  7. Кожевников Б. Л. Влияние состава атмосферного воздуха на качество метеорологических приборов. - См. наст. сб.
  8. Справочник химика. Том 4. - М.: Химия, 1965. - 919 с.
  9. Тхоржевский В. П. Конструирование и изготовление приборов для стран с тропическим климатом. - М.: Машиностроение, 1971. - 123 с.

Б. Л. Кожевников

### ВЛИЯНИЕ СОСТАВА АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА НА КАЧЕСТВО МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

Метеорологические средства измерений эксплуатируют в различных климатических районах; поэтому вопрос оценки изменения метрологических характеристик со временем особенно актуален. Его решение позволит повысить надежность измерительных устройств и снизить затраты на их эксплуатацию.

Для оценки ухудшения качества изделий пытались использовать термодинамический метод, основанный на определении приращения энтропии ( $S$ ) /7,8/. Однако этот метод связан с трудностями, возникающими при расчетах величины  $S$  для всевозможных разрушительных процессов, возникающих в деталях и узлах средств измерения. Другой метод основан на определении скорости потери качества по термическому заряду диссипации ( $\theta_d$ ). Расчет, выполненный для одного моля воздуха, участвующего в процессе обмена, позволит получить обобщенные оценки агрессивности атмосферы в различных климатических районах и зонах. Подобные оценки отсутствуют в климатологических описаниях, например /4, 5/.

Цель настоящей работы - оценка вклада в агрессивность атмосферы изменений химического газового состава воздуха термодинамическим методом.

В соответствии с представлениями, развитыми в /1/, можно записать следующие энергетические соотношения для открытой термодинамической системы:

$$\Delta U = \Delta U + \Delta U_H .$$

$$\Delta G = \Delta G + \Delta G_H ,$$

где  $\Delta U, \Delta G$  - соответственно полные изменения внутренней энергии и энергии Гиббса, исследуемой открытой системы;  $\Delta U, \Delta G, \Delta U_n, \Delta G_n$  - обратимые и необратимые изменения внутренней энергии и энергии Гиббса.

Обратимые процессы, совершаемые в гомогенной  $N$  - компонентной системе, подверженной влиянию силы внешнего давления, состав и масса которой могут изменяться, характерны следующие соотношения [6]:

$$\begin{aligned} dU &= TdS + (-p)dV + \sum_{i=1}^N \mu_i dn_i, \\ dG &= (-S)dT + Vd\rho + \sum_{i=1}^N \mu_i dn_i, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $p, T, V$  - давление, температура и объем системы;  $\mu_i, n_i$  - химический потенциал и число молей  $i$ -ой компоненты газовой смеси системы.

При энерго- и массообмене между системой и средой движущиеся заряды всех форм вследствие трения превращаются в термический заряд диссипации ( $\theta_A$ ), рассеиваемый в среде. Эти необратимые потери зависят от интенсивности обмена и оказываемого ему сопротивления. Поэтому необратимую составляющую обмена можно записать с помощью выражений

$$dU_n = k_T |TdS| + k_N |(-p)dV| + k_x \left| \sum_{i=1}^N \mu_i dn_i \right| = Td\theta_A, \quad (2)$$

$$dG_n = k_T |(-S)dT| + k_N |Vd\rho| + k_x \left| \sum_{i=1}^N \mu_i dn_i \right| = Td\theta_A, \quad (3)$$

где  $k_T, k_N, k_x$  - коэффициенты необратимости обмена соответственно термической, механической и химической энергий.

Из (2) получим выражение для скорости производства термического заряда диссипации  $\dot{\theta}$ , отражающую интенсивность накопления необратимых изменений для закрытой ( $dn_i = 0$ ) термомеханической системы

$$\dot{\theta}_{nm} = \frac{d\theta_A}{dN'd\tau} = \frac{k_T |TdS| + k_N |(-p)dV|}{TdN'd\tau},$$

где  $dN'$  - количество вещества системы, энергия которого была вовлечена в обмен за время  $d\tau$ .

Из выражения (2) следует, что для описания изменений состояния системы, обменивающейся со средой химическим веществом, величина  $U$  может быть использована в качестве характеристической функции, точнее - термодинамического потенциала, при неизменных значениях двух параметров  $S$  и  $V$ . Однако в атмосфере при изменении состава воздуха это условие не выполняется. Более реальна ситуация, когда изменение состава воздуха происходит при сохранении значений другой пары параметров  $p$  и  $T$ . При этих условиях из соотношения (3) получим для открытой системы

$$\dot{Q}_x = \frac{k_x \sum_i \mu_i dn_i}{T dN' d\tau} = \frac{k_x |d'G|}{T dN' d\tau}$$

Нормируя скорость полувцикла обмена между моделью изделия и средой энергией одного моля в секунду ( $\Delta N = 1$  моль,  $\Delta \tau = 1$  с), запишем

$$\dot{v}_x = \frac{k_x |\Delta g|}{T \Delta \tau} = \frac{k_x |\dot{g}|}{T}, \quad (4)$$

где  $\dot{v}_x$  - парциальная (мольная) скорость производства термического заряда диссипации, Вт/(моль · К);  $\Delta g$  - парциальная энергия Гиббса, вовлеченная в обмен, Дж/моль;  $\dot{g}$  - парциальная мощность обмена, Вт/моль. Если предположить, что между компонентами воздушной смеси не происходит химического взаимодействия и в чистом состоянии они подчиняются законам идеального газа, то в этом случае сама воздушная смесь ведет себя как идеальный газ. Такие смеси образуются без изменения объема и к ним применим закон Дальтона о суммировании парциальных давлений. При соблюдении условий  $p = const$  и  $T = const$  для одного моля двойной смеси (сухой воздух, газ примесь) можно записать

$$\Delta g_{p, T} = RT \left( \frac{p_i}{p} \ln \frac{p_i}{p} + \frac{p_j}{p} \ln \frac{p_j}{p} \right),$$

где  $R$  - универсальная газовая постоянная, равная 8,31432 Дж/моль · К;  $p_i$  - давление  $i$ -й компоненты смеси;  $p$  - общее давление смеси;  $p_j$  - давление сухого воздуха.

Подставляя последнее выражение в (4), получим

$$\dot{v}_x = \frac{R}{\Delta \tau} \left| k_i \frac{p_i}{p} \ln \frac{p_i}{p} \right| + \frac{R}{\Delta \tau} \left| k_j \frac{p_j}{p} \ln \frac{p_j}{p} \right|, \quad (5)$$

где в общем случае для обеих составляющих

$$k = \frac{\mu' - \mu''}{\mu''} = \left| \frac{RT \ln \frac{p''}{p'}}{\mu'' + RT \ln p''} \right|, \quad (6)$$

$\mu'$ ,  $\mu''$  - химические потенциалы, побуждающие химический заряд к обмену, причем  $\mu'$  - потенциал нормальной воздушной смеси,  $p''$  - давление компоненты смеси в нормальных условиях,  $p'$  - давление компоненты при условиях отличных от нормальных, а  $\mu^0$  - постоянная.

В предельно неблагоприятном случае (при движении химического заряда в условиях трения весь заряд, равный обмениваемому, превращается в термический заряд. В предельно благоприятном случае при обратимом процессе обмена рассеивания энергии не происходит, поэтому справедливо неравенство  $0 \leq k \leq 1$ .

Практика показывает, что небольшие отклонения в химическом составе воздуха, как правило, остаются без заметных последствий, и, следовательно, при этих условиях процессы обмена могут быть отнесены

к обратимым, т.е.  $k \approx 0$ . При увеличении концентрации примеси процесс обмена становится все более необратимым и начиная с некоторого критического значения парциального давления газа-примеси возникает полная необратимость обмена, т.е.  $k = 1$ . При этом из (6) находим  $\mu^0 = RT \ln p'' / (p_*'')^2$ , где  $p_*''$  - парциальное давление компонента, при котором обмен становится полностью необратимым. Подставляя это выражение в (6), имеем:

$$k = \left| \frac{\ln p_i'' - \ln p''}{\ln p'' p'' - \ln (p_*'')^2} \right|$$

Из соотношения (5) при условии  $p_{i(j)}'' \neq p_{i(j)}'' = p_{i(j)}$  окончательно получим

$$\dot{v}_* = \frac{R}{\Delta \tau} \left| \frac{\ln \frac{p_i''}{p_i} \left( \frac{p_i}{p} \ln \frac{p_i}{p} \right)}{\ln \frac{p_i'' p_i}{(p_*'')^2}} \right| + \frac{R}{\Delta \tau} \left| \frac{\ln \frac{p_i''}{p_i} \left( \frac{p_i}{p} \ln \frac{p_i}{p} \right)}{\ln \frac{p_i'' p_i}{(p_*'')^2}} \right| \quad (7)$$

Рассмотрим в качестве  $i$ -й компоненты воздуха - кислород ( $O_2$ ). Эта составляющая воздушной смеси играет важную роль в различных процессах. В качестве примера предположим, что полная обратимость процессов возможна только при нормальных условиях, т.е. в соответствии с /2/,  $p = 1013,25$  гПа,  $(p_i'')_{O_2} = 212,25$  гПа,  $(p_i'')_{O_2} = 801$  гПа. Полную необратимость процессов обмена отнесем к условиям, когда  $(p_{*i})_{O_2} = 1012,25$  гПа, а  $(p_{*i})_{O_2} = 1$  гПа. Причем первое из последних двух значений характерно для случаев избыточного давления кислорода, связанных с повышением общего атмосферного давления ( $p$ ). Второе - для случая, когда парциальное давление  $O_2$  понижено вследствие прохождения барических ложбин и циклонов, а также при эксплуатации изделий в высокогорных районах и на высотах. Естественно, что оба значения условны и для каждого конкретного случая анализа процессов обмена изделия должны специально устанавливаться.

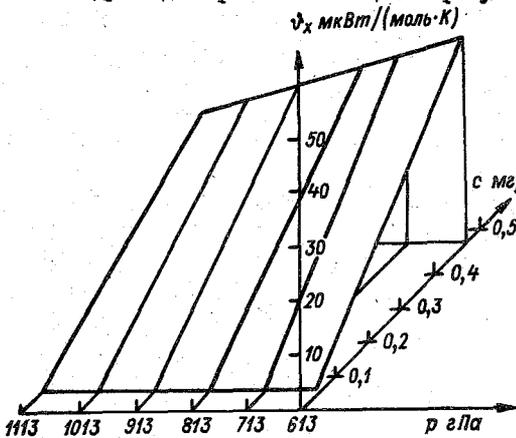
В табл.1 представлены результаты расчета величины  $(\dot{v}_*)_{O_2}$  (третья строка) при различном атмосферном давлении. Значения 1060 и 850 гПа введены дополнительно. Это объясняется тем, что по /3/ средства измерений и другие промышленные изделия в обычном исполнении могут эксплуатироваться до высоты 1000 м над уровнем моря, где по /2/ давление стандартной атмосферы 899 гПа. Прохождение барических систем сопровождается отклонением давлений 1013 и 899 гПа в пределах  $\pm 50$  гПа. Это и стало основанием для введения дополнительных значений. Во второй строке таблицы приведены значения парциального давления кислорода (в гПа).

Таблица 1

1113,25	1060,00	1013,25	913,25	850,00	813,25	713,25	613,25
233,20	222,04	212,25	191,30	178,05	170,36	149,41	128,46
473,3	204,6	0,0	28,1	65,9	82,9	133,9	194,1

Из табл. I видно, что повышение общего давления и, как следствие, повышение концентрации кислорода усиливает необратимость обмена более значительно, чем обеднение воздуха  $O_2$ . Так превышение нормальных значений парциального давления  $O_2$  на 21 гПа увеличивает значение  $\dot{V}_x$  до 473 мВт/(моль · К), а понижение на то же значение уменьшает величину  $\dot{V}_x$  до 28 мВт/(моль · К).

Формула (7) может быть также применена для определения скорости возникновения термического заряда диссипации, вызванного загрязнением воздуха посторонними газами. На рисунке представлена поверхность,



Рисунок

отображающая зависимость величины  $\dot{V}_x$  от концентрации сернистого ангидрида с в изотермических условиях при 25 °С и различных давлениях атмосферы. Расчеты к рисунку проводились без учета второго слагаемого формулы (7) близкого к нулю. При этом принимали  $\rho'' = 0,967 \times 10^{-5}$  гПа, что соответствует по /3, 6/ концентрации сернистого ангидрида  $c = 0,4$  мг/м<sup>3</sup>. При такой концентрации и при общем давлении атмосферы 613,25 гПа значение скорости  $\dot{V}_x = 39,26$  мВт/(моль · К), что на три-четыре порядка меньше значений, полученных для случая с кислородом. Даже увеличение концентрации  $S O_2$  до 5 мг/м<sup>3</sup>, при  $K = 1$ , скорость производства термического заряда диссипации остается небольшой - 0,32 мВт/(моль · К). Это объясняется особенностями зависимостей  $i$ -й и  $j$ -й компонент от парциального давления.

Формула (7), основанная на законе Дальтона, позволяет определять суммарное воздействие среды на изделия при одновременном отклонении нескольких компонент воздуха от их нормальных значений:

$$\dot{V}_x = (\dot{V}_x)_1 + (\dot{V}_x)_2 + \dots + (\dot{V}_x)_d = \sum_{d=1}^D (\dot{V}_x)_d,$$

где  $(\dot{V}_x)_d$  - скорость возникновения термического заряда диссипации при отклонении от нормы концентрации компоненты ( $d$ );  $D$  - число компонент, отклонившихся от нормы.

Определение общего негативного эффекта воздействия среды на изделие, вследствие изменений ее химического состава, возможно на основании расчета суммы термического заряда диссипации, произведенного за исследуемый период:

$$\Delta \dot{V}_x = \sum_{m=1}^M (\dot{V}_x)_m t_m,$$

где  $(\dot{V}_x)_m$  - среднее значение величины  $\dot{V}_x$  за некоторый единичный временной интервал, который равен секунде для полуцикла обмена принятой модели и среды, т.е.  $t_m = 1$  с.

В соответствии с 4, 5/ исследуемый период выбирается равным году, на основании чего  $M = 31,536 \cdot 10^6$ . В табл.2 представлены суммы зарядов  $\Delta \dot{V}_x$ , выработанные за год в условиях постоянного отклонения концентрации кислорода из-за пониженного (повышенного) атмосферного давления, а также при загрязнении воздуха  $S_{O_2}$  с концентрацией  $0,3$  мг/м<sup>3</sup> в течение года. В первой строке даны значения атмосферного давления (в гПа), во второй - годовые суммы зарядов  $\Delta \dot{V}_x$ , вызванных отклонением концентрации кислорода (в МДж/(моль·К)), в третьей - суммы зарядов, выработанных из-за загрязнения воздуха  $S_{O_2}$  (Дж/(моль·К)).

Таблица 2

1113,25	1060,00	1013,25	913,25	850,00	813,25	713,25	613,25
14,93	6,45	0,0	0,89	2,08	2,61	4,22	6,12
311,46	326,75	340,21	375,00		418,04	472,68	544,45

Из табл.2 видно, что суммы зарядов по кислороду **изменяются** в пределах 6-14 МДж/(моль·К) и сравнимы с аналогичным эффектом от изобарических отклонений температуры, достигающих 4-33 МДж/(моль·К). Суммы зарядов по  $S_{O_2}$  существенно меньше и не превышают 600 Дж/(моль·К). Причем сумма по кислороду растет по мере отклонения общего атмосферного давления от нормального как в большую, так и в меньшую сторону. В отличие от этого суммы по  $S_{O_2}$  возрастают плавно при изменении общего давления от 1113 до 613 гПа и при последнем значении достигают максимума.

**Выводы.** Термодиссипативный метод позволяет оценивать агрессивность атмосферы, возникающую вследствие изменения химического состава воздушной смеси, в том числе - суммарный эффект от одновременного изменения концентрации нескольких компонентов смеси.

На химическую агрессивность газовой воздушной смеси основное влияние оказывают парциальное давление компонентов, концентрации которых отклонились от нормы, причем влияние пропорционально концентрации компонента в нормальной смеси.

#### Список литературы

1. Вейник А.И. Термодинамика. - Минск: Вышэйшая школа, 1968. - 464 с.
2. ГОСТ 4401-73: Стандартная атмосфера. Параметры. - М.: Изд-во стандартов, 1974. - 118 с.

3. ГОСТ 15150-69. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды. - М.: Изд-во стандартов, 1980. - 44 с.
4. ГОСТ 16350-70. Климат СССР. Районирование и характеристики климатических параметров для промышленных изделий. - М.: Изд-во стандартов, 1978. - 40 с.
5. ГОСТ 24482-80. Микроклиматические районы земного шара с тропическим климатом. Районирование и статистические параметры климатических факторов для технических целей. - М.: Изд-во стандартов, 1981. - 94 с.
6. Е р е м и н Е. Н. Основы химической термодинамики. - М.: Высшая школа, 1978. - 391 с.
7. Ж е л е з н а я И. Л. О возможности повышения эффективности эквивалентных испытаний. - Надежность и контроль качества, 1981, № 10, с. 37-39.
8. П е р е в е р з е в Е. С. Об одном термодинамическом принципе теории эквивалентных испытаний. - Надежность и контроль качества, 1979, № 8, с. 13-17.

Б.Я.Толстобров

#### ВЫБОР ИНТЕРВАЛА ДИСКРЕТИЗАЦИИ НА ОСНОВЕ ФУНКЦИИ СТАРЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ

Качество измерительной информации зависит от информационных потерь, которые происходят на всех этапах ее получения, обработки, передачи и хранения. Их можно разделить на две группы: потери, вызванные несовершенством средств измерения, и потери, обусловленные временными факторами. Причем, если первые могут быть существенно снижены при использовании соответствующих технических средств, то вторые являются принципиально невозполнимыми и зависят главным образом от темпа старения получаемой информации. Этот эффект иногда эвристически учитывается при проектировании **измерительных устройств** или при разработке методик измерения. Вероятно наиболее рациональным является **комплексный подход, позволяющий** одновременно учитывать параметры измерительного устройства и характеристики исследуемого процесса.

В данной работе ставится вопрос о снижении информационных потерь за счет выбора интервала дискретизации на основе исполь-

зования сведений о статистической структуре исследуемых временных рядов метеорологических характеристик. При этом, как и в работе /4/, за информационный критерий примем функцию старения информации. Именно она позволяет обосновать выбор интервала дискретизации по времени в указанном плане.

Под функцией старения результата измерения будем понимать величину  $P(t)$ , характеризующую вероятность сохранения отсчета  $x(t)$  в пределах одной апертуры  $\Delta$  к моменту  $t + \theta$ , где  $\theta$  - шаг квантования. Наша цель заключается в нахождении вида этой функции. Подчеркнем, что в данном случае нас интересует вероятность **попадания минимум двух отсчетов в пределы одной апертуры, равной или кратной цене деления измерительного прибора. Тогда второй из них будет избыточным, ибо значимым является фактор перехода из одной апертуры в две соседние (смежные).** Для решения данной задачи необходимо задаться некоторой моделью исследуемого процесса. Будем полагать, что в пределах одной апертуры зависимость  $x(t)$  носит экспоненциальный характер.

Пусть какой-либо отсчет соответствует значению  $x_0$  (рис.1).

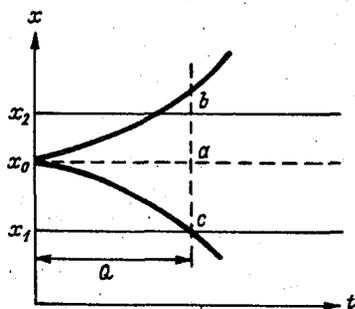


Рис. I

В случае экспоненциальной аппроксимации при  $\dot{x}(0) \geq 0$  будет иметь место пересечение граничной экспоненты с верхней границей апертуры ( $x = x_2$ ), а при  $\dot{x}(0) \leq 0$  пересечение с нижней границей апертуры ( $x = x_1$ ), причем  $\Delta = x_2 - x_1$ .

Рассмотрим первый случай

$$x = x_0 + (x_1 - x_0)(1 - e^{-\alpha t}); \dot{x}_1(0) > 0,$$

$$x(0) = x_0, \quad x(\theta) = x_2.$$

Наличие второго избыточного отсчета соответствует тому, что вторая точка пересечения при  $t = 0$  должна лежать на линии  $ab$ . Граничная экспонента определяется уравнением

$$x = x_1 - (x_1 - x_0)e^{-\alpha t}.$$

Отсюда

$$\alpha = \frac{1}{\theta} \ln \frac{\Delta}{x_0 - x_1},$$

$$\dot{x}(t) = \alpha(x_1 - x_0)e^{-\alpha t} = \alpha(x_0 - x_1)e^{-\alpha t},$$

$$\dot{x}_1(0) = \alpha(x_0 - x_1),$$

$$\dot{x}_1(0) = \frac{x_0 - x_1}{\theta} \ln \frac{\Delta}{x_0 - x_1}.$$

Рассматриваемый процесс  $x(t)$  является гауссовым. Тогда выражение для соответствующей плотности вероятности распределения случайной величины  $\dot{x}_I(0)$  будет иметь вид:

$$W_I(\dot{x}_I) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_2} \int_0^{\dot{x}_I} e^{-\frac{\dot{x}^2}{2\sigma_2^2}} d\dot{x} = \frac{1}{2} \Phi\left(\frac{\dot{x}_I}{\sqrt{2} \sigma_2}\right) = \frac{1}{2} \Phi\left(\frac{x_0 - x_1}{\sqrt{2} \sigma_2 \theta} \ln \frac{\Delta}{x_0 - x_1}\right).$$

Здесь  $\sigma_2$  - стандарт производной  $\dot{x}$ , а  $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-\chi^2} d\chi$ .

Рассмотрим второй случай

$x = x_0 + (x_2 - x_0)(1 - e^{-\alpha t})$ ,  $\dot{x}_I(0) \leq 0$   
 Граничная экспонента определяется уравнением

$$x_1 = x_0 + (x_2 - x_0)(1 - e^{-\alpha \theta}).$$

Отсюда

$$\alpha = \frac{1}{\theta} \ln \frac{\Delta}{x_2 - x_1};$$

$$\dot{x} = -\alpha(x_2 - x_0) e^{-\alpha t};$$

$$\dot{x}_I(0) = -\alpha(x_2 - x_0);$$

$$\dot{x}_I(0) = -\frac{x_2 - x_0}{\theta} \ln \frac{\Delta}{x_2 - x_0};$$

$$W_{II}(\dot{x}_I) = \frac{1}{2} \Phi\left(\frac{x_2 - x_0}{\sqrt{2} \sigma_2 \theta} \ln \frac{\Delta}{x_2 - x_0}\right).$$

Распределение  $x_0$  внутри апертуры будем считать равномерным, что вполне справедливо при небольших  $\Delta$ . Тогда вероятность пересечения  $ab$  или  $ac$ , т.е. вероятность сохранения отсчета можно определить с помощью уравнения

$$P = \frac{1}{2\Delta} \int_{x_1}^{x_2} \left[ \Phi\left(\frac{x_0 - x_1}{\sqrt{2} \theta \sigma_2} \ln \frac{\Delta}{x_0 - x_1}\right) + \Phi\left(\frac{x_2 - x_0}{\sqrt{2} \theta \sigma_2} \ln \frac{\Delta}{x_2 - x_0}\right) \right] dx_0.$$

Как известно [3],  $\sigma_2 = \omega_1 \sigma_1$ , где  $\sigma_1$  - стандарт исходного процесса, а  $\omega_1$  средняя квадратическая круговая частота.

Используя эту зависимость и обозначая  $x_0 - x_1 = \lambda$ , последнее выражение можно переписать в виде

$$P = \frac{1}{2\Delta} \int_0^{\Delta} \left[ \Phi\left(\frac{\lambda}{\sqrt{2} \theta \omega_1 \sigma_1} \ln \frac{\Delta}{\lambda}\right) + \Phi\left(\frac{\Delta - \lambda}{\sqrt{2} \theta \omega_1 \sigma_1} \ln \frac{\Delta}{\Delta - \lambda}\right) \right] d\lambda \quad (1)$$

Или, введя  $z = \lambda/\Delta$ ;  $y = \Delta/\sigma_1$ ;  $x = \theta \omega_1$ , будем иметь

$$P = \frac{1}{2} \int_0^1 \left[ \Phi\left(\frac{zy}{\sqrt{2} x} \ln \frac{1}{z}\right) + \Phi\left(\frac{(1-z)y}{\sqrt{2} x} \ln \frac{1}{1-z}\right) \right] dz.$$

Отсюда легко получить окончательное выражение исходной вероятности

$$P\left(\frac{y}{x}\right) = \int_0^1 \Phi\left(\frac{z}{\sqrt{2}} \frac{y}{x} \ln \frac{1}{z}\right) dz$$

или

$$P(\varphi) = \int_0^1 \varphi \left( \frac{\varphi}{\sqrt{2}} z \ln \frac{1}{z} \right) dz. \quad (2)$$

При этом с ростом  $\varphi$  эта вероятность увеличивается. Увеличение  $\varphi$  может быть вызвано либо ростом  $\Delta$ , либо уменьшением  $\Theta$ ,  $\omega_1$  или  $\Theta$ . Следовательно, значение  $\varphi$  определяется как свойствами процесса, так и параметрами прибора. При обратном изменении упомянутых характеристик наблюдается уменьшение и соответственно  $P(\varphi)$ .

На рис. 2 представлена соответствующая кривая  $\tilde{P}(\varphi)$  для экспоненциальной аппроксимации (1). Как и следовало ожидать,  $P(0) = 0$ ,  $P(\infty) = 1$ .

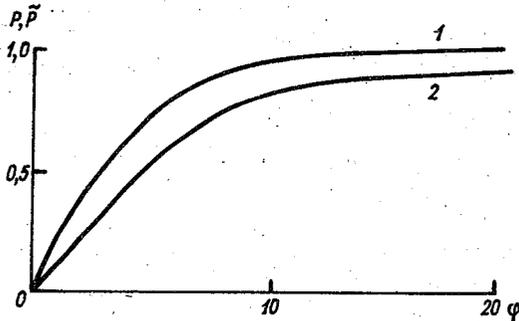


Рис. 2

Аналогичное распределение наблюдается и в случае линейной аппроксимации (2). При выводе следует иметь в виду, что отсчет будет избыточным, когда при  $t = 0$  имеется точка пересечения рассматриваемой прямой либо с отрезком  $ab$ , либо с  $ac$ . Это будет означать,

что первая производная  $\dot{x}$ , т.е. тангенс угла наклона аппроксимирующей прямой попадает в интервал  $\frac{x_1 - x_0}{\theta} < \dot{x} < \frac{x_2 - x_0}{\theta}$ .

Тогда вместо (1) будем иметь

$$\tilde{P} = \frac{1}{2\Delta} \int_{x_1}^{x_2} \left[ \varphi \left( \frac{x_0 - x_1}{\sqrt{2}\theta\omega_1\Theta} \right) + \varphi \left( \frac{x_2 - x_0}{\sqrt{2}\theta\omega_1\Theta} \right) \right] dx_0.$$

Введем как и ранее безразмерные переменные  $x$ ,  $y$ ,  $z$  и запишем последнее выражение следующим образом:

$$\tilde{P} \left( \frac{y}{x} \right) = \frac{1}{2} \int_0^1 \left[ \varphi \left( \frac{z}{\sqrt{2}} \frac{y}{x} \right) + \varphi \left( \frac{(1-z)}{\sqrt{2}} \frac{y}{x} \right) \right] dz$$

или

$$\tilde{P}(\varphi) = \int_0^1 \varphi \left( \frac{z}{\sqrt{2}} \varphi \right) dz. \quad (3)$$

В результате интегрирования (3), получим

$$\tilde{P}(\varphi) = \varphi \left( \frac{\varphi}{\sqrt{2}} \right) + \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{1}{\varphi} \left( e^{-\frac{\varphi^2}{2}} - 1 \right). \quad (4)$$

Кривая вероятности  $\tilde{P}(\varphi)$  также нанесена на рис. 2.

Совершенно очевидно, что дискретная и непрерывная /4/ постановки различны и не могут быть получены одна из другой предельным переходом. Это следует из того, что при дискретном варианте задается интервал  $\theta$  и рассматривается вопрос о том, когда последующий отсчет выйдет из данной апертуры или наоборот останется и будет избыточным. А при непрерывном варианте — когда и сколько времени он сохранится в пределах одной апертуры, причем исходная точка лежит всегда на границе апертуры, а при дискретном — ее начальное и конечное положение произвольны.

В выведенных формулах фигурирует величина  $\omega_1$ . Как известно /3/,  $\omega_1^2$  представляет собой отношение дисперсии производной процесса к дисперсии самого процесса.

В принципе, если в нашем распоряжении имеется корреляционная функция процесса  $R(\tau)$ , то можно просто воспользоваться отношением

$$\omega_1^2 = \frac{\sigma_z^2}{\sigma_x^2} = -\frac{R''(0)}{R(0)}$$

Формулы для  $R(\tau)$  являются эмпирическими, и описание процесса через их посредство является лишь приближением к реальному.

При этом наибольшие ошибки имеют место в области экстремума  $R(0)$ . В окрестности этой точки наблюдаются наибольшие изменения первой ( $R'(0)$ ) и второй ( $R''(0)$ ) производных. В силу этого даже малые ошибки в задании  $R(\tau)$  вблизи  $\tau = 0$  могут привести к сколь угодно большим ошибкам в определении  $R'(0)$  и  $R''(0)$ . Поэтому именно последняя величина представляет в нашем случае наибольший интерес.

Большой точности можно достичь если пользоваться формулой, в которой  $R'(0)$  и  $R''(0)$  выражены через спектральную плотность

$$\omega_1^2 = \frac{\int \omega^2 S(\omega) d\omega}{\int S(\omega) d\omega}$$

Следует также иметь в виду, что не все формулы, аппроксимирующие реальный ход кривой  $R(\tau)$  имеют  $R''(0)$ . Так, весьма распространенная в метеорологии зависимость  $R(\tau) = e^{-\alpha|\tau|}$  в точке

$\tau = 0$  имеет разрыв по первой производной, и, следовательно, не имеет второй. В этом частном случае  $S(\omega) = 4\alpha/(\alpha^2 + \omega^2)$ , а соответствующий интеграл расходится.

В том случае, когда  $R(\tau)$  имеет вторую производную, при определении  $\omega_1^2$  можно использовать подход, описанный /2/:

$$\omega_1^2 = \frac{\int R(\tau) \int a'(s) a'(s+\tau) ds d\tau}{\int R(\tau) \int a(s) a(s+\tau) ds d\tau}$$

где  $R(\tau)$  — корреляционная функция исходного процесса,  $a(s)$  — весовой коэффициент, характеризующий инерционные свойства прибора.

При  $a = 1/T$

$$\omega_1^2 = \frac{\int (T-\tau) R''(\tau) d\tau}{\int (T-\tau) R(\tau) d\tau}$$

Для определения  $\omega_1^2$  целесообразно привлечь теорию выбросов. В работе /3/ показано, что среднее число пересечений  $\bar{N}$  некоторого заданного уровня  $U$  может быть найдено по формуле

$$\bar{N}(U) = \frac{1}{2\pi\sigma_1} \sqrt{-R''(0)} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{U}{\sigma_1} \right)^2 \right].$$

При  $U = 0$ ,  $\bar{N}(0) = \frac{1}{2\pi\sigma_1} \sqrt{-R''(0)}$

Отсюда  $R''(0) = 4\pi^2\sigma_1^2\bar{N}^2(0)$ .

И, следовательно,

$$\omega_1^2 = -\frac{R''(0)}{R(0)} = \frac{R''(0)}{\sigma_1^2} = 4\pi^2\bar{N}^2(0). \quad (5)$$

Величина  $\omega_1^2$ , вычисленная по соотношению (5), характеризует процесс на выходе прибора. Возникает вопрос, как она меняется в зависимости от инерционности, которой определяется шаг квантования.

Для решения этой задачи воспользуемся соотношением /4/

$$\bar{N}(0) = \frac{1}{2\pi\lambda} \sqrt{\frac{\lambda}{\tau_k} - 1}, \quad (6)$$

где  $\lambda$  - постоянная времени прибора,  $\tau_k = \frac{1}{R(0)} \int_0^\infty R(\tau) d\tau$  - временной масштаб корреляции исходного процесса.

Следовательно, для вычисления  $\omega_1^2$  необходимо знать  $\tau_k$ . Его можно определить, если известны, либо вид корреляционной функции, либо эффективная частота процесса ( $\Delta\omega_{эф} = \frac{1}{s(0)} \int_0^\infty s(\omega) d\omega$ ), когда в нашем распоряжении имеется экспериментально найденная кривая спектральной плотности, связанная с  $\tau_k$  зависимостью /4/:

$$\tau_k = \frac{\pi}{2\Delta\omega_{эф}}. \quad (7)$$

Проверка степени достоверности полученных формул осуществлялась путем сопоставления расчетных данных с эмпирическими. Ниже мы обратимся к соответствующему анализу.

Обрабатывалась лента самописца, на которой непрерывно в течение нескольких часов регистрировалось значение скорости ветра на высоте 10 м. Первичным преобразователем скорости ветра являлся искровой анемометр с коэффициентом инерции равным  $10^{-3}$  с.

Бумажная лента шириной 80 мм, разделенная на 16 апертур, протягивалась со скоростью 50 мм/с. На полях ленты каждую секунду автоматически делались засечки. С ленты в десяти миллиметровом интервале (удвоенная апертура) снимались значения  $\theta$  с точностью до 0,02 о, т.е. время в течение которого текущее значение скорости ветра находится в заданном интервале.

На основании обработки экспериментального материала получено, что  $\sigma_1^2 = 1,8 \text{ м}^2/\text{с}^2$ ;  $\omega_1^2 = 2,7 \text{ с}^{-1}$ .

На рис.3 представлена эмпирически полученная зависимость плотности вероятности сохранения двух отсчетов в пределах одной апертуры

$f_i = n_i / N$  от  $x$ , где  $n_i$  - повторяемость пребывания процесса в  $i$ -й апертуре,  $N$  - суммарное количество случаев.

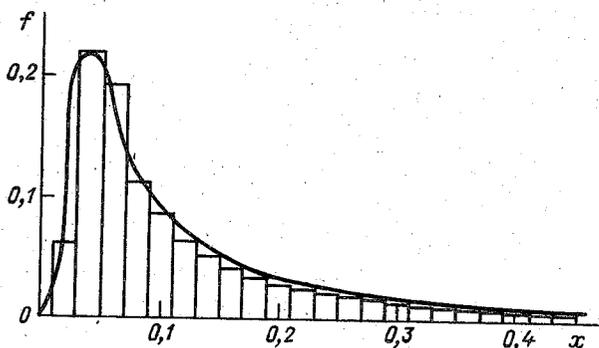


Рис.3

**Теоретическая**  
плотность вероятности  $f(x)$ , соответствующая выражению (4), для случая линейной аппроксимации имеет вид  $f(x) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{x^2}{y^2} (1 - e^{-\frac{x^2}{2x^2}})$ .

(8)

Вероятность совпадения эмпирической и теоретической кривых по критерию согласия Колмогорова

равна 0,89. Дополнительный анализ показывает, что экспоненциальная аппроксимация с достаточно хорошей точностью отражает реальный ход кривой для всех  $y$  в пределах 0,1-1,0, а линейная зависимость хорошо описывает процесс при  $y \leq 0,5$ , при больших значениях  $y$  отклонения становятся уже значительными.

На рис.4 представлена серия кривых вероятностей значимых отсчетов  $\tilde{P}_i(x) = 1 - \tilde{P}(x)$  при разных безразмерных апертурах  $y$  (0,1; 0,5; 1,0), где  $\tilde{P}(x)$  определяется по формуле (4).

При оценке качества измерительной информации, задаваясь определенной вероятностью отсчета, можно рассчитать время старения результатов. Например, задаваясь вероятностью перехода в другую апертуру, равной 0,95, получим, что время старения (шаг квантования) для апертуры  $\Delta = 0,1$  м/с равно 0,06; для апертуры  $\Delta = 0,5$  м/с время старения равно 0,31 с; а для апертуры  $\Delta = 1,0$  м/с время равно 1 с. Чем меньше вероятность сохранения достоверности, тем чаще надо брать отсчет. Таким образом, знание функции старения может быть весьма полезным в практической работе.

Рассматриваемый метод лишен тех недостатков, которые влечет за собой использование теоремы Котельникова, поскольку последняя, строго говоря, применима лишь к процессам с квазиравномерным распределением спектра.

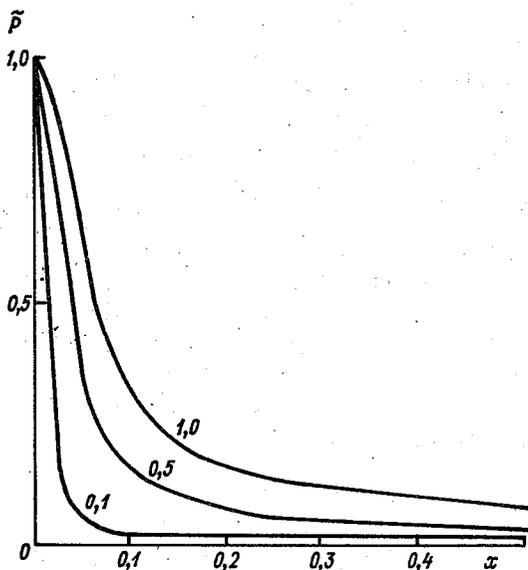


Рис.4

#### Список литературы

1. Б л о х и н А. В. Аппаратурный анализ характеристик случайных процессов. - М.: Энергия, 1976. - 93 с.
2. В и л е н к и н С.Я. Статистическая обработка результатов исследования случайных функций. - М.: Энергия, 1979. - 320 с.
3. Т и х о н о в В. И. Статистическая радиотехника. - М.: Советское радио, 1966. - 678 с.
4. Т о л с т о б р о в Б. Я. Оценка точности измерительной аппаратуры на основе функции старения информации. - Труды ГГО, 1983, вып.476.

## СОДЕРЖАНИЕ

В.А.Кузьмин, С.Г.Ефимов, Ю.В.Роголёв, Н.П.Фатеев.	
Принципы построения рабочего эталона скорости воздушного потока .....	3
В.А.Кузьмин, Ю.В.Роголёв, Н.П.Фатеев. Анализ погрешностей абсолютных методов измерения скорости воздушного потока ....	6
В.А.Кузьмин, Ю.В.Роголёв, Н.П.Фатеев. Анализ погрешностей механического и пневмометрического методов измерения скорости воздушного потока .....	15
В.А.Кузьмин, Ю.В.Роголёв, Н.П.Фатеев. Анализ погрешностей термоанемометрического и искрового методов измерения скорости воздушного потока .....	24
В.А.Кузьмин, Ю.В.Роголёв, Н.П.Фатеев. Метрологические исследования по выбору образцовых средств измерения скорости воздушного потока .....	28
В.Ю.Окоренков. Исследование метрологической надежности средств измерений скорости воздушного потока .....	34
И.В.Бухинник, В.Л.Арूपин, А.В.Верба, Ю.В.Роголёв. Исследование поля скоростей в рабочей зоне аэродинамической трубы	43
Ю.В.Роголёв, Н.П.Фатеев. Нормирование погрешностей и методика аттестации установок типа ПО-37 .....	45
П.Я.Никишков, В.Ю.Окоренков, Ю.В.Роголёв, Н.П.Фатеев. Расчет оптимального отклонения угла атаки винтов анемометров для оценки сохранности их градуировочных характеристик .....	52
Ю.В.Роголёв, Н.П.Фатеев. Расчет имитируемых параметров метеозащитных элементов при поверке центрального устройства метеостанции КРАМС .....	57
Б.Л.Кожевников. Физико-химическое воздействие выпадающих осадков на качество метеорологических измерительных устройств	62
Б.Л.Кожевников. Оценка механического воздействия выпадающих осадков на метеорологические приборы .....	68
Б.Л.Кожевников. Оценка воздействия водяного пара атмосферы на средства измерений .....	72
Б.Л.Кожевников. Влияние состава атмосферного воздуха на качество метеорологических приборов .....	76
Б.Я.Толстобров. Выбор интервала дискретизации на основе функции старения информации .....	82

Труды ГГО, вып. 491  
Метрологические исследования и вопросы поверки  
метрологической аппаратуры

н/к

Редактор М. А. Кустикова

Подписано в печать 20.06.85. М-22428. Формат 60x90<sup>1</sup>/16. Бумага  
картографическая. Печать офсетная. Печ. л. 6,5. Кр.-отт. 6,75.

Уч.-изд. л. 6,05: Тираж 600 экз. Индекс МОИ-141. Заказ 2349

Цена 40 коп. Заказное.

Гидрометеиздат, 199053, Ленинград, 2-я линия, д. 23  
Московская типография № 9 Союзполиграфпрома при Государственном  
комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли  
109033, Москва, Ж-33, ул. Волочаевская, д. 40.

УДК 551.501+551.508

Принципы построения рабочего эталона скорости воздушного потока. Кузьмин В.А., Ефимов С.Г., Роголёв Ю.В., Фатеев Н.П. - Труды ГГО, 1985, вып.491, с. 3-6.

В статье приведены принципы построения рабочего эталона скорости воздушного потока, разработанные авторами на основе анализа погрешностей существующих образцовых средств измерения. Сформулированы основные задачи, возникающие при создании рабочего эталона, и выбраны методы измерений скорости воздушного потока, на основе которых такой эталон может быть создан.

Библ. 7.

УДК 551.501+551.508

Анализ погрешностей абсолютных методов измерения скорости воздушного потока. Кузьмин В.А., Роголёв Ю.В., Фатеев Н.П. - Труды ГГО, 1985, вып.491, с. 6-15.

В статье приводится анализ погрешностей время-пролетного, оптического и ультразвукового методов измерения скорости воздушного потока. Показано, какой из этих методов может быть использован при создании рабочего эталона скорости воздушного потока.

Библ. 14.