ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**ГОСТ Р ИСО 16622— 2009**

# Метеорология

# АКУСТИЧЕСКИЕ АНЕМОМЕТРЫ-ТЕРМОМЕТРЫ

## Методы приемочных испытаний при измерениях средней скорости ветра

**ISO 16622:2002**
**Meteorology — Sonic anemometers/thermometers — Acceptance test methods for mean wind measurements**
**(IDT)**

**Издание официальное**

Москва
Стандартинформ
2010

## Предисловие

Цели и принципы стандартизации в Российской Федерации установлены Федеральным законом от 27 декабря 2002 г. № 184-ФЗ «О техническом регулировании», а правила применения национальных стандартов Российской Федерации — ГОСТ Р 1.0—2004 «Стандартизация в Российской Федерации. Основные положения»

**Сведения о стандарте**

1 ПОДГОТОВЛЕН Автономной некоммерческой организацией «Научно-исследовательский центр контроля и диагностики технических систем» (АНО «НИЦ КД») на основе собственного аутентичного перевода на русский язык стандарта, указанного в пункте 4

2 ВНЕСЕН Техническим комитетом по стандартизации ТК 457 «Качество воздуха»

3 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 15 декабря 2009 г. № 855-ст

4 Настоящий стандарт идентичен международному стандарту ИСО 16622:2002 «Метеорология. Акустические анемометры-термометры. Методы приемочных испытаний при измерениях средней скорости ветра» (ISO 16622:2002 «Meteorology — Sonic anemometers/thermometers — Acceptance test methods for mean wind measurements», IDT).

При применении настоящего стандарта рекомендуется использовать вместо ссылочных международных стандартов соответствующие им национальные стандарты Российской Федерации, сведения о которых приведены в дополнительном приложении ДА

5 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

*Информация об изменениях к настоящему стандарту публикуется в ежегодно издаваемом информационном указателе «Национальные стандарты», а текст изменений и поправок — в ежемесячно издаваемых информационных указателях «Национальные стандарты». В случае пересмотра (замены) или отмены настоящего стандарта соответствующее уведомление будет опубликовано в ежемесячно издаваемом информационном указателе «Национальные стандарты». Соответствующая информация, уведомление и тексты размещаются также в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет*

© Стандартинформ, 2010

Настоящий стандарт не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен в качестве официального издания без разрешения Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии

## Содержание

1 Область применения . . . 1
2 Нормативные ссылки . . . 1
3 Термины и определения . . . 1
4 Обозначения . . . 2
5 Краткое описание методов . . . 3
6 Осмотр решетки перед проведением испытаний . . . 3
7 Испытание в камере с нулевым потоком воздуха . . . 4
7.1 Цель испытания . . . 4
7.2 Методика испытаний . . . 4
8 Испытание в аэродинамической трубе . . . 5
8.1 Цель испытания . . . 5
8.2 Предварительные измерения . . . 5
8.3 Методика испытаний . . . 6
9 Испытание в барокамере (необязательное) . . . 8
9.1 Цель испытания . . . 8
9.2 Аппаратура . . . 9
9.3 Методика испытаний . . . 9
10 Испытания в полевых условиях . . . 9
10.1 Цель испытания . . . 9
10.2 Продолжительность испытания . . . 9
10.3 Место проведения испытаний . . . 9
10.4 Испытательное оборудование . . . 9
10.5 Оценка результатов испытаний . . . 10
Приложение А (справочное) Камера с нулевым потоком воздуха . . . 12
Приложение В (справочное) Измерение скорости ветра анемометрами . . . 13
Приложение С (нормативное) Аэродинамическая труба . . . 16
Приложение D (справочное) Зависимость волнового сопротивления воздуха от высоты над уровнем моря . . . 17
Приложение ДА (справочное) Сведения о соответствии ссылочных международных стандартов ссылочным национальным стандартам Российской Федерации . . . 18
Библиография . . . 19

## Введение

Влияние деятельности человека на распространение в воздухе разного рода загрязняющих веществ ощущается, в основном, в приземном слое атмосферы толщиной несколько десятков метров. Для этого слоя характерны большие градиенты нестационарных тепловых потоков, резкие перепады влажности и быстрые перемещения воздушных масс. Чтобы описать состояние приземного слоя атмосферы необходимо анализировать информацию о течении потоков воздуха в трех измерениях и их турбулентности в течение короткого времени в небольшой локальной области пространства. Эта информация должна быть представлена не только в виде усредненных по времени величин, но также в виде турбулентных флуктуаций величин, возникающих вследствие производственного процесса, работы транспортных средств, процессов разрушения и рассеяния и оказывающих влияние на приземной слой.

Акустический анемометр-термометр состоит из решетки пар преобразователей (каждая пара состоит из ультразвукового излучателя и приемника, обычно расположенных друг относительно друга на расстоянии от 10 до 20 см) и электронного устройства измерения времени прохождения акустической волны от излучателя к приемнику. Трехмерная решетка позволяет определить горизонтальную и вертикальную составляющие скорости ветра, кроме того, по скорости звука может быть определена акустическая (виртуальная) температура окружающего воздуха. Ультразвуковую анемометрию используют для исследований атмосферы на протяжении нескольких десятилетий, но ее широкое внедрение в практику повседневных измерений (начиная от простейших измерений скорости и направления ветра) стало возможно только на основе последних достижений в технологии конструирования акустической аппаратуры и обработки сигналов, а также появления новых, более сложных математических моделей, описывающих явления в атмосфере. Поскольку в состав акустических анемометров не входят подвижные детали, они просты в обслуживании и имеют ряд преимуществ с точки зрения эксплуатации в неблагоприятных погодных условиях. Эти факторы стимулировали серийное производство ультразвуковых анемометров и подготовку проектов нескольких национальных стандартов, которые являются основой для разработки настоящего стандарта по характеристикам и методам испытаний акустических анемометров.

Методы, установленные настоящим стандартом, предназначены для использования при приемочных испытаниях акустических анемометров-термометров для измерения средней скорости ветра. Для соответствия настоящему стандарту обязательно проведение испытания в камере с нулевым потоком воздуха (раздел 7), испытания в аэродинамической трубе (раздел 8) и испытания в полевых условиях (раздел 10). Испытание в барокамере (раздел 9) проводят для акустических анемометров, предназначенных для использования на высоте выше 2000 м над уровнем моря.

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**Метеорология**

# АКУСТИЧЕСКИЕ АНЕМОМЕТРЫ-ТЕРМОМЕТРЫ

## Методы приемочных испытаний при измерениях средней скорости ветра

Meteorology. Sonic anemometers/thermometers.
Acceptance test methods for mean wind measurements

**Дата введения — 2010 — 12 — 01**

## 1 Область применения

Настоящий стандарт устанавливает методы испытаний для определения характеристик акустических анемометров-термометров (далее — анемометров), принцип действия которых основан на измерениях времени распространения звуковой волны при прохождении расстояния от излучателя до приемника и обратно.

Настоящий стандарт применяют при планировании измерений двух или трех компонентов вектора скорости в пределах полного (360°) азимутального угла.

## 2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие стандарты:

ИСО 5725-1 Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 1. Основные положения и определения (ISO 5725-1, Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results — Part 1: General principles and definitions)

ИСО 5725-2 Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 2. Основной метод определения повторяемости и воспроизводимости стандартного метода измерений (ISO 5725-2, Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results — Part 2: Basic method for the determination of repeatability and reproducibility of a standard measurement method)

ASTM D5741—96 Стандартный метод описания приземных ветров с использованием крыльчатого анемометра (ASTM D5741—96, Standard Practice for haracterizing Surface Wind Using a Wind Vane and Rotating Anemometer)

WMO CIMO, 1996 (Всемирная метеорологическая организация) Руководство по использованию метеорологических инструментов и методам наблюдения (WMO CIMO, 1996 World Meteorological Organization (ed.) Guide to meteorological instruments and methods of observation. WMO-No.8, 6th edn. 1996, Geneva)

## 3 Термины и определения

В настоящем стандарте применены следующие термины с соответствующими определениями:

3.1 **решетка** (array): Механическая конструкция, на которой размещают акустические преобразователи в заданной геометрической конфигурации.

3.2 **угол (вращательной) симметрии решетки** (array symmetry angle): Минимальный угол, при повороте на который решетка совмещается со своим первоначальным положением.

3.3 **среднее** (mean): Среднее значение для (выбранного) времени усреднения результатов измерений анемометром.

**Издание официальное**

3.4 **акустический анемометр-термометр;** анемометр (sonic, sonic anemometer/thermometer): Прибор, состоящий из решетки преобразователей, составленной из пар акустических излучателей и приемников, тактового генератора и микропроцессорной схемы для измерения интервалов времени от момента излучения до момента приема звукового импульса.

3.5 **путь акустического сигнала** (sound path): Путь между парой «излучатель — приемник».

3.6 **время задержки системы** (system delay): Разница между детектируемым электронным устройством полным временем прохождения сигнала и реальным временем прохождения.

Примечание — Время между электронной генерацией передаваемого сигнала и электронным детектированием полученного сигнала больше, чем время прохождения, из-за времени передачи сигнала через преобразователи и электронную цепь.

3.7 **время прохождения** (transit time): Время, необходимое для прохождения фронтом акустической волны пути акустического сигнала.

3.8 **интенсивность турбулентности** (Ндп. *уровень турбулентности*) $T_i$ (turbulence level, turbulence intensity): Отношение квадратного корня из кинетической энергии турбулентности к средней скорости ветра, вычисляемое по формуле

$$T_i = \frac{\sqrt{u'^2 + v'^2 + w'^2}}{\bar{U}_0}, \quad (1)$$

где знак «′» означает отклонение от среднего значения.

***Пример***

$u' = u - \bar{u}$, *и т. д.,*

*где* $u'$ *— мгновенная составляющая скорости ветра,*

$\bar{u}$ *— среднее значение составляющей скорости ветра.*

3.9 **смещение нуля** (zero offset): Значение скорости ветра по анемометру в стоячем воздухе.

## 4 Обозначения

В настоящем стандарте использованы следующие обозначения:

$T$ — температура, К;

$T_s$ — виртуальная акустическая температура, К [см. формулу (В.4)];

$T_i$ — интенсивность турбулентности;

$U_0$ — скорость ламинарного потока в аэродинамической трубе, скорость или скорость ветра, измеренная эталонным датчиком, м/с;

$U_a$ — скорость ветра (выходной сигнал анемометра) по азимуту *a,* м/с;

$U_b$ — скорость ветра (выходной сигнал анемометра) по азимуту *b,* м/с;

$U_{a,n}$ — значение $U_a$, м/с, при *n*-м измерении;

$U_v$ — векторное среднее $U_a$, м/с;

$U_s$ — скалярное среднее $U_a$, м/с;

$U_{max}$ — определенная изготовителем максимальная скорость ветра, которая может быть измерена данным анемометром, м/с;

$U_{min}$ — минимальная скорость ветра при испытании, м/с;

$Z$ — волновое сопротивление среды ($Z = \rho \cdot c$ [кг · м$^{-2}$ · с$^{-1}$]);

$a$ — азимут анемометра, в градусах;

$b$ — азимут анемометра, в градусах;

$c$ — скорость звука, м/с;

$d$ — длина пути, м;

$e$ — парциальное давление водяного пара, гПа;

$h$ — высота над уровнем моря, м;

$p$ — давление, гПа;

$p_e$ — эквивалентное давление, гПа, (см. таблицу D.1);

$t_a$ — время усреднения, с;

$t_+$ — время прохождения акустического сигнала от преобразователя+ до преобразователя–, с;

$t_-$ — время прохождения акустического сигнала от преобразователя– до преобразователя+, с;

$u_0$, $v_0$, $w_0$ — продольная, поперечная и вертикальная составляющие скорости ламинарного потока, м/с;

$u_a$, $v_a$, $w_a$ — выходной сигнал анемометра, соответствующий продольной, поперечной и вертикальной составляющим скорости ветра, м/с;

$u_{a,n}$, $v_{a,n}$, $w_{a,n}$ — значения $u_a$, $v_a$, $\omega_a$ при $n$-м измерении, м/с;

$v_d$ — продольная составляющая скорости ветра, м/с;

$v_n$ — поперечная составляющая скорости ветра, м/с;

$v_t$ — скорость ветра на пути прохождения звуковой волны ($v_t = \sqrt{v_n^2 + v_d^2}$);

$\alpha$ — направление ветра, определенное по выходному сигналу эталонного датчика, в градусах;

$\alpha_0$ — азимут невозмущенного потока по отношению к ориентации анемометра либо равный азимуту оси аэродинамической трубы относительно азимута анемометра, либо азимут, измеренный эталонным датчиком, в градусах;

$\alpha_a$ — направление ветра, определенное по выходному сигналу анемометра, в градусах, по отношению к азимуту анемометра $a$;

$\alpha_b$ — направление ветра, определенное по выходному сигналу анемометра, в градусах, по отношению к азимуту анемометра $b$;

$\alpha_{a,n}$ — значение $\alpha_a$ при $n$-м измерении;

$\alpha_V$ — векторное среднее $\alpha_a$, в градусах;

$\alpha_s$ — скалярное среднее $\alpha_a$, в градусах;

$\Delta_a$ — модуль векторной разности между измеренной скоростью ветра и скоростью невозмущенного потока в аэродинамической трубе при азимуте $\alpha$, м/с;

$\Delta_{a,b}$ — модуль векторной разности между векторами скорости ветра, определенными в камере с нулевым потоком воздуха, при азимутах анемометра $\alpha_a$ и $\alpha_b$, м/с;

$\Delta_{a,n,m}$ — модуль векторной разности между $n$-м и $m$-м значениями векторов скорости ветра, полученными в камере с нулевым потоком воздуха при азимуте анемометра $\alpha_a$;

$\varphi$ — угол склонения оси преобразователя по отношению к горизонтальному направлению потока воздуха в аэродинамической трубе, в градусах (положительному значению угла соответствует положение оси преобразователя, направленного против ветра, вверх над горизонтальной плоскостью, а отрицательному — вниз);

$\rho$ — плотность воздуха, кг/м$^3$;

$\Omega$ — угловая скорость вращения датчика по отношению к азимуту, в градусах в секунду.

## 5 Краткое описание методов

Перед проведением испытаний решетка анемометра должна быть осмотрена для выявления возможных повреждений и проверена на соответствие техническим требованиям, установленным изготовителем. Точность результатов измерений должна быть оценена и представлена в протоколе испытаний в соответствии с ИСО 5725-1 и ИСО 5725-2.

В ходе приемочных испытаний выполняют:

- испытание в камере с нулевым потоком воздуха — для определения смещения нуля анемометра в рабочем диапазоне температур;

- испытание в аэродинамической трубе — для определения отклонения результата измерений скорости (вектора) от истинного значения в рабочем диапазоне скоростей и направлений потока;

- испытание в барокамере — для определения рабочего диапазона плотности воздуха (хотя результаты измерений от плотности воздуха не зависят, но некоторая минимальная плотность воздуха необходима для прохождения детектируемого акустического сигнала);

- испытание в полевых условиях — для оценки влияния на работу анемометра потенциально неблагоприятных условий окружающей среды, трудно воспроизводимых в лаборатории.

## 6 Осмотр решетки перед проведением испытаний

Необходимо убедиться в том, что решетка ориентирована и отъюстирована надлежащим образом, на ней нет следов повреждений, и отсутствуют препятствия для прохождения ультразвукового сигнала.

Измеряют и указывают в протоколе испытаний расстояния между преобразователями в паре и сравнивают их с расстояниями, установленными изготовителем, с учетом допустимых отклонений (если эти данные содержатся в документации изготовителя). Если результаты измерений не попадают в границы допуска, то испытания прекращают.

## 7 Испытание в камере с нулевым потоком воздуха

### 7.1 Цель испытания

Целью испытания в камере с нулевым потоком воздуха является определение смещения нуля анемометра и выявления проблем, связанных с его юстировкой или градуировкой.

Время задержки системы складывается из времен прохождения сигнала через преобразователи и электронную цепь. Наличие во времени задержки системы несимметричной составляющей (когда разность между временами задержки при прохождении ультразвукового сигнала в противоположных направлениях не равна нулю) приводит к смещению нуля для соответствующей составляющей скорости ветра. Обычно смещение нуля в значительной мере исключается при текущей обработке сигнала, основанной на калибровке изготовителя. Однако смещение нуля может измениться со временем, а также быть зависимым от температуры. Смещение нуля определяют по результатам испытания решетки в камере с нулевым потоком воздуха (см. приложение А).

### 7.2 Методика испытаний

7.2.1 Получают от изготовителя технические характеристики камеры с нулевым потоком воздуха.

7.2.2 Помещают решетку в камеру с нулевым потоком воздуха и ожидают, пока не стабилизируются температура и движение воздуха внутри камеры. Убеждаются в том, что анемометр работает, но нагрев решетки не происходит, в противном случае его выключают.

7.2.3 Устанавливают время усреднения анемометра равным заданному (используемому при применении анемометра). Вентилятор в камере (при его наличии) должен быть выключен.

7.2.4 Снимают показания и регистрируют температуру, скорость и направление ветра или составляющие скорости ветра, измеренные анемометром: ($U_{a,n}\,\alpha_{a,n}$) или ($u_{a,n}\,v_{a,n}\,w_{a,n}$). Индекс *a* означает азимутальную ориентацию анемометра в камере с нулевым потоком воздуха, а индекс *n* — номер измерения.

7.2.5 Повторяют измерения по 7.2.4 не менее трех раз с интервалом 10 мин. Если для всех результатов измерений скорости потока воздуха получены значения смещения нуля в пределах установленных допусков, то считают, что анемометр прошел данное испытание. В протоколе испытаний указывают температуру в камере, поскольку от нее может зависеть смещение нуля. Если для одного или нескольких результатов измерений скорости потока воздуха получены значения смещения нуля, выходящие за пределы допуска, то анемометр бракуют, при условии, что в испытании была использована камера с нулевым потоком воздуха утвержденного типа.

7.2.6 Если в испытаниях использована камера с нулевым потоком воздуха неутвержденного типа и при этом для одного или нескольких результатов измерений скорости потока воздуха получены значения смещения нуля, выходящие за пределы допуска, то проверяют, не обусловлено ли это наличием некоторого остаточного движения воздуха в испытательной камере. Для этого вычисляют модуль векторных разностей по формуле

$$\Delta_{a,n,m} = \sqrt{(U_{a,n}\sin\alpha_{a,n} - U_{a,m}\sin\alpha_{a,m})^2 + (U_{a,n}\cos\alpha_{a,n} - U_{a,m}\cos\alpha_{a,m})^2}, \quad (2)$$

где $\Delta_{a,n,m}$ — модуль векторной разности между *n*-м и *m*-м значениями вектора скорости ветра при азимутальной ориентации анемометра *a*.

Если максимальное значение $\Delta_{a,n,m}$ составляет не более 10 % допустимого смещения нуля, то смещение стабильно во времени и движением воздуха можно пренебречь. Затем проверяют, не обусловлено ли смещение отражениями от стенок камеры. С этой целью поворачивают решетку в камере вдоль ее азимутальной оси на приблизительно половину угла ее симметрии (на 60° для решетки с углом симметрии 120°) и ожидают, пока не стабилизируется движение воздуха в камере. Снимают показания и регистрируют скорость и направление ветра: $U_b$, $\alpha_b$. Возможны следующие ситуации:

а) В отсутствие отражений от стенок смещение нуля не зависит от азимутальной ориентации решетки в камере (обозначенной индексами *a* и *b*). В этом случае модуль векторной разности $\Delta_{a,b}$, полученный по формуле

$$\Delta_{a,b} = \sqrt{(U_a\sin\alpha_a - U_b\sin\alpha_b)^2 + (U_a\cos\alpha_a - U_b\cos\alpha_b)^2}, \quad (3)$$

будет небольшим [не более 10 % $(U_a + U_b)/2$]. Таким образом, наблюдаемые смещения нуля являются реальными и не связаны с условиями испытаний. Считают, что анемометр не прошел данное испытание.

b) При наличии отражений от стенок смещение нуля зависит от азимутальной ориентации решетки в камере, а $\Delta_{a,\,b}$ является большим. В этом случае конструкцию камеры с нулевым потоком воздуха подвергают соответствующей модификации.

Если максимальное значение $\Delta_{a,\,n,\,m}$ [см. формула (2)] не является незначительным по сравнению с установленным для анемометра допуском на смещение нуля, то либо анемометр работает нестабильно, либо в испытательной камере имеет место слишком интенсивное движение воздуха. Принимают меры к тому, чтобы камера с нулевым потоком воздуха находилась в состоянии теплового равновесия.

7.2.7 Повторяют испытание по проверке смещения нуля при температурах, соответствующих верхней и нижней границам рабочего диапазона температур анемометра. Для этого необходима климатическая камера, вмещающая испытательную камеру с нулевым потоком воздуха и электронную цепь анемометра.

При проведении испытания при температуре, соответствующей нижней границе рабочего диапазона, учитывают следующее. Смещение нуля зависит не от температуры воздуха, а от температуры преобразователя и электронной цепи анемометра. Если анемометр снабжен системой подогрева преобразователя, которая обычно включается при низких температурах, то допустимая температура преобразователя может быть выше установленной минимальной температуры окружающей среды. Поскольку при проведении испытания в камере с нулевым потоком воздуха подогрев должен быть выключен, нижняя граница диапазона температур в климатической камере должна соответствовать наименьшему допустимому значению температуры преобразователя.

## 8 Испытание в аэродинамической трубе

### 8.1 Цель испытания

Целью испытания является определение отклонения результатов измерений, полученных с помощью испытываемого анемометра, от заданных значений скорости потока воздуха в аэродинамической трубе.

В идеальном случае функция отклика анемометра (для одной составляющей скорости ветра) может быть задана по формуле (В.2), но для реальной функции отклика будут иметь место отклонения от указанной зависимости. Эти отклонения включают в себя смещение нуля (см. раздел 7) и погрешности, обусловленные возмущениями потока и областями тени, которые могут быть количественно оценены на основе сравнения скорости и направления ветра, измеренных анемометром, со скоростью ветра и азимутальной ориентацией анемометра по отношению к оси потока в аэродинамической трубе соответственно. Обычно погрешности, обусловленные возмущениями потока и областями тени, уменьшают путем введения поправочных коэффициентов при обработке сигналов в режиме реального времени (см. приложение В).

Эти погрешности зависят от скорости, азимута и угла склонения $\varphi$ оси преобразователя по отношению к горизонтальному направлению потока. Поэтому для полного исследования необходимо провести очень большое число трудоемких измерений. При приемочных испытаниях применяют упрощенную процедуру, принимая во внимание тот факт, что максимальная и минимальная относительные погрешности обычно имеют место при приблизительно одних и тех же азимуте и высоте над уровнем моря в широком диапазоне значений скорости потока воздуха.

Минимальные требования к техническим характеристикам аэродинамической трубы, используемой при проведении приемочных испытаний, приведены в приложении С.

### 8.2 Предварительные измерения

В аэродинамических трубах с закрытыми испытательными секциями наличие отражений от стенок может привести к погрешностям измерений (см. раздел 7). Приведенную ниже процедуру проверки используют для количественной оценки погрешности, обусловленной отражениями. Предварительно анемометр должен успешно пройти испытание в камере с нулевым потоком воздуха. Выбор процедуры зависит от наименьшей скорости ветра, которую можно реализовать в аэродинамической трубе (остаточного движения воздуха, если аэродинамическая труба закрыта).

a) В аэродинамической трубе может быть создан поток воздуха со скоростью ниже уровня смещения нуля, допускаемого для анемометра.

В этом случае при минимальной скорости потока воздуха выполняют следующие действия:

1) Снимают показания и регистрируют скорость ветра $U_a$ при пяти значениях азимутального угла $\alpha_a$ анемометра в пределах половины угла симметрии решетки (например $\alpha_1 = 0°$, $\alpha_2 = 15°$, $\alpha_3 = 30°$, $\alpha_4 = 45°$, $\alpha_5 = 60°$ для решетки с углом симметрии 120°).

2) Если все значения $U_a$ равны или ниже допустимого значения смещения нуля, то погрешностями, обусловленными отражениями, можно пренебречь.

b) В аэродинамической трубе не может быть создан поток воздуха со скоростью ниже уровня смещения нуля, допускаемого для анемометра. В этом случае выполняют следующие действия:

1) В аэродинамической трубе создают поток воздуха с наименьшей возможной скоростью $U_0$ в заданном направлении.

2) Регистрируют результаты измерений скорости и направления ветра ($U_a$, $\alpha_a$) при пяти значениях азимутального угла $\alpha_a$ анемометра в пределах половины угла симметрии решетки.

3) Вычисляют модуль векторной разности между значениями скорости потока воздуха в аэродинамической трубе, измеренными с помощью анемометра и заданными по формуле

$$\Delta_a = \sqrt{(U_a \sin\alpha_a - U_0 \sin\alpha_0)^2 + (U_a \cos\alpha_a - U_0 \cos\alpha_0)^2}, \quad (4)$$

где $\Delta_a$ — сумма всех погрешностей, включая смещение нуля, возмущение потока и отражения.

4) Оценивают распределение $\Delta_a$ для всех пяти значений $\alpha_a$. Если разности составляют не более 10 % от среднего, то погрешностями, обусловленными отражением, можно пренебречь.

Примечание — Поскольку погрешности, обусловленные возмущением потока, увеличиваются при увеличении скорости ветра, процедура применима только при низких скоростях ветра, при которых, в соответствии с документацией изготовителя, погрешности, обусловленные возмущением потока, значительно ниже смещения нуля.

### 8.3 Методика испытаний

#### 8.3.1 Изменение направления ветра при фиксированной скорости

Погрешность скорости ветра $U_a$ и направления ветра $\alpha_a$ по отношению к истинным значениям определяют путем изменения ориентации анемометра по отношению к направлению потока воздуха при разных значениях скорости ветра в аэродинамической трубе. Решетку поворачивают с шагом не более 5° в пределах полного азимутального угла (360°). В каждом положении решетки сигнал усредняют на интервале времени не менее 30 с. Чтобы получить доверительный интервал для каждой точки по статистическому распределению результатов измерений, усреднение можно проводить после сбора всей информации (т. е. не в режиме реального времени). Для каждой ориентации решетки испытание проводят, по крайней мере, при пяти фиксированных значениях скорости во всем рабочем диапазоне от $U_{min}$ до $U_{max}$. Значения скорости выбирают таким образом, чтобы они были приблизительно равноудалены друг от друга в логарифмическом масштабе. Рекомендуемые значения скорости потока воздуха в аэродинамической трубе (в процентах $U_{max}$): 10 %; 18 %; 32 %; 56 %; 100 %.

Устанавливают заданную скорость потока воздуха в аэродинамической трубе с максимальной точностью, отклонение не должно превышать 10 % приведенных выше значений.

Анализируют результаты испытаний для определения наихудшей и наилучшей ориентации решетки (максимальное и минимальное смещение). Обычно эти ориентации не зависят от скорости потока воздуха.

Примечание — Обычно наихудшая и наилучшая ориентации будут разными в зависимости от того, какое систематическое смещение рассматривают: по скорости или по направлению потока воздуха. Для некоторых конструкций анемометров наихудшая ориентация в отношении измерения направления ветра совпадает с наилучшей ориентацией в отношении измерения скорости ветра и наоборот.

#### 8.3.2 Изменение скорости ветра при наихудшей и наилучшей ориентациях

Определяют зависимость систематической погрешности от скорости ветра путем изменения скорости потока в аэродинамической трубе при наихудшей и наилучшей ориентациях решетки анемометра. Если для разных диапазонов скорости потока воздуха были выявлены многократные наихудшие и наилучшие ориентации, то испытание выполняют в полном объеме для каждой из таких ориентаций. Результат измерений получают усреднением на интервале не менее 30 с. Чтобы получить доверительный интервал для каждой точки по статистическому распределению результатов измерений, усреднение можно проводить после сбора всей информации (т. е. не в режиме реального времени). Измерения проводят при десяти значениях скорости потока воздуха, выбранных таким образом, чтобы они были при-

близительно равноудаленными друг от друга в логарифмическом масштабе. При этом за $U_{min}$ принимают наименьшую скорость, при которой возможно поддержание стабильного потока воздуха в аэродинамической трубе. В качестве минимальной скорости потока воздуха выбирают 1 % $U_{max}$. Рекомендуемые значения скоростей потока воздуха в аэродинамической трубе (в процентах $U_{max}$): 1,0 %; 1,7 %; 2,8 %; 4,6 %; 7,7 %; 13 %; 21 %; 36 %; 60 %; 100 %.

Для некоторых аэродинамических труб значение 1 % $U_{max}$ может быть ниже $U_{min}$. В этом случае рекомендуемые значения скорости потока воздуха (в процентах $U_{max}$) будут следующими: 2,0 %; 3,0 %; 5,0 %; 7,0 %; 11 %; 18 %; 27 %; 42 %; 65 %; 100 %.

**8.3.3 Внеосевой сигнал**

Повторяют процедуры 8.3.1 и 8.3.2 при ориентации акустического измерителя под углами склонения $\varphi$, равными $\pm$ 15°.

Если анемометр предназначен для определения горизонтальных составляющих вектора скорости ветра, то результат измерений $U_a$ сравнивают с $U_0 \cos \varphi$.

Если анемометр предназначен для измерения вектора скорости ветра в трехмерной системе координат, то результат измерений $U_a$ сравнивают с $U_0$.

**8.3.4 Векторное усреднение**

Обычно система обработки сигнала анемометра для получения значения скорости ветра выполняет операцию так называемого «векторного усреднения», основанного на получении средних значений проекций вектора скорости ветра на оси прямоугольной системы координат по формуле

$$U_v = \sqrt{(\overline{u}_a)^2 + (\overline{v}_a)^2 + (\overline{w}_a)^2}, \quad \alpha_v = \text{arctg}\left(\frac{\pm \overline{v}_a}{\pm \overline{u}_a}\right), \tag{5}$$

где $u_a$ — измеренная продольная составляющая вектора скорости ветра. Положительный знак $u_a$ (при $v_a = 0$) соответствует $\alpha = 0°$;

$v_a$ — измеренная поперечная составляющая вектора скорости ветра (при $\alpha = 90°$ значение $v_a$ принято положительным, $u_a = 0$).

Угол, определяемый выражением $\text{arctg}\left(\frac{\pm y}{\pm x}\right)$, находят по таблице 1.

Таблица 1

| $y$ | $x$ | $\text{arctg}\left(\frac{\pm y}{\pm x}\right)$ | Диапазон значений функции $\text{arctg}\left(\frac{y}{x}\right)$, градус | |
|---|---|---|---|---|
| | | | от | до |
| $\geq 0$ | $\geq 0$ | $\text{arctg}\left(\frac{y}{x}\right)$ | 0 | $\leq 90$ |
| $\geq 0$ | $< 0$ | $180 - \text{arctg}\left(\frac{y}{x}\right)$ | $> 90$ | $\leq 180$ |
| $< 0$ | $< 0$ | $180 + \text{arctg}\left(\frac{y}{x}\right)$ | $> 180$ | $\leq 270$ |
| $< 0$ | $\geq 0$ | $360 - \text{arctg}\left(\frac{y}{x}\right)$ | $> 270$ | $\leq 360$ |

**8.3.5 Скалярное усреднение (необязательное)**

В некоторых случаях требуется имитация отклика крыльчатого анемометра, что соответствует вычислению так называемых «скалярных средних»:

$$U_s = \overline{\sqrt{u_a^2 + v_a^2 + w_a^2}}, \qquad \alpha_s = \overline{\text{arctg}\left(\frac{\pm v_a}{\pm u_a}\right)}. \tag{6}$$

Выполнение процедуры скалярного усреднения проверяют, вращая анемометр вокруг азимутальной оси с постоянной угловой скоростью $\Omega$ в течение интервала усреднения $t_a$. В этом случае измеренные скорости $U_v$ и $U_s$ будут различны: $U_s = U_a$, то есть скалярное среднее не зависит от $\alpha_0$, в то время как векторное среднее стремится к нулю с ростом $t_a$ в соответствии с формулой

$$U_v = \frac{\sin \Omega t_a}{\Omega t_a}. \quad (7)$$

Примечание — На практике эти равенства соблюдаются приближенно с учетом точности анемометра.

При определении направления ветра в случае скалярного усреднения возникает дополнительная проблема, известная как «проблема пересечения Севера». Частотное распределение направлений при пересечении Севера (т. е. при переходе от 360° к 0°) становится бимодальным. В этом случае перед усреднением распределение должно быть «склеено» в соответствующей точке по отношению к Северу, что может быть реализовано разными алгоритмами. Правильность алгоритма, реализованного в анемометре, проверяют, изменяя азимут анемометра от 355° до 5° во время интервала усреднения при симметричном азимутальном распределении по отношению к 0°. Простое усреднение по углу даст $\alpha_s$ = = 180°, в то время как при правильном алгоритме должно быть получено направление ветра $\alpha_s$ = 360° (в пределах значений точностных характеристик анемометра).

Примечание — Выполнение вышеописанной процедуры не позволяет получить полное доказательство того, что имитируется отклик крыльчатого анемометра. В описанных условиях испытаний результирующие направления $\alpha_v$ и $\alpha_s$ идентичны. Чтобы установить различия между $\alpha_v$ и $\alpha_s$, необходимо провести усреднение по разным азимутам $\alpha_0$ и скоростям ветра $U_0$.

## 9 Испытание в барокамере (необязательное)

### 9.1 Цель испытания

Измерение времени прохождения акустического сигнала осуществимо только в том случае, если значение принятого сигнала превышает порог обнаружения. Уровень принимаемого сигнала зависит от состояния слоя воздуха между излучателем и приемником, поскольку эффективность работы преобразователей зависит от того, насколько согласованы волновое сопротивление мембраны преобразователя и среды. Для большинства конструкций преобразователей эффективность передачи и приема приблизительно пропорциональна $Z = \rho \cdot c$, т. е. произведению плотности воздуха $\rho$ на скорость звука $c$. Поэтому общую эффективность, определяемую как отношение энергии принятых звуковых волн к энергии переданных, вычисляют как $Z^2 = (\rho \cdot c)^2$. Для обнаружения полезного сигнала на фоне неизбежных тепловых, электронных и акустических шумов необходим минимальный уровень эффективности. Волновое сопротивление воздуха $Z$ зависит от атмосферного давления, температуры и влажности. Ввиду естественной изменчивости этих параметров значение $Z^2$ может снижаться до 70 % своего среднего значения в данной местности (см. [1]), при этом $Z$ также уменьшается при увеличении высоты над уровнем моря. Точная функциональная зависимость $Z$ от высоты места обусловлена профилями температуры и влажности в реальных условиях. Поэтому максимальная рабочая высота над уровнем моря не постоянна и зависит от параметров состояния атмосферы. Тем не менее, для практического применения может быть определена стандартная максимальная рабочая высота над уровнем моря с использованием стандартной атмосферы[1)]. В таблице D.1 (приложения D) приведена зависимость волнового сопротивления среды и уменьшения эффективности от высоты над уровнем моря, полученная с использованием стандартной атмосферы.

Рабочий диапазон анемометра по волновому сопротивлению среды $Z$, или, что эквивалентно, максимальная рабочая высота над уровнем моря, могут быть определены с использованием барокамеры. В последней графе таблицы D.1 (приложения D) приведены значения давления при допущении об изотермическом расширении, постоянстве состава газовой смеси и свойств поверхностного слоя стандартной атмосферы, для которых получены значения волнового сопротивления, приведенные в соответствующих строках.

---

[1)] В настоящем стандарте «стандартная атмосфера — это U.S. Standard Atmosphere, т. е. стандартная атмосфера, используемая в США. В Российской Федерации действует ГОСТ 4401—81 Атмосфера стандартная. Параметры.

### 9.2 Аппаратура

Анемометр должен выдавать сообщение об ошибке, если уровень сигнала снижается ниже установленного порогового значения. Объем барокамеры должен быть достаточным, чтобы в нее поместилась решетка анемометра. В барокамере должно быть устройство контроля давления в установленном для анемометра диапазоне в пределах погрешности 10 гПа.

Если конструкцией анемометра не предусмотрено формирование сообщения, показывающего потерю принимаемого сигнала, то консультируются с изготовителем анемометра о способе, каким можно обнаружить потерю сигнала.

### 9.3 Методика испытаний

Для определения минимального эквивалентного давления $p_e$ используют данные таблицы D.1 (приложение D) и откачивают барокамеру соответствующим образом. Ожидают, пока температура воздуха в камере не придет в равновесие с температурой стенок камеры (обычно не более 1 мин). Проверяют, не выдает ли анемометр сообщение об ошибке.

Примечание — После быстрого расширения воздуха в камере его температура понижается (процесс адиабатического расширения), что при теплых стенках камеры приводит к появлению конвекционных потоков. В этой ситуации устройство автоматического контроля работы анемометра может ошибочно выдать сообщение о неисправности из-за слишком большой разницы результатов измерений скорости звука для разных путей звуковой волны.

## 10 Испытания в полевых условиях

### 10.1 Цель испытания

Лабораторные условия не позволяют провести приемочные испытания в необходимом объеме. Например, аэродинамическая труба не позволяет воспроизвести весь диапазон интенсивности и спектр атмосферной турбулентности. Исследования показывают, что погрешности, обусловленные возмущением потока и областями тени, в некоторой степени зависят от характеристик турбулентности потока. Различные виды осадков, например переохлажденный дождь, также являются примером погодных условий, которые сложно воспроизвести в лаборатории.

Большим недостатком испытаний в полевых условиях является то, что условиями испытаний невозможно управлять, что затрудняет обеспечение требуемой вариативности.

В настоящем разделе приведены только минимальные требования к условиям проведения полевых испытаний. Подробное руководство по проведению и оценке результатов полевых испытаний не входит в область применения настоящего стандарта.

### 10.2 Продолжительность испытания

Для анемометра, предназначенного для эксплуатации в необслуживаемом режиме работы в течение длительных периодов времени, полные приемочные полевые испытания должны быть проведены в условиях, представительных для всех времен года.

### 10.3 Место проведения испытаний

#### 10.3.1 Пространственная однородность

Место испытания должно соответствовать основным требованиям к месту размещения метеорологических наземных анемометров, как установлено в WMO CIMO № 8 и ASTM D 5741, чтобы обеспечить соответствующую степень однородности характеристик окружающей среды в месте испытания.

#### 10.3.2 Климат

Климат в месте размещения анемометра должен быть аналогичным климату в предполагаемых местах его применения. Важными составляющими климата являются:

- распределение скоростей и направлений ветра (роза ветров),
- распределение температур,
- распределение дождевых осадков,
- наличие осадков других типов,
- наличие и интенсивность обледенения.

### 10.4 Испытательное оборудование

#### 10.4.1 Эталонный датчик скорости ветра

Вблизи анемометра на той же высоте устанавливают один или несколько датчиков скорости ветра. Поскольку не существует эталонного датчика, который можно было бы использовать в различных

полевых испытаниях, выбирают датчики с известными метрологическими характеристиками, предпочтительно основанные на физическом принципе измерений, отличном от того, что использован в анемометре. Таким образом, можно ожидать что, по крайней мере, некоторые факторы состояния окружающей среды, которые считаются критическими для приемки анемометра, не будут оказывать столь же существенного влияния на характеристики эталонного датчика скорости ветра. Однако, из-за относительно высокой устойчивости анемометра к изменению условий среды, существует высокая вероятность того, что эталонный датчик скорости ветра потеряет свои функциональные качества, в то время как анемометр будет продолжать работать. Данную ситуацию легко обнаружить, установив на месте испытания еще один анемометр.

Примечание — Диапазон условий применения механических датчиков скорости ветра, используемых в качестве эталонных датчиков, может не охватывать весь диапазон условий применения анемометра. Поэтому для некоторых условий испытаний сравнение с таким датчиком может оказаться невозможным.

Если в качестве эталонного используется другой анемометр, то он должен иметь большой угол приема и вносить минимальные искажения в потоки воздуха на месте испытаний (см. [2], [3]).

Выбранное расстояние между анемометром и эталонным датчиком в горизонтальной плоскости представляет собой компромисс между двумя взаимоисключающими требованиями. Расстояние должно быть:

- большим, чтобы избежать взаимного влияния из-за преграждения потока,
- минимальным, чтобы на расхождение в результатах измерений не оказывала влияние пространственная неоднородность потока воздуха.

Как правило, минимальное расстояние между датчиками должно быть в десять раз больше внешнего диаметра механического датчика. Максимальное расстояние должно быть 10 м. Линия, соединяющая оси датчиков, должна быть перпендикулярна преобладающему направлению ветра. Если применяют несколько эталонных датчиков, то их следует размещать на одной линии, чтобы максимально уменьшить сектор ветра для исключения его из оценки.

**10.4.2 Вспомогательные датчики**

Вспомогательные датчики используют для измерения параметров окружающей среды, знание которых важно при проведении приемочных испытаний, а также датчики, позволяющие измерить, по крайней мере, те параметры, которые приведены в 10.3.2. Вспомогательные датчики устанавливают с учетом основных требований к месту размещения метеорологических наземных анемометров, как установлено в WMO CIMO № 8 и ASTM D 5741.

**10.5 Оценка результатов испытаний**

**10.5.1 Неисправности**

В протоколе испытаний описывают природу возникшего повреждения или неисправности, частоту его появления и обстоятельства, которые могут стать причиной повреждения или неисправности.

**10.5.2 Автоматический контроль работоспособности анемометра**

Если устройство, реализующее алгоритмы автоматического контроля работоспособности анемометра, выдает коды обнаруженных ошибок, то эти ошибки относят к соответствующим классам.

Обнаруженные недостоверные результаты измерений соотносят с условиями окружающей среды (см. 10.3.2), при которых эти результаты были получены. Таким образом могут быть выявлены нежелательные условия применения анемометра.

**10.5.3 Оценка расхождения результатов измерений скорости и направления ветра**

a) Результаты испытаний распределяют по группам в соответствии с параметрами окружающей среды (включая все виды осадков) и по группам в зависимости от скорости ветра, которые определяют границы диапазона, представляющего интерес для пользователя.

b) Вычисляют относительные разности для скоростей и направлений ветра для каждого класса. Классы, в которые были включены направления ветра, отклоняющиеся от линии, соединяющей датчики, в пределах $\pm 60°$, исключают из рассмотрения; классы, содержащие менее 100 пар результатов измерений, также исключают из оценки.

c) Вычисляют среднюю систематическую погрешность, стандартное отклонение и прецизионность для всех оставшихся групп.

Примечание — Для скоростей ветра не более 5 м/с принято использовать абсолютные разности, а для скоростей ветра не менее 5 м/с — относительные.

Если средняя систематическая погрешность меньше систематической погрешности, установленной для анемометра, то считают, что анемометр успешно прошел испытание.

**10.5.4 Влияние неоднородности ветрового поля на результат измерения скорости ветра**

Если средняя систематическая погрешность выходит за границы систематической погрешности, установленные для анемометра, необходимо убедиться в том, что расхождения в результатах измерений не связаны с пространственной неоднородностью поля ветра. Это может быть проверено двумя способами.

a) Строят зависимость средних разностей для скорости и направления ветра от $\alpha$. Сравнивают вид этой зависимости с зависимостью, полученной в аэродинамической трубе. Если они подобны, то систематическая погрешность, вероятно, обусловлена функцией отклика самого анемометра.

b) Повторяют испытание в полевых условиях, как описано в 10.5.3, предварительно поменяв месторасположение анемометра и эталонного датчика. Снова строят зависимость средних разностей для скорости и направления ветра от $\alpha$ и сравнивают старую зависимость с новой. Если они подобны, то отклики датчиков различны. Если они подобны, но имеют разные знаки, то ветровое поле неоднородно.

Рассматривают влияние временной и пространственной неоднородности на разность показаний анемометров по скорости и направлению ветра.

**Приложение А**
**(справочное)**

## Камера с нулевым потоком воздуха

### А.1 Оборудование

Камера с объемом, достаточным для размещения в ней решетки и температурного зонда.

Внутренняя поверхность камеры должна быть сделана из звукопоглощающего материала для сведения к минимуму отражений. В больших камерах рекомендуется использовать вентилятор, чтобы обеспечить перед проведением испытания установление теплового равновесия и предотвратить движение воздуха, обусловленное выталкивающей силой.

### А.2 Влияние отражения

Смещение нуля, измеренное в камере, может быть частично обусловлено отражениями акустического сигнала от стенок. Такой эффект отсутствует при работе анемометра на открытом воздухе. Поэтому погрешности, обусловленные отражениями, должны быть исключены из оценки результатов испытаний. Интенсивность и время запаздывания отраженных сигналов зависят от положения отражающих объектов по отношению к решетке преобразователей. Если отраженные сигналы являются достаточно интенсивными, чтобы существенно повлиять на прямой сигнал, то степень влияния отражений будет зависеть от положения решетки преобразователей по отношению к потенциально отражающим объектам. Такая зависимость позволяет идентифицировать отражающие эффекты при изменении положения решетки преобразователей в камере. Отражающие эффекты останутся практически идентичными при азимутальном вращении вокруг угла симметрии решетки. Следует ожидать, что влияние отражений будет наиболее заметным при вращении решетки на половину угла симметрии.

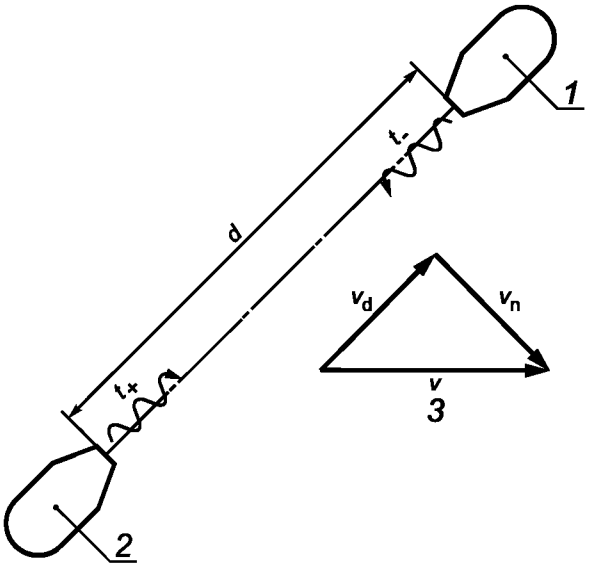
**Приложение В**
**(справочное)**

## Измерение скорости ветра анемометрами

### В.1 Принцип измерений

Скорость распространения звуковых волн в атмосфере определяется скоростью звука в среде *c*, а также продольной ($v_d$) и поперечной ($v_n$) составляющими скорости ветра. Время прохождения звуковых волн между двумя точками, находящимися на расстоянии *d*, вычисляют по формуле (см. также рисунок В.1) [4]

$$t_{\pm} = \frac{d}{\sqrt{c^2 - v_n^2} \pm v_d}. \qquad (B.1)$$




*1* — преобразователь–; *2* — преобразователь+; *3* — составляющие скорости ветра

Рисунок В.1 — Принцип работы анемометра

Продольную составляющую скорости ветра вычисляют по разнице обратных величин: времени прохождения акустических волновых фронтов от преобразователя+ до преобразователя– ($t_+$) и от преобразователя– до преобразователя+ ($t_-$) (см. ([5], [6]) по формуле

$$v_d = \frac{d}{2}\left[\frac{1}{t_+} - \frac{1}{t_-}\right]. \qquad (B.2)$$

Длина пути звуковой волны *d* обычно находится в интервале от 10 до 20 см. В трехмерном анемометре реализовано измерение трех некомпланарных составляющих скорости ветра $v_{d1}$, $v_{d2}$, $v_{d3}$, по которым может быть получен вектор скорости ветра в любой требуемой системе координат. Для измерения средней скорости ветра в горизонтальной плоскости, которая рассмотрена в настоящем стандарте, используют также двухкомпонентные анемометры (см. В.2.2). Однокомпонентные анемометры используют только в особых случаях.

Примечание — По сумме времен прохождения акустического сигнала $t_+$ и $t_-$ и поперечной к направлению распространения звука составляющей скорости $v_n$ может быть также вычислена скорость звука *c* по формуле

$$c^2 = \left[\frac{d}{2}\left(\frac{1}{t_+} + \frac{1}{t_-}\right)\right]^2 + v_n^2. \qquad (B.3)$$

На основе полученного значения $c$ можно определить так называемую виртуальную акустическую температуру $T_s$ [12]:

$$c^2 = 403T_s = 403T(1 + 0{,}32e/p) \quad (B.4)$$

$$T_s = T(1+ 0{,}32e/p) = c^2/403 \quad (B.5)$$

Этот метод не рекомендуется использовать для определения средней температуры из-за его невысокой точности. Тем не менее, измерение флуктуаций виртуальной акустической температуры имеет большое практическое значение в различных приложениях, связанных с оценкой качества воздуха.

### B.2 Типы анемометров

#### B.2.1 История развития конструктивных решений

##### B.2.1.1 Методы модуляции

В первых анемометрах время прохождения вычислялось на основе сдвига фазы между непрерывными излученными и принятыми сигналами (см. [7, 8]). В настоящее время этот метод не используют из-за чувствительности приемника к сигналам, приходящим не только от излучателя, но также от близко расположенных отражающих объектов.

В современных анемометрах используются импульсно-модулированные акустические сигналы. Обычно время прохождения определяется либо огибающей фронт акустического сигнала, либо, чтобы увеличить точность, фазой носителя.

Первые анемометры, работающие на принципе модуляции, не определяли времена прохождения акустического сигнала в обоих направлениях по отдельности, а только разность этих времен (см. [9, 10]). Их недостатком являлась зависимость измеренной скорости ветра от температуры и влажности окружающего воздуха.

##### B.2.1.2 Бистатические и моностатические преобразователи

Большинство анемометров являлись «бистатическими» системами, т. е. системами с разнесенными передатчиком и приемником. Дополнительным недостатком такого конструктивного решения был разброс времени задержки преобразователей (например, из-за загрязнения их поверхности), приводящий к существенной систематической погрешности измерения скорости ветра.

С внедрением систем, позволяющих измерять все времена прохождения, появилась возможность исключить влияние на результаты измерений скорости ветра, температуры и влажности воздуха (см. [5], [6]). Дальнейшим усовершенствованием было использование универсальных преобразователей, пригодных как для приема, так и для передачи акустических импульсов. В таких «моностатических» системах влияние загрязнения поверхностей преобразователей на измерения скорости ветра значительно компенсировалось на прямом и обратном пути акустического импульса благодаря обратимости функции передачи для передатчика и приемника. Вследствие этого моностатические системы сохраняют стабильность применительно к измерению скорости ветра в течение более длительного промежутка времени. Указанный принцип компенсации не действует при измерении температуры, которое остается чувствительным к времени задержки системы. Несмотря на это возможность получения информации о флуктуациях температуры из-за турбулентности имеет большое практическое значение [12].

#### B.2.2 Геометрия решетки преобразователей

В настоящем стандарте рассмотрены измерения горизонтальной составляющей скорости ветра. В принципе для такого измерения достаточно иметь два пути распространения акустического сигнала. При этом для каждого пути результаты измерений $v_d$, вычисляемой по формуле (B.2), будут строго зависеть от косинуса угла между направлением ветра и направлением пути измерения. В действительности же преобразователи и устройства их крепления представляют собой препятствия на пути потока воздуха, вызывающие возмущения потока и наличие областей тени, что приводит к соответствующим отклонениям зависимости от идеальной косинусоиды. Ослабление скорости зависит от диаметра преобразователя и его конструкции. Наибольшая систематическая погрешность будет наблюдаться, когда направление ветра совпадает с путем распространения акустического сигнала, т. е. когда весь путь находится в тени наветренного преобразователя. В этом случае ослабление скорости может составлять до 20 % (см. [11]). С целью минимизации такой погрешности, связанной с искажениями потока и областями тени, используют различные конфигурации решеток с датчиками. Чтобы повысить точность измерений, число путей распространения акустического сигнала должно быть более двух, поэтому современные анемометры имеют не менее трех пар преобразователей акустического сигнала в горизонтальной плоскости. Такая избыточность пар преобразователей позволяет выбирать пути распространения акустического сигнала с учетом направления ветра. Основная цель состоит в том, что эти пути распространения акустического сигнала, ориентированные в пределах малого телесного угла по отношению к направлению скорости ветра, могут быть исключены из оценки. Зачастую в условиях естественного потока воздуха нельзя пренебречь вертикальной составляющей ветра. Даже если измерение этой составляющей не связано непосредственно с целевым применением, ее знание позволяет ввести поправки для учета погрешностей, обусловленных возмущением потока и областями тени. По этой причине используются другие конструкции, у которых пути распространения акустического сигнала лежат в трехмерном пространстве, что позволяет установить однозначную зависимость между вектором скорости ветра в трехмерном измерении и выходным сигналом анемометра.

### В.3 Обработка сигнала в реальном масштабе времени

#### В.3.1 Основные функции

В состав анемометров, предназначенных для оперативного применения, входит цифровой процессор, позволяющий реализовать следующие типичные операции по обработке сигнала:

a) вводить поправки на задержку системы для каждого пути распространения акустического сигнала и каждой ориентации анемометра, сохраняемые в памяти анемометра;

b) вычислять составляющую скорости ветра, параллельную пути распространения акустического сигнала, по формуле (В.2);

c) вычислять вектор скорости ветра в декартовых или полярных координатах;

d) выбирать пути распространения акустического сигнала, для которых возмущения потока минимальны, если имеются избыточные пути;

e) проецировать вектор скорости ветра на горизонтальную плоскость (в случае трехмерной решетки);

f) усреднять значения составляющих скорости ветра в декартовых координатах («векторное усреднение») или полярных координатах («скалярное усреднение»);

g) представлять среднюю скорость ветра в различных форматах (числовом и аналоговом);

h) пересчитывать значения составляющих скорости вектора в заданные системы координат.

#### В.3.2 Дополнительные функции

##### В.3.2.1 Общие положения

Современные устройства обработки сигнала предлагают практически неограниченные возможности по расширению набора основных функций, поэтому настоящий подраздел не охватывает информацию по всем доступным функциональным возможностям, число которых быстро увеличивается. В нем рассмотрен только небольшой перечень наиболее часто применяемых функций.

##### В.3.2.2 Азимутальная поправка

Автоматически вводимая азимутальная поправка избавляет от необходимости осуществлять настройку точно на Север. Параметры механической настройки сохраняются в памяти анемометра и учитываются при определении направления ветра так, что направление ветра всегда указывается относительно истинного Севера.

##### В.3.2.3 Автоматический контроль качества

Анемометр выдает сообщение об ошибке в том случае, если:

- получаемый сигнал по одному или нескольким путям распространения ниже предела обнаружения. Это может происходить время от времени, например из-за крупных препятствий на пути акустического сигнала (таких как птицы), или регулярно, например из-за неисправности преобразователя;
- разность значений скорости звука, вычисленных по формуле (В.3) для разных путей распространения акустического сигнала, превышает некоторое пороговое значение. Это может происходить время от времени, например из-за небольших препятствий (таких как насекомые, капли дождя, снежинки) на одном или нескольких путях распространения акустического сигнала, или регулярно из-за изменения длины пути распространения акустического сигнала (механическое повреждение анемометра).

##### В.3.2.4 Введение поправок на возмущение потока

Возмущения потока могут быть учтены с использованием функций корректировки или таблиц, полученных в процессе калибровочных измерений в аэродинамической трубе. Входной переменной для этих функций предпочтительно должно быть неисправленное значение вектора скорости ветра в трехмерной системе координат, поскольку поправка обычно зависит от значений всех трех составляющих вектора скорости ветра.

Поскольку возмущение потока воздуха в естественном турбулентном режиме может отличаться от создаваемого в аэродинамической трубе, практическая применимость таких поправок ограничена. Поэтому значение поправки не должно быть намного больше установленной погрешности анемометра. Если предусмотрена функция введения поправки, то должна быть также предусмотрена возможность ее выключения.

Примечание — Возмущение потока состоит в отклонении его препятствием, область тени — это зона волнового следа, создаваемого препятствием, находящимся в потоке. При испытаниях в аэродинамической трубе получают результат, который является суммарным, включающим как влияние возмущения потока, так и наличие области тени преобразователя.

**Приложение С**
**(нормативное)**

## Аэродинамическая труба

### С.1 Размеры испытательной секции

Испытательная секция должна быть достаточно большой, чтобы вместить решетку, ориентированную по всем требуемым углам. Проекция решетки преобразователей вместе с поддерживающей ее аппаратурой должна составлять не более 5 % площади поперечного сечения испытательной секции аэродинамической трубы.

Желательно, чтобы площадь, занимаемая анемометром, составляла не более 5 %, а лучше 1 % площади поперечного сечения испытательной секции аэродинамической трубы.

Примечание — Для градуировки анемометра во всем диапазоне рабочих характеристик может потребоваться использование двух аэродинамических труб, поскольку в некоторых аэродинамических трубах, предназначенных для проведения испытаний при высоких скоростях, может наблюдаться повышенный уровень турбулентности ($T_i$) при более низких скоростях воздуха. Если скорость ветра составляет не более 2 м/с, то допускается блокирование потока на 10 %.

### С.2 Область значений скорости ветра

Скорость ветра в аэродинамической трубе должна регулироваться, чтобы можно было получить поток воздуха, соответствующий всему диапазону испытываемого анемометра (предпочтительно от $0{,}01U_{max}$ до $U_{max}$, но, по крайней мере, от $0{,}02U_{max}$ до $U_{max}$). Регулировка скорости ветра должна обеспечивать ее поддержание с отклонением в пределах ± 0,2 м/с, предпочтительно в пределах ± 0,1 м/с.

### С.3 Градуировка

Создаваемая скорость потока воздуха в аэродинамической трубе должна быть подтверждена на основе сопоставления с эталоном сравнения либо эталоном национального метрологического института, полученным с использованием фундаментального физического метода. Скорости не более 2 м/с должны быть подтверждены с помощью чувствительного анемометра или с использованием соответствующих методик, таких как определение времени распространения клубов дыма, мыльных пузырей или потоков тепла между двумя точками, находящимися на известном расстоянии друг от друга. По результатам таких испытаний для скорости ветра 2 м/с и менее должны быть установлены значения частоты вращения воздуходувного устройства аэродинамической трубы или другого показателя, относящегося к методу контроля скорости потока воздуха.

### С.4 Характеристики

Поток воздуха должен быть как можно более однородным, а уровень турбулентности в испытательной секции должен составлять не более 1 %.

Локальные отклонения скорости потока должны составлять не более 1 % среднего значения. Уровень турбулентности должен быть известен.

### С.5 Вращательное устройство

Вращательное устройство устанавливают под испытательной секцией для удержания решетки преобразователей анемометра в различных положениях, соответствующих его ориентациям под разными углами вплоть до 360°. Минимальные требования к вращательному устройству:

- определяются требованиями к испытываемому анемометру;
- угол склонения ± 15°;
- угловое разрешение 1°;
- предельно допустимые отклонения при повторной установке угла ± 0,5°.

Устройство для удержания решетки под выбранными углами не должно вызывать возмущение профиля скорости ветра в испытательной секции или изменение уровня турбулентности.

**Приложение D**
**(справочное)**

## Зависимость волнового сопротивления воздуха от высоты над уровнем моря

В таблице D.1 приведена стандартная зависимость волнового сопротивления среды от высоты над уровнем моря. Также в таблице приведено эквивалентное давление, т. е. давление, возникающее при изотермическом расширении, для создания волнового сопротивления среды в стандартной атмосфере при заданной высоте над уровнем моря.

В первых трех графах таблицы приведены значения, соответствующие полученным в стандартной атмосфере по данным США. Значения в графах 4 и 5 вычислены по значениям, приведенным в графах 2 и 3. В графе 6 приведены значения эквивалентного давления $p_e$, которые соответствуют значениям $Z$ в той же строке, если воздух изотермически расширяется, начиная со значений на земной поверхности в условиях стандартной атмосферы. Таким образом, $p_e$ представляет собой давление, при котором в напорной камере наблюдается волновое сопротивление среды $Z$ такое же, как и $Z$, ожидаемое при высоте над уровнем моря $h$ в стандартной атмосфере.

Примечание — Зависимость эквивалентного давления от высоты над уровнем моря, приведенная в таблице D.1, отличается от зависимости давления от высоты над уровнем моря в атмосфере, поскольку температура и содержание водяных паров в атмосфере также зависят от высоты.

Таблица D.1 — Зависимость параметров стандартной атмосферы (графы 1—5) и эквивалентного давления (графа 6) от высоты над уровнем моря

| $h$, м | $\rho$, кг · м$^{-3}$ | $c$, м · с$^{-1}$ | $Z$, кг · м$^{-2}$ · с$^{-1}$ | $Z^2/Z_0^2$ | $p_e$, гПа |
|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 1,225 | 340,29 | 416,86 | 1 | 1013,25 |
| 1000 | 1,112 | 336,44 | 374,12 | 0,805 | 909,36 |
| 2000 | 1,007 | 332,53 | 334,86 | 0,645 | 813,94 |
| 3000 | 0,9091 | 328,58 | 298,71 | 0,513 | 726,07 |
| 4000 | 0,8191 | 324,59 | 265,87 | 0,407 | 646,24 |
| 5000 | 0,7361 | 320,54 | 235,92 | 0,320 | 573,44 |

**Приложение ДА**
**(справочное)**

## Сведения о соответствии ссылочных международных стандартов ссылочным национальным стандартам Российской Федерации

Таблица ДА.1

| Обозначение ссылочного международного стандарта | Степень соответствия | Обозначение и наименование соответствующего национального стандарта |
|---|---|---|
| ИСО 5725-1 | IDT | ГОСТ Р ИСО 5725-1—2002 Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 1. Основные положения и определения |
| ИСО 5725-2 | IDT | ГОСТ Р ИСО 5725-2—2002 Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 2. Основной метод определения повторяемости и воспроизводимости стандартного метода измерений |
| Примечание — В настоящей таблице использовано следующее условное обозначение степени соответствия стандартов:<br>- IDT — идентичные стандарты. | | |

## Библиография


[1] Visher, S. S., 1954: Climatic Atlas of the United States, Harvard University Press, Cambridge USA, 403 pp

[2] Zhang, S. F., J.C. Wyngaard, J.A. Businger and S. P.Oncley, 1986: Response characteristics of the U. W. sonic anemometer, J. Atmos. Oceanic Technol., 3, 315—323

[3] Foken, T. and S. Oncley, 1995: Workshop on Instrumental and Methodical Problems of Land Surface Flux Measurements, Bull. Am. Meteorol. Soc., 67, 1191—1193

[4] Schotland, R. M., 1955: The measurement of wind velocity by sonic means, J. Meteor., 12, 386—390

[5] Hanafusa, T., Y. Kobori and Y. Mitsuta, 1980: Single-head sonic anemometer-thermometer, BAO-report 2, 7—13

[6] Hanafusa, T., T. Fujitani, Y. Kobori and Y. Mitsuta, 1982: A new type of sonic anemometer-thermometer for field operation, Papers in Meteor. and Geophys., 33, 1—19

[7] Bovsheverov, M.V. and V. P. Voronov, 1960: Akustitscheskij fljuger., Izv. AN SSSR, ser. geofiz. No. 6, 882—885

[8] Kaimal, J.C. and J.A. Businger, 1963: A continuous wave sonic anemometer-thermometer, J. Appl. Meteorol., 2, 156—164

[9] Mitsuta, Y., 1966: Sonic anemometer-thermometer for general use. Meteor. Soc. Japan, Ser. II, 44,12—24

[10] Kaimal, J. C., J.T Newman, A. Beiberg and K. Cote, 1974: An improved three-component sonic anemometer for investigation of atmospheric turbulence. In Dowdell, R.B. (ed.): Flow: Its measurement and control in science and industry Vol. 1, Proc. of a Symp., 10—14 May 1971, Pittsburgh Pa., Instrument Soc. Of America, Pittsburgh (1974), 349—359

[11] Wyngaard, J.C.and S.F. Zhang, 1985: Transducer shadow effects on turbulence spectra measured by sonic anemometers, J. Atmos. Oceanic Technol., 2, 548—558

[12] Kaimal, J.C. and J.E. Gaynor, 1991: Another look at sonic thermometry, Boundary Layer Meteorol., 56, 410—410

[13] Sturgeon, M., A Wind Tunnel Acceptance Test Method for Sonic Anemometers, 15th International Conference on Interactive Information and Processing Systems (IIPS) for Meteorology, Oceanography and Hydrology at the 79th annual meeting of the American Meteorological Society at Dallas Texas on January 12, 1999

[14] ASTM D 5096:1996 Standard Test Method for Determining the Performance of a Cup Anemometer or Propeller Anemometer

[15] ASTM D5527:1994 Standard Practises for Measuring Surface Wind and Temperature by Acoustic Means

[16] ASTM D6011:1996 Standard Test Method for Determining the Performance of a Sonic Anemometer/Thermometer

[17] U.S. Standard Atmosphere, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 1976

[18] VDI 3786-2:2000 Environmental meteorology — Meteorological measurements concerning questions of air pollution — Wind

[19] VDI 3786-12:1994 Meteorological Measurements — Turbulence measurements with sonic anemometers

УДК 551.508.5:504.3:006.354 ОКС 07.060 Т58

Ключевые слова: метеорология, анемометры, испытания, методы, характеристики, скорость ветра

Редактор *Б.Н. Колесов*
Технический редактор *Н.С. Гришанова*
Корректор *В.Е. Нестерова*
Компьютерная верстка *В.И. Грищенко*

Сдано в набор 25.10.2010. Подписано в печать 13.11.2010. Формат 60x84 1/8. Бумага офсетная. Гарнитура Ариал. Печать офсетная. Усл. печ. л. 2,79. Уч.-изд. л. 2,20. Тираж 91 экз. Зак. 915.

ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ», 123995 Москва, Гранатный пер., 4.
www.gostinfo.ru info@gostinfo.ru
Набрано во ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ» на ПЭВМ.
Отпечатано в филиале ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ» — тип. «Московский печатник», 105062 Москва, Лялин пер., 6.