

Источники погрешностей при ультразвуковых измерениях метеовеличин в атмосфере, методы и алгоритмы их минимизации на основе опыта создания промышленной метеостанции АМК–03

А.Я. Богушевич*

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской Академии наук (ИМКЭС СО РАН), Россия, 634055, Томск, Академический пр., 10/3

(Статья поступила 20.11.2014; Подписана в печать 10.12.2014)

Рассматриваются источники погрешностей при ультразвуковых измерениях метеорологических величин в атмосфере: методические, связанные с физикой распространения ультразвука в атмосфере; радиотехнические, возникающие при регистрации и аппаратурной обработке электрических сигналов, механические, обусловленные влиянием конструкции прибора на обтекание его ветровым потоком и за счет ее температурных изменений и другие. Приводятся математические алгоритмы и методики, позволяющие существенно минимизировать погрешности измерений. Представленные материалы иллюстрируются материалами из опыта разработки промышленной метеостанции АМК–03.

РАС: 43.28.Vd УДК:534.6.08

Ключевые слова: ультразвуковые метеостанции, метеорологические величины, алгоритмы ультразвуковых измерений, погрешности измерений.

ВВЕДЕНИЕ

Ультразвуковые термоанемометры и автоматические метеостанции на их основе имеют широкое применение в метеорологии, экологии, военной технике, а также в научных исследованиях физических процессов в атмосферном приземном слое [1–3]. Подобные приборы в настоящее время выпускаются многими зарубежными фирмами [2, 3]: Applied Technologies (США), Climatronics Corporation (США), Gill Instruments Ltd. (Великобритания), Vaisala (Финляндия), Metek (ФРГ), и др.. В ИМКЭС СО РАН на протяжении 20 лет также выполняются работы по созданию и развитию подобных ультразвуковых метеостанций, имеющих с 2002 г. общее для всех модификаций наименование АМК–03. С 2006 г. предприятием ООО «Сибналитприбор» (г. Томск) выполняется их промышленное серийное изготовление.

В данной работе, используя опыт участия в разработке этих метеостанций, сделана попытка систематизировать материалы, относящиеся к обеспечению требуемых погрешностей при ультразвуковых измерениях метеорологических величин в атмосфере. Также приводятся упрощенные инженерные формулы для численных оценок этих погрешностей.

1. ТЕХНИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ О МЕТЕОСТАНЦИЯХ СЕРИИ АМК–03

В метеостанциях АМК–03 [4–8] основным измерительным блоком является ультразвуковой термоанемо-

метр. Для всех разработанных модификаций этого блока (ДСВ–15, ДСВ–16, ДСВ–17, УГИ и УГИ–Б) его конструкция представляет собой сферу из двух ортогональных трубчатых (для пропускания сигнальных проводов) колец из нержавеющей стали диаметром 20 см, на которых закреплены 8 идентичных ультразвуковых датчиков, изготавливаемых из пьезокерамических преобразователей и закрываемых в металлический корпус (рис. 1). Датчики образуют 4 пары излучатель–приемник ультразвука, размещенных в вершинах квадратов, соединительная линия между которыми наклонена под углом в 45° к вертикальной оси прибора. Сфера из колец закреплена на цилиндрическом металлическом корпусе (диаметром 4 см; длиной 10 см), внутри которого размещаются две электронные платы.

Термоанемометры из состава АМК–03 обладают высокой механической прочностью: допускают вибрационные воздействия с пиковым ускорением до 20 g при их длительности до 10 мс или удар о бетонный пол при падении с высоты 1 м. Термоанемометры работают как импульсное устройство с несущей частотой ультразвуковых волн, близкой к 100 кГц; частота выдачи информационных пакетов (с цифровыми данными измерений в стандарте RS–485) предлагается на выбор из 10, 20, 40 или 80 Гц (но может быть и другой до 160 Гц). Линейный размер пространственной области измерений примерно равен 14 см; время измерений одного пакета данных (инерционность измерений) — около 2 мс; пороговая чувствительность к изменениям скорости ветра и температуры воздуха составляет порядка 0,01 м/с или °С — соответственно. Масса блока термоанемометра — не более 1,4 кг при потреблении тока не более 160 мА от сети постоянного напряжения 9–36 В. В термоанемометр встраиваются датчики и системы, расширяющие его функциональные возможности (см. рис. 1б): емкостной датчик относительной

*E-mail: bay@imces.ru



Рис. 1: Измерительный блок ультразвуковой метеостанции АМК–03: а — внешний вид ультразвукового термоанемометра в модификации ДСВ–15; б — геометрическая схема ультразвуковых измерений; в — структурная схема блока

влажности воздуха (НН–4602–С); пьезорезистивный датчик атмосферного давления (МРХА4115АС6U); система определения азимутальной ориентации относительно направления на север и отклонения от направления вектора силы тяжести (используется двухосевой акселерометр ADXL202AE); система подогрева при температурах окружающего воздуха ниже минус 50 °С.

Информационные пакеты с первичными данными измерений термоанемометра могут обрабатываться либо в автономном пульте (в блоках ППУ–25, ППУ–26, ВиИ или ВиИ–Б) с выводом вычисленных средних значений метеорологических величин на его дисплей или на компьютер с помощью поставляемого программного обеспечения — Windows-приложения «МЕТЕО 3.0» [9] и другим [5, 7, 10–11]. Для ввода данных в компьютер используются его порты COM (или их виртуальный аналог на порту USB) — при этом информационные пакеты предварительно подвергаются преобразованию под стандарт RS–232. В отличие от пульта в компьютере дополнительно могут оцениваться стандартные числовые характеристики атмосферной турбулентности (несколько десятков) и различные ее статистические функции: спектральные, корреляционные, структурные и т. п.

Пакеты с данными измерений также могут накапливаться в памяти на FLASH-карточке с помощью логгера (блока БСИ–13) [5] или передаваться на удаленный сервер (через Интернет или в виде SMS-сообщений по сотовой связи). Последнее позволяет формировать из группы метеостанций АМК–03 пространственно-разнесенные региональные сети метеорологических наблюдений с автоматическим сбором данных измерений в едином центре [10, 11]. Разработаны специальные варианты исполнения АМК–03 для поставки МО РФ [6, 7]: переносной ранцевый вариант как изделие 1Б65 и бортовой как изделие 1Б65Б.

Метрологические характеристики АМК–03 (см. табл. 1) нормируются только для усредненных (за интервал от 1 до 20 мин) вычисляемых значений метеорологических величин.

Для АМК–03 имеется общий сертификат РФ об утверждении нового типа средств измерений RU.C.28.007.A, № 29530 и два сертификата на ее модификации как на средство измерений военного назначения (RU.C.28.018.B, № 23068 и № 20777). Отметим, что приведенные в табл. 1 погрешности измерений температуры, скорости и направления ветра более чем на порядок превышают пороговую чувствительность ультразвукового термоанемометра к их турбулентным изменениям, что обусловлено существенным превалированием в подобных устройствах систематических погрешностей над случайными ошибками измерений.

2. ИЗМЕРЯЕМАЯ СКОРОСТЬ ЗВУКА В АТМОСФЕРЕ И ЕЕ ЗАВИСИМОСТЬ ОТ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Определение метеорологических величин с помощью ультразвуковых измерений основывается на известной зависимости от них вектора групповой скорости звука в атмосфере [12, 13]

$$\mathbf{U} = c\mathbf{n} + \mathbf{v}, \quad (1)$$

где c — адиабатическая скорость звука в воздушной среде; \mathbf{v} — вектор скорости движения среды (ветра) относительно приемника звука; \mathbf{n} — нормаль к фазовому фронту регистрируемой звуковой волны. Также учитывается, что для идеального (в термодинамическом смысле) газа скорость звука c описывается как [13] $c = \sqrt{(\chi R/\mu)T}$, где $\chi = C_p/C_v$ — отношение теплоемкостей при постоянном давлении и постоянном объеме, R — универсальная газовая постоянная, μ — молекулярный вес газа, T — температура газа в Кельвинах. Параметры, определяющие значение коэффициента пропорциональности между c и \sqrt{T} , для атмосферного воздуха являются практически постоянными величинами, известными с очень высокой точностью,

Таблица I: Основные метрологические характеристики АМК-03

| Измеряемая величина | Диапазон измерения | Погрешность |
|--|--------------------|--|
| Температура воздуха, T , °C | -50...+55 | $\pm 0,3$ при $T \leq +30^\circ\text{C}$; $\pm 0,5$, при $T > +30^\circ\text{C}$ |
| Скорость горизонтального ветра V , м/с | 0...40 | $\pm(0,1 + 0,02 V)$ |
| Направление горизонтального ветра D , град | 0...360 | ± 4 |
| Скорость вертикального ветра ω , м/с | -15...+15 | $\pm(0,1 + 0,02 \omega)$ |
| Относительная влажность воздуха r , % | 5...100 | $\pm 2,5$ при $T > 0^\circ\text{C}$; ± 5 , при $T \leq 0^\circ\text{C}$ |
| Атмосферное давление P , мм рт. ст. | 523...800 | $\pm 0,25$ |

что позволяет использовать имеющееся значение c для вычисления T .

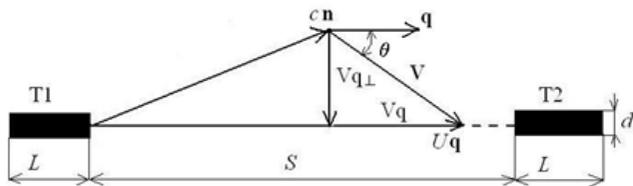


Рис. 2: Векторная диаграмма скоростей звука и ветра при работе пары ультразвуковых датчиков T1 и T2, где T1 — излучатель; T2 — приемник.

В ультразвуковом термоанемометре непосредственно измеряемым параметром акустического сигнала являются времена t его прохождения с групповой скоростью \mathbf{U} расстояний S между каждой применяемой в нем парой датчиков, используемых как источник и приемник звука. Значения t , используя соотношение $U = S/t$, позволяют вычислять величины модуля групповой скорости звука $U = \sqrt{c^2 + 2c\mathbf{v}\mathbf{n} + v^2}$ для каждой пары источник-приемник, отличающиеся между собой вследствие их разной ориентации \mathbf{q} относительно вектора скорости ветра \mathbf{v} (см. рис. 2). Из полученного набора значений U оценивают ортогональные компоненты скорости ветра $\mathbf{v}(v_x, v_y, v_z)$ и скорость звука c (или температуру T).

В рассматриваемых ультразвуковых измерениях имеют место три основные методические проблемы. Первая связана с тем, что коэффициент пропорциональности между c и \sqrt{T} известен с хорошей точностью только для сухого воздуха (обычно он считается равным 20,067). Вследствие наличия водяного пара в атмосфере он дополнительно зависит от отношения упругости водяного пара e к атмосферному давлению P (в атмосфере $e/P \ll 1$), что учитывается в формуле для скорости звука c как [14]

$$c = 20067\sqrt{T_V}, \text{ м/с}, \quad (2)$$

где $T_V = T(1 + 0,3192e/P)$ — виртуальная (или акустическая) температура воздуха.

Вклад величины e в (2) при известном значении относительной влажности воздуха r может быть учтен,

используя соотношение [15] $e = 6,107^{m-2}r$ (здесь r в %, e в гПа, $m = 7,665T_C/(243,33 + T_C)$ и T_C — температура в °C). Но для этого требуется дополнительно измерять относительную влажность r и давление P . Эти измерения имеют свои погрешности, величины которых сказываются на итоговой погрешности оценивания температуры T из скорости звука c .

Вторая методическая проблема обусловлена тем, что нормаль к фазовому фронту волны \mathbf{n} при наличии ветра отклоняется на неизвестную до измерений величину от единичного вектора \mathbf{q} вдоль прямой от источника к приемнику. Для исключения \mathbf{n} в выражении для U удобно воспользоваться соотношением между \mathbf{n} и \mathbf{q} из [16]

$$\mathbf{n} = \mathbf{q} \left(\sqrt{1 + (\mathbf{v} \cdot \mathbf{q}/c)^2 - (v/c)^2} + \mathbf{v} \cdot \mathbf{q}/c \right) - \mathbf{v}/c.$$

Умножая скалярно левую и правую части в (1) на \mathbf{q} и учитывая это соотношение, имеем:

$$U = c\sqrt{1 - (\mathbf{v} \cdot \mathbf{q}_\perp/c)^2} + \mathbf{v} \cdot \mathbf{q}. \quad (3)$$

Здесь \mathbf{q}_\perp — единичный вектор, ортогональный \mathbf{q} ; $v_{q_\perp}^2 = v^2 - v_q^2$, где $v_q = \mathbf{v} \cdot \mathbf{q}$ и $v_{q_\perp} = \mathbf{v} \cdot \mathbf{q}_\perp$ — продольная и поперечная компоненты скорости ветра \mathbf{v} относительно \mathbf{q} (см. рис. 2).

Соотношение (3) определяет правила проектирования геометрических схем измерений в ультразвуковых термоанемометрах. Например, давно применяется способ реализации одномерного акустического анемометра с одной парой датчиков, в которых для измерения компоненты скорости потока v_q вдоль линии, их соединяющей, используется повторное излучение звука в обратном направлении $\mathbf{q}_2 = -\mathbf{q}_1$. Разность измеренных групповых скоростей $\Delta U_{12} = U_{q1} - U_{q2}$ здесь равна удвоенному значению v_q (при этом влияние скорости поперечного потока среды v_{q_\perp} на результат измерений v_q автоматически исключается). Однако, если по данным измерений подобного устройства попытаться оценить скорость звука c (или T) из суммы групповых скоростей $\Sigma U_{12} = U_{q1} + U_{q2}$, то будет допущена методическая погрешность, пропорциональная квадрату v_{q_\perp} . Измеренные таким ультразвуковым термоанемометром значения T при наличии значимых скоростей ветра всегда оказываются меньше их истинных значений.

Для атмосферы это кажущееся уменьшение температуры вследствие пренебрежения влиянием поперечного ветра при $v \approx 30$ м/с достигает примерно $1,7^\circ\text{C}$. Последнее явление наглядно обнаруживается при работе с ультразвуковым термоанемометром в аэродинамической трубе, в которой эталонными средствами измерений контролируется кроме скорости воздушного потока также его температура.

Третья методическая проблема рассматриваемых измерений заключается в том, что длина атмосферной трассы S распространения звука от источника до приемника является в некоторой степени условной величиной. Это обусловлено наличием переходной зоны формирования источником из электрического сигнала акустической волны в воздухе и аналогичной зоны при обратном преобразовании ее приемником в электрический сигнал. Временные задержки сигнала термоанемометра в этих зонах с учетом использования относительно небольших расстояний между датчиками S значительно сказываются на измеряемых временах t и без их компенсации приводят к существенному возрастанию погрешностей оценивания метеорологических величин.

3. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ АЛГОРИТМЫ ОЦЕНИВАНИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Для алгоритмического выделения вкладов в измеренные значения U всех оцениваемых параметров v_x , v_y , v_z и c (или T) требуется иметь минимум 4 канала распространения ультразвука, отличающихся ориентацией \mathbf{q} . В тех системах, где в каждой паре датчиков используется излучение сигнала в обратных направлениях, для аналогичной цели требуется минимум 3 пары ультразвуковых датчиков, фактически образующих 6 измерительных каналов.

Алгоритмы вычисления метеорологических величин получают из формулы (3), выписывая ее для каждого применяемого канала распространения ультразвука (его единичного вектора \mathbf{q} , выраженного через орты выбранной системы координат). В итоге получается система уравнений, которую необходимо решить относительно величин v_x , v_y , v_z и c . Поскольку эта система уравнений для многоканальных термоанемометров аналитически строго не решается, то формулу (3) обычно упрощают, разлагая ее правую часть в ряд по малому в атмосфере параметру $v/c \ll 1$, где v — модуль вектора скорости ветра. В этом случае она для i -ого канала измерений с ориентацией \mathbf{q}_i имеет вид:

$$U_i = c + \mathbf{v} \cdot \mathbf{q}_i - (\mathbf{v} \cdot \mathbf{q}_{i\perp})^2 / (2c) + (\mathbf{v} \cdot \mathbf{q}_{i\perp})^4 / (2c)^3 + \dots \quad (4)$$

Если оставлять в (4) только первые 2 члена ряда (линейное приближение по v/c), то вклад компоненты ветра, поперечной к направлению \mathbf{q}_i , ни каким образом не будет учтен. Численные оценки показывают,

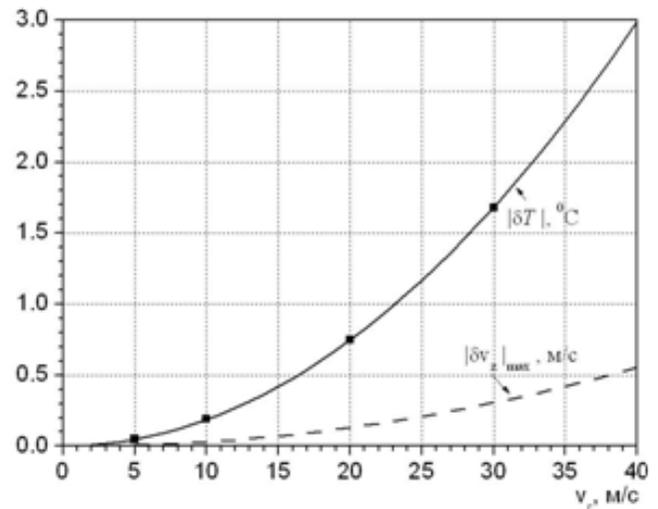


Рис. 3: Значения абсолютных ошибок $|\delta T|$ и $|\delta v_z|_{\max}$ в измеряемых АМК-03 значениях температуры T и скорости вертикального ветра v_z в случае пренебрежения влиянием поперечного ветра в зависимости от скорости горизонтального ветра v_h (точки — экспериментальные данные в аэродинамической трубе)

что такое приближение может быть допустимым только в случае слабого ветра (при $v < 10$ м/с, см. рис. 3). С другой стороны, в (4) члены ряда четвертого порядка малости по v/c и выше дают методическую ошибку оценивания (для v_x , v_y , v_z и c), которая даже при скорости ветра, равной 30 м/с, не превышает 0,003 м/с.

Конкретный вид вычислительных алгоритмов зависит от пространственной схемы взаимного расположения ультразвуковых датчиков, задаваемой на этапе проектирования термоанемометра. В АМК-03 применяются 4 измерительных канала, ориентация которых в декартовой системе координат, привязанной к конструкции термоанемометра, описывается системой уравнений для единичных векторов:

$$\mathbf{q}_1 = \mathbf{i} \sin \beta + \mathbf{k} \cos \beta \text{ — для канала № 1;}$$

$$\mathbf{q}_2 = -\mathbf{i} \sin \beta + \mathbf{k} \cos \beta \text{ — № 2;}$$

$$\mathbf{q}_3 = \mathbf{j} \sin \beta - \mathbf{k} \cos \beta \text{ — № 3;}$$

$$\mathbf{q}_4 = -\mathbf{j} \sin \beta - \mathbf{k} \cos \beta \text{ — № 4.}$$

Здесь $\beta = 45^\circ$; \mathbf{i} , \mathbf{j} , \mathbf{k} — орты системы координат (ось X условно считается направлением на север, ось Y — на запад, а ось Z направлена вдоль вертикальной оси термоанемометра). Подставляя эти значения \mathbf{q}_i в ряд (4) и учитывая в нем только первые три слагаемых, можно получить систему уравнений:

$$\Delta U_{12}/2 = v_x \sin \beta + v_x v_z \sin(2\beta) / (2c),$$

$$\Delta U_{34}/2 = v_y \sin \beta - v_y v_z \sin(2\beta) / (2c),$$

$$\Sigma U_{12}/2 = c + v_z \cos \beta - (v_x^2 \cos^2 \beta + v_y^2 + v_z^2 \sin^2 \beta) / (2c),$$

$$\Sigma U_{34}/2 = c - v_z \cos \beta - (v_x^2 + v_y^2 \cos^2 \beta + v_z^2 \sin^2 \beta) / (2c), \quad (5)$$

где $\Delta U_{12} = U_{q1} - U_{q2}$, $\Delta U_{34} = U_{q3} - U_{q4}$,

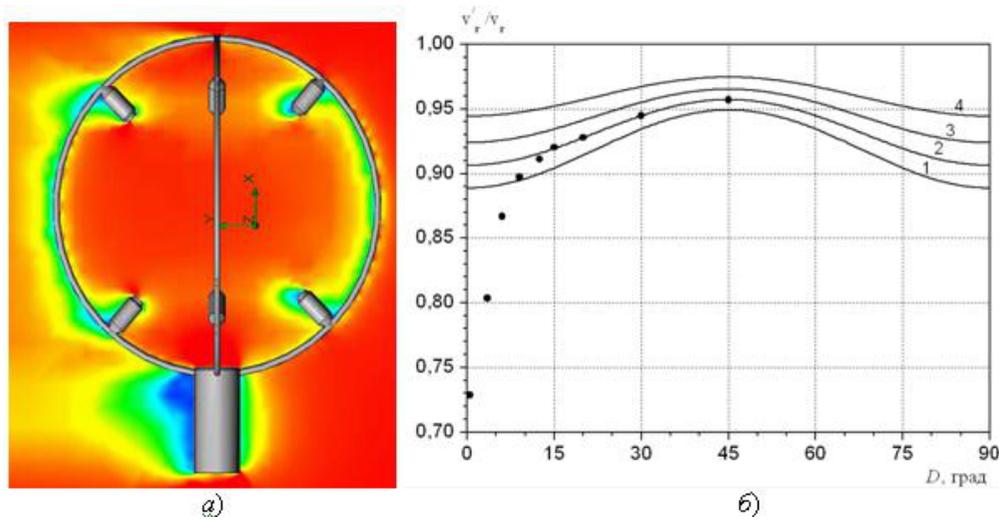


Рис. 4: Расчетные и экспериментальные данные по затенению ветрового потока конструкцией термоанемометра, применяемого в АМК-03: *a* — качественная картина поля скоростей ветра при компьютерном моделировании; *б* — значения отношения измеряемой без учета затенения скорости горизонтального ветра к ее истинному значению в зависимости от его направления D . Сплошные линии — результаты расчетов только для ультразвуковых датчиков (1 — $K=0,62$; 2 — $K=0,68$; 3 — $K=0,74$; 4 — $K=0,81$); точки — данные измерений в аэродинамической трубе

$\Sigma U_{12} = U_{q1} + U_{q2}$, $\Sigma U_{34} = U_{q3} + U_{q4}$ — разности и суммы измеренных 4-х значений групповой скорости звука $U_i = S_i/t_i$ в двух ортогональных плоскостях термоанемометра.

Система уравнений (5) относительно величин v_x , v_y , v_z и c аналитически строго также не решается. Для их приближенных вычислений приходится использовать двухступенчатый алгоритм. Вначале производится оценка значений этих параметров в линейном приближении по v/c из формул:

$$\begin{aligned} \hat{v}_x &= \Delta U_{12} / (2 \sin \beta), & \hat{v}_y &= \Delta U_{34} / (2 \sin \beta), \\ \hat{v}_z &= (\Sigma U_{12} - \Sigma U_{34}) / (4 \cos \beta), & \hat{c} &= (\Sigma U_{12} + \Sigma U_{34}) / 4. \end{aligned} \quad (6)$$

Далее, используя эти оценки v_x , v_y , v_z и c линейного приближения, помечаемые здесь символом $\hat{}$, вычисляются для них поправки второго приближения по v/c как

$$\begin{aligned} \delta v_x &= -\hat{v}_x \hat{v}_z \cos \beta / \hat{c}, & \delta v_y &= \hat{v}_y \hat{v}_z \cos \beta / \hat{c}, \\ \delta v_z &= -(\hat{v}_x^2 - \hat{v}_y^2) \sin^2 \beta / (4\hat{c} \cdot \cos \beta), & (7) \\ \delta c &= [(\hat{v}_x^2 + \hat{v}_y^2) (1 + \cos^2 \beta) + 2\hat{v}_z^2 \sin^2 \beta] / (4\hat{c}). \end{aligned}$$

При этом более точными значениями считаются величины $v_x \approx \hat{v}_x + \delta v_x$, $v_y \approx \hat{v}_y + \delta v_y$, $v_z \approx \hat{v}_z + \delta v_z$ и $c \approx \hat{c} + \delta c$.

Отметим, что пренебрежение поправкой второго приближения δc приводит к систематической ошибке оценивания температуры из формулы (2), примерно равной $\Delta T \approx -(\sqrt{T}/10) \delta c$. На рис. 3 приведены вычисленные с учетом (8) значения для этой погрешности в сравнении с экспериментальными данными для нее, полученными в аэродинамической трубе.

4. ЗАТЕНЕНИЕ ВЕТРОВОГО ПОТОКА КОНСТРУКЦИЕЙ ТЕРМОАНОМЕТОМЕТРА

Конструктивные элементы термоанемометра, препятствующие движению потока воздуха, искажают значения его скоростей в пространственной зоне акустических измерений. В термоанемометрах, применяемых в АМК-03, основными затеняющими элементами являются корпуса ультразвуковых датчиков и кольца, к которым они закрепляются (см. рис.4,а).

В [17] показано, что продольная составляющая скорости ветра v'_q вдоль вектора трассы \mathbf{q} между парой ультразвуковых датчиков, которая непосредственно влияет на результаты измерений, меньше действительного значения этой компоненты ветра v_q в соответствии с формулой (см. также рис. 2)

$$v'_q = v_q [K + (1 - K) \sin \theta]. \quad (8)$$

Здесь $K = v'_q/v_q|_{\text{при } \theta=0}$ — коэффициент затенения ветровому потоку корпусом датчика при нулевом угле атаки θ вектора скорости ветра \mathbf{v} по отношению к \mathbf{q} . В [17] также указано, что числовое значение K существенно зависит от отношения расстояния между датчиками S к диаметру корпуса датчика d . В частности из экспериментов в аэродинамической трубе с ультразвуковыми датчиками цилиндрической формы было установлено 4 значения K : 0,72 при $S/d = 10$; 0,81 при $S/d = 15$; 0,87 при $S/d = 25$ и 0,93 при $S/d = 50$.

С учетом ветрового затенения ультразвуковыми датчиками формула (2) для измеряемой ими групповой скорости звука уже приобретает вид

$$U = c \sqrt{1 - (v_{q\perp}/c)^2 + v_q \eta}, \quad (9)$$

где $\eta = v'_q/v_q$ — величина относительного затенения продольной к \mathbf{q} составляющей скорости ветра (при известной величине K ее значение можно вычислять для каждого измерительного канала как

$$\eta_i = K + (1 - K)\sqrt{(v_{qi\perp})^2/v^2}.$$

$$c = \frac{1}{2} \left(\frac{\Sigma_{U12} - A_{12}\Delta_{U12}}{B_{12}} + \frac{\Sigma_{U34} - A_{34}\Delta_{U34}}{B_{34}} \right) / \left(\frac{1}{B_{12}} + \frac{1}{B_{34}} \right),$$

$$v_z = \frac{\Sigma_{U12} - \Sigma_{U34} - A_{12}\Delta_{U12} + A_{34}\Delta_{U34}}{(B_{12} + B_{34}) \cos\beta},$$

$$v_x = \frac{\Delta_{U12}}{(\eta_1 + \eta_2) \sin\beta} - A_{12}v_z \operatorname{ctg}\beta, \quad v_y = \frac{\Delta_{U34}}{(\eta_3 + \eta_4) \sin\beta} - A_{34}v_z \operatorname{ctg}\beta;$$

где

$$A_{12} = (\eta_1 - \eta_2) / (\eta_1 + \eta_2),$$

$$A_{34} = (\eta_3 - \eta_4) / (\eta_3 + \eta_4),$$

$$B_{12} = (\eta_1 + \eta_2) (1 - A_{12}^2),$$

$$B_{34} = (\eta_3 + \eta_4) (1 - A_{34}^2).$$

Если пренебречь в (10) затенением ветра датчиками, т.е. считать $\eta_1 = \eta_2 = \eta_3 = \eta_4 = 1$ (при этом $A_{12} = A_{34} = 0$ и $B_{12} = B_{34} = 1$), то формулы (10) точно преобразуются в (6).

Таким образом, учет затенения датчиками приводит к еще более многоступенчатому алгоритму вычислений скоростей v_x , v_y , v_z и c . В этом случае вначале вычисляются по формулам из (6) ортогональные компоненты скорости ветра v_x , v_y , v_z в линейном приближении по v/c и без учета затенения. Затем, используя полученные значения v_x , v_y , v_z оцениваются квадраты четырех поперечных компонент ветра $v_{qi\perp}^2$ как

$$(v_{q1\perp})^2 = v_x^2 \cos^2 \beta + v_y^2 + v_z^2 \sin^2 \beta - v_x v_z \sin(2\beta),$$

$$(v_{q2\perp})^2 = v_x^2 \cos^2 \beta + v_y^2 + v_z^2 \sin^2 \beta + v_x v_z \sin(2\beta),$$

$$(v_{q3\perp})^2 = v_x^2 + v_y^2 \cos^2 \beta + v_z^2 \sin^2 \beta + v_y v_z \sin(2\beta),$$

$$(v_{q4\perp})^2 = v_x^2 + v_y^2 \cos^2 \beta + v_z^2 \sin^2 \beta - v_y v_z \sin(2\beta),$$

и также квадрат модуля вектора скорости ветра v^2 . После этого рассчитываются значения η_i для каждого измерительного канала термоанемометра. Наконец, из (10) получают окончательные значения линейных

Не трудно заметить, что при разложении правой части (9) в ряд, аналогичный (3), отличие (9) от (2) приводит только к уточнению алгоритмов вычисления для v_x , v_y , v_z и c в линейном приближении по v/c . Составляя систему уравнений, аналогичную (4), но с учетом (9), аналогично (6) можно получить:

по v/c оценок \hat{v}_x , \hat{v}_y , \hat{v}_z и \hat{c} . Завершаются расчеты учетом для v_x , v_y , v_z и c поправок второго приближения по v/c в соответствии с (7).

Результаты расчетных данных по затенению ветра для АМК-03 периодически сравниваются с экспериментальными оценками этого явления в аэродинамической трубе (см. рис.4,б). На данный момент из последних получено, что в вычислительных алгоритмах для АМК-03 следует использовать значение K , равное 0,68.

Затенение монтажными кольцами, также видимое в экспериментальных точках на рис.4,б, значимо только при не больших углах ΔD отклонения направления ветрового потока относительно плоскости кольца (менее 12–15°). В зависимости от направления ветра оно либо не учитывается, либо учитывается только для одного из колец (для v_x или v_y) как $v_i = v'_i (1 + \varepsilon(\Delta D)/100)$, где $\varepsilon(\Delta D)$ является функцией относительного затенения скорости ветра (в %) от угла ΔD . Данная функция устанавливается посредством полиномиальной регрессии 4-го порядка экспериментальных данных в аэродинамической трубе по оцениванию дополнительного затенения ветра вблизи плоскости колец.

5. ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ВРЕМЕННЫХ ИНТЕРВАЛОВ В УЛЬТРАЗВУКОВОМ ТЕРМОАНОМЕТОМЕТРЕ

Измеряемые в термоанемометре временные интервалы \hat{t} , как правило, отличаются от истинного значения t времени атмосферного распространения ультразвукового сигнала между парой источник-приемник на некоторую систематическую временную задержку g , т.е. $t = \hat{t} - g$. Значительная доля значения g устанавливается из анализа электронных схем, используемых в тер-

моанемометре, а не исключенный его остаток Δg влияет на систематические погрешности для оцениваемых метеорологических величин.

В термоанемометрах из состава АМК–03 используется импульсный метод измерения временных интервалов \hat{t} (см. рис. 5). Короткий электрический сигнал возбуждает в воздухе помощью пьезокерамического датчика импульсный звуковой сигнал с частотой f_S , близкой 100 кГц. Он принимается другим датчиком и преобразуется снова в электрический сигнал с длительностью, заметно большей первоначальной. Величина \hat{t} оценивается как интервал времени между моментом формирования сигнала возбуждения и моментом регистрации центра первого положительного полупериода принятого сигнала. Последний определяется как среднее из момента t_1 превышения сигнала в этом полупериоде некоторого порогового значения и момента t_2 его уменьшения до этого же значения (это снижает зависимость результата измерений при флуктуациях амплитуды принимаемых сигналов). Оценка времени выполняется посредством подсчета количества синхроимпульсов за измеряемый интервал, генерируемых с частотой f_G применяемого кварцевого генератора (в серийных образцах $f_G = 32$ МГц).

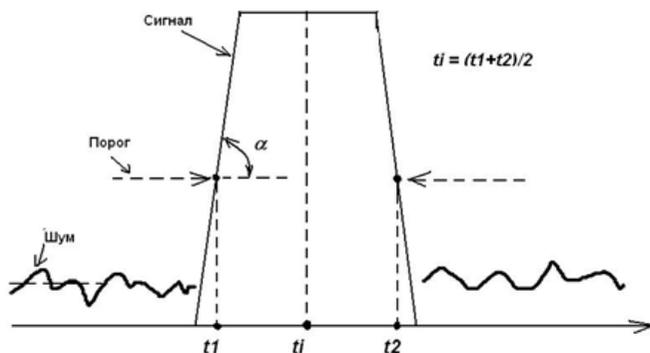


Рис. 5: Поясняющая диаграмма к измерениям времени распространения ультразвука в импульсном термоанемометре

Поскольку наклон измерительной характеристики здесь описывается соотношением $\operatorname{tg} \alpha \approx 2\pi f_S A_S$, где A_S — амплитуда сигнала (до ее ограничения в усилителе), то для оценивания среднеквадратической (случайной) ошибки σ_{tp} измерений \hat{t} , связанной с применяемым для этих целей радиотехническим методом, имеем

$$\sigma_{tp} \approx \sigma_N / (\sqrt{2} \cdot \operatorname{tg} \alpha) \approx 1 / (2\sqrt{2} \cdot \pi f_S Q), \quad (11)$$

где σ_N — среднеквадратическое значение амплитуды шумовых сигналов в термоанемометре ($Q = A_S / \sigma_N$ — отношение сигнал/шум по амплитуде).

Вследствие квантования измеряемого времени также существует дополнительная среднеквадратическая ошибка измерений \hat{t} , равная $\sigma_{tq} = 1 / (2\sqrt{2} \cdot f_G)$. Поскольку в термоанемометрах АМК–03 отношение Q ,

как правило, имеет значение не менее 10^4 , то σ_{tp} является величиной порядка 10^{-10} с, что существенно меньше $\sigma_{tq} \sim 10^{-8}$ с. Поэтому при оценках случайных погрешностей измерений метеорологических величин можно учитывать только значение σ_{tq} . Также по этой причине имеют место очень простые формулы для оценивания пороговой чувствительности термоанемометров к турбулентным пульсациям температуры и скорости ветра:

$$\delta T \approx 10T^{3/2} / (S \cdot f_G) \text{ и } \delta V \approx 200T / (S \cdot f_G), \quad (12)$$

где $S \approx 0,14$ м — расстояние между парами датчиков.

Требуемое в (12) увеличение значения S приводит к снижению пространственного разрешения регистрируемых турбулентных флуктуаций метеорологических величин, а значимость увеличения частоты f_G ограничена (11).

6. ГРАДУИРОВКА ТЕРМОАНОМЕТОМЕТРА В КЛИМАТИЧЕСКОЙ КАМЕРЕ

Основная градуировка ультразвукового термоанемометра заключается в установлении для него индивидуальных значений \tilde{S}_i расстояний S_i между имеющимися парами акустических датчиков (здесь i — их порядковый номер), при которых погрешность оценивания температуры из данных его измерений \hat{t}_i будет минимальна и не превышает величины, заявляемой в его технических характеристиках. В ультразвуковых анемометрах с излучением звука в обратном направлении, используемых исключительно для оценивания параметров ветра, требования к погрешности определения S_i более, чем на порядок значений являются менее жесткими, чем при оценивании температуры. При эксплуатации термоанемометра значения \tilde{S}_i применяются в вычислениях групповых скоростей звука (как $U_i = \tilde{S}_i(\hat{t}_i - g)$), используемых далее в алгоритмах для оценивания метеорологических величин (для АМК–03 в соотношениях (6) и (10)).

Ни каким механическим способом измерить значения \tilde{S}_i с относительной погрешностью, менее 0,1% (при ней абсолютная погрешность оценивания T будет близка к 0,3 °С), обычно не удается. Поэтому в АМК–03 при данной градуировке применяется программное решение обратной задачи акустических измерений термоанемометра величин \hat{t}_i , выполняемых, как правило, в климатической камере. Дополнительно для этой градуировки используются показания температуры T , относительной влажности r и атмосферного давления P , выдаваемые сертифицированными средствами их эталонных измерений, размещенными внутри камеры. Программа «МЕТЕО 3.0» [4, 9] имеет специальный режим работы, в котором она из выдаваемых термоанемометром величин \hat{t}_i вычисляет с учетом эталонных значений T , r и P расстояния \tilde{S}_i для каждого канала термоанемометра в предположении, что в камере отсутствуют ветровые потоки, т. е. использует алгоритм

$$\tilde{S}_i = \frac{20,067 \sqrt{T(1 + 0,3192e/P)}}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{t}_i - g).$$

Значения \tilde{S}_i здесь вычисляются как среднее по n измерениям \hat{t}_i за время градуировки не менее 1 мин (при $n \geq 600$).

Данная градуировка наиболее часто производится при нормальной (комнатной) температуре (далее ее значение в Кельвинах обозначается как T_0). В этом случае вместо дорогостоящей климатической камеры может использоваться закрытый контейнер, отсекающий ветровые потоки.

Погрешность описанной выше градуировки определяется в основном погрешностями используемых средств эталонных измерений: Δr_e — для относительной влажности, и ΔT_e — для температуры; от ΔP_e она зависит существенно меньше. Для приближенных ее оценок нами предлагается использовать соотношение

$$\Delta \tilde{S} \approx S / (20\sqrt{T}) \cdot \{\Delta c_T + \Delta c_r\}, \quad (13)$$

где $\Delta c_T \approx 10\sqrt{T} \cdot \Delta T_e$ и $\Delta c_r \approx 3,2 \cdot 6, 107^{m-2} \sqrt{T} / P \cdot \Delta r_e$ — погрешности оценивания скорости звука c в воздухе за счет погрешностей средств эталонных измерений T и r (здесь $m = 7,665 T_C / (243,33 + T_C)$ и T_C — температура в °С).

В настоящее время на испытательной станции ИМКЭС СО РАН применяются технические средства эталонных измерений со значениями нормируемых погрешностей их измерений: $\Delta T_e = 0,04$ °С, $\Delta r_e = 2\%$ и $\Delta P_e = 0,1$ гПа. Это позволяет достигать при градуировке термоанемометров погрешности оценивания \tilde{S}_i (для температуры T_0 , при которой она выполняется), примерно равной 0,01 мм.

Для учета температурного расширения металлической конструкции термоанемометра в вычислительных алгоритмах оценивания метеорологических величин дополнительно используется соотношение $\tilde{S}_i = \tilde{S}_{i0} \{1 + \alpha(T - T_0)\}$, где T — температура, при которой выполняются текущие измерения; \tilde{S}_{i0} — расстояния, полученные при калибровке значений \tilde{S}_i при температуре ее проведения T_0 ; α — температурный коэффициент расширения.

Значение α для конструкции термоанемометра также определяется в климатической камере. Для этого в камере устанавливается максимально низкая температура (обычно равная минус 50 °С); чем больше абсолютная разность $|T - T_0|$, тем точнее можно определить значение α . Далее для работающего при температуре $T \neq T_0$ термоанемометра, используя программу «МЕТЕО 3.0», подбирается значение α , при котором вычисляемая ею температура совпадет с показанием эталонного термометра. Отметим, что для стали $\alpha \approx 1,1 \times 10^{-5}$ 1/°С, а при градуировке термоанемометров, используемых в АМК-03, для значения α

всегда получается большее значение, в пределах $(5-6) \times 10^{-5}$ 1/°С. Это происходит потому, что неучтенный в алгоритмах остаток систематической задержки Δg проявляется в результатах измерений T аналогично влиянию температурного расширения конструкции. Т.е. при градуировке на значение α дополнительно исключается (компенсируется) и влияние Δg .

Градуировка встроенных в термоанемометр датчиков влажности и давления, которая также производится в климатической камере, здесь не рассматривается.

7. ИНЖЕНЕРНЫЕ ФОРМУЛЫ ДЛЯ ОЦЕНОК ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЙ

Здесь приведем как справочный материал некоторые математические соотношения, которые могут быть полезными при инженерных оценках ожидаемых погрешностей измерений в имеющихся ультразвуковых термоанемометрах или учитываться на этапе эскизного проектирования новых устройств этого типа. Они получены посредством выделения основных значимых факторов в более точных, но сильно громоздких, выражениях.

Пороговая чувствительность к турбулентным пульсациям температуры и скорости ветра — описывается формулами (12); при малом отношении сигнал/шум в устройстве также надо учитывать (11).

Основная погрешность оценивания средней температуры:

систематическая —

$$\Delta T \approx \frac{\sqrt{T}}{10} \left\{ \left(1 + \frac{|T - T_0|}{2T_0} \right) (\Delta c_T + \Delta c_r) + \frac{200 |T - T_0| \Delta g}{S} \right\}, \quad K \text{ или } ^\circ C,$$

где алгоритмы для вычислений Δc_T и Δc_r приведены в (13), а вклад Δg при качественной градуировке исключается (влияние его неучтенного остатка может быть оценено опытным путем в климатической камере при минимальном значении T);

случайная —

$$\sigma_T \approx 20T^{3/2} / (S\sqrt{n}) \sigma_{tq}, \quad K \text{ или } ^\circ C,$$

где n — количество используемых измерений при оценивании среднего значения. Здесь практически всегда $\Delta T \gg \sigma_T$.

Основные погрешности оценивания скорости V и направления D среднего горизонтального ветра (без учета погрешностей учета затенения конструкции):

систематические —

$$\Delta V \approx V \left\{ 3 \cdot 10^{-3} (\Delta c_T + \Delta c_r) + \left(20\sqrt{T} / S \right) \Delta g \right\}, \quad \text{м/с,}$$

и $\Delta D \approx \Delta F$, град., где ΔF — угловая ошибка азимутального ориентирования термоанемометра относительно направления на север;

случайные —

$$\sigma_V \approx \{400T / (S\sqrt{n})\} \sigma_{tq} \ll \Delta V, \text{ м/с,}$$

и

$$\sigma_D \approx \frac{0,36 \cdot 10^5 T}{V |\cos D| S \sqrt{n}} \sigma_{tq} \sim \frac{0,1}{V |\cos D|}, \text{ град}$$

Влияние угловых ошибок при изготовлении конструкции термоанемометра, используемого в АМК-03, на погрешности его измерений:

- при $\Delta\beta$ — ошибке в угле наклона оси пары ультразвуковых датчиков (в градусах) — имеются дополнительные систематические погрешности: $\Delta T \approx 10^{-2} V \cdot \Delta\beta$; $\Delta V \approx 3,5 \cdot 10^{-2} V \cdot \Delta\beta$ и $\Delta D \approx 2 |\sin D| \cdot \Delta\beta$;

- при $\Delta\gamma$ — угловой ошибке в ортогональности колец крепления датчиков (в градусах) — имеем

$$\Delta T = 0; \Delta V \approx 3,5 \cdot 10^{-2} V \cdot \Delta\gamma \text{ и } \Delta D \approx |\cos D| \cdot \Delta\gamma.$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные в данной работе материалы могут оказать полезными для тех, кто занимается проектированием новых ультразвуковых термоанемометров или применяет их в своих атмосферных исследованиях.

Работа выполнена при финансовой поддержке государственного контракта № 14.607.21.0030 (уникальный идентификатор ПНИ RFMEFI60714X0030) по ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» и базового проекта СО РАН № VIII.80.2.2.

-
- [1] *Богусевич А.А.* Оптика атмосферы и океана. **12**, №2. С. 170. (1999).
- [2] *Тихомиров А.А.* Оптика атмосферы и океана. **23**, №7. С. 585. (2010).
- [3] *International standard: ISO 16622-2002. Meteorology — Sonic anemometers/thermometers — Acceptance test methods for means wind measurements.*
- [4] *Азбукин А.А., Богусевич А.А., Ильичевский В.И., Корольков В.А., Тихомиров А.А., Шелевой В.Д.* Метеорология и гидрология. №11. С. 89. (2006).
- [5] *Азбукин А.А., Богусевич А.А., Корольков В.А., Тихомиров А.А., Шелевой В.Д.* Метеорология и гидрология. №2. С. 101. (2009).
- [6] *Тихомиров А.А., Корольков В.А., Богусевич А.А., Азбукин А.А., Шелевой В.Д.* Вестник Академии военных наук. №3. С. 144. (2008).
- [7] *Азбукин А.А., Богусевич А.А., Кобзев А.А., Корольков В.А., Тихомиров А.А., Шелевой В.Д.* Датчики и системы. №3. С. 42. (2012).
- [8] *Азбукин А.А., Богусевич А.А., Ильичевский В.С., Корольков В.А., Шелевой В.Д.* Ультразвуковой термоанемометр с устройством автоматического восстановления точностных характеристик измерений Патент РФ №2319987. Заявка № 2006119583 от 5.06.2006. Опубл. 20.03.08. Бюл. № 8.
- [9] *Богусевич А.А.* Ультразвуковая метеостанция, версия 3.0 ("МЕТЕО 3.0"). / Роспатент / Свид. об офиц. рег. прогр. для ЭВМ № 2002612038 от 3.12.02.
- [10] *Богомолов В.Ю., Богусевич А.А., Гордов Е.П., Корольков В.А., Крупчатников В.Н., Тихомиров А.А.* Оптика атмосферы и океана. **24**, №1. С. 52. (2011).
- [11] *Тихомиров А.А., Богусевич А.А., Корольков В.А., Кобзев А.А.* Геоэкология. Инженерная геология. Гидрология. Геокриология. №5. С. 398. (2012).
- [12] *Блохинцев Д.И.* Акустика неоднородной движущейся среды. (М.: Наука, 1981).
- [13] *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Механика сплошных сред. (М.: Гостехтеоретиздат, 1954).
- [14] *Hanafusa T., Fujitani T., Kobo Y., Mitsuta Y.* Pap. Meteorol. Geophys. **33**. P. 1. (1982).
- [15] *Атмосфера: справочник.* (Л.: Гидрометеиздат, 1991).
- [16] *Осташев В.Е.* Распространение звука в движущихся средах. (М.: Наука, 1992).
- [17] *Wyngard J.C., Zhang , S.F. J.* Atmosph. And Oceanic Tehnology. **2**, N 12. P. 548. (1985).

Sources of error in ultrasonic measurements of meteorological parameters in the atmosphere, methods and algorithms for minimization on the basis of the experience of creating industrial weather station АМК-03

A.Ya. Bogushevich

*Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences (IMCES SB RAS), City Tomsk 634055, Akademicheskii av., 10/3, Russia
E-mail: ^abay@imces.ru*

Discusses the sources of error when ultrasonic measurements of meteorological measurements in the atmosphere: method related to the physics of ultrasound propagation in the atmosphere; radio signals that occur when recording and processing electrical

signals equipment, mechanical, due to the influence of the construction of the device on the wind flow and wrapping thanks to its temperature changes and others. Mathematical algorithms and methods are described that allow you to minimize measurement errors. The presentations are illustrated with materials from industrial development experience weather station АМК-03.

PACS: 43.28.Vd

Keywords: ultrasonic weather stations, meteorological quantities, algorithms ultrasonic measurements, measurement errors.

Received 20.11.2014.

Сведения об авторе

Богушевич Александр Яковлевич — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник; тел.: (382-2) 49-18-85, e-mail: bay@imces.ru.