

Минимизация систематических погрешностей ультразвукового термометра, обусловленных временными задержками сигнала и температурными изменениями в конструкции

А.Я. Богушевич*

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН
634055, г. Томск, Академический пр., 10/3

Поступила в редакцию 7.07.2021 г.

Рассматривается совместное влияние на систематическую погрешность ультразвуковых измерений температуры неучтенной временной задержки прохождения сигнала между парами «излучатель–приемник звука» и температурных изменений расстояний между ними. Приводятся аналитические соотношения для оценивания рассматриваемой погрешности и результаты ее расчетов. Описывается метод градуировки подобных приборов в климатической камере с применением эталонных средств измерений, позволяющий более чем на порядок уменьшать влияние неучтенной временной задержки в диапазоне измеряемых температур от -70 до $+50$ °С.

Ключевые слова: ультразвуковой анемометр-термометр, ультразвуковая метеостанция, температура воздуха, погрешность измерений; sonic anemometer-thermometer, ultrasonic weather station, air temperature, measurement error.

Введение

Характерной особенностью ультразвуковых измерений компонент вектора скорости ветра \mathbf{v} и температуры воздуха T [1–3] является значительное превалирование в них систематических погрешностей над случайными ошибками [4]. Последние определяют порог чувствительности ультразвуковых анемометров-термометров (УАТ) к турбулентным пульсациям \mathbf{v} и T , и их среднеквадратические величины (σ) обычно имеют значения порядка $\sim 10^{-2}$ м/с и $\sim 10^{-2}$ К соответственно. Вследствие малости σ_v и σ_T , а также возможности повторения измерений с высокой частотой (до 100 Гц) эти приборы с 50-х гг. XX в. успешно применяются для исследований атмосферной турбулентности [5–19]. Современные изготовители промышленных УАТ [20–33] указывают, что их погрешности измерений намного больше, чем σ_v и σ_T . Это обусловлено тем, что в них систематические составляющие погрешностей Δv и ΔT существенно зависят от \mathbf{v} и T . Поэтому в технических характеристиках УАТ приводят максимальные значения Δv и ΔT для заявляемых диапазонов измерений \mathbf{v} и T .

Физическая основа ультразвуковых измерений температуры — зависимость скорости звука c в воздухе от абсолютного значения температуры T (в К), применяемая в УАТ как (см., например, [1–4, 11, 13]):

$$c \approx 20,067\sqrt{T_V}, \text{ м/с}, \quad (1)$$

где $T_V \approx c^2/402,7 \approx T(1+0,3192e/P)$ — виртуальная (или акустическая) температура; e — упругость водяного пара в воздухе, гПа; P — атмосферное давление, гПа. В (1) влияние e/P при отрицательных температурах в градусах Цельсия (T_C) пренебрежимо мало, но при $T_C > 0$ его уже следует учитывать в вычислениях T из T_V . Вследствие этого в УАТ иногда встраиваются датчики, измеряющие P и относительную влажность воздуха r , %. Получаемые в этом случае значения r применяются для вычислений e , например, по формуле из [34]:

$$e = 6,107^{m-2}r, \quad (2)$$

где $m = 7,665T_C/(243,33 + T_C)$.

Поскольку c в (1) зависит от T (в К), то при необходимости измерять T с погрешностью ΔT , например не более $\pm 0,3$ К, относительная погрешность $|\Delta T|/T \cdot 100$ в УАТ не должна превышать 0,1%. Это очень жесткое требование к измерениям, которое выполнимо для УАТ только при индивидуальной градуировке в климатической камере во всем диапазоне значений T , что заметно увеличивает их стоимость. Поэтому в промышленных метеостанциях, измеряющих только усредненные значения метеорологических параметров, обычно отказываются от применения ультразвука для оценивания T , используя его только для измерений \mathbf{v} . Более того,

* Александр Яковлевич Богушевич (bay@imces.ru).

даже в УАТ, предлагаемых для научных исследований, вместо T часто выдаются значения турбулентных пульсаций T_v .

В настоящей работе рассматривается совместное влияние на систематическую погрешность ΔT ультразвуковых измерений T неучтенной временной задержки Δt прохождения сигнала между парами «излучатель—приемник звука» и температурных изменений ΔS расстояний между ними S . Приводятся соотношения для оценивания рассматриваемой погрешности и результаты ее расчетов. Описывается метод градуировки УАТ в климатической камере с применением эталонных средств измерений (ЭСИ), позволяющий более чем на порядок уменьшать совместное влияние Δt и ΔS на ΔT в диапазоне измеряемых температур от -70 до $+50$ °С.

Этот метод успешно применяется ООО «Сибаналитприбор» [20] при серийном изготовлении УАТ, включаемых в состав ультразвуковых метеостанций АМК-03 [35, 36], АМК-04 и других [37, 38], разработанных совместно с ИМКЭС СО РАН. Он также использовался в экспериментальных комплексах, включающих по четыре УАТ: в АМК-03-4 [18], предназначенном для исследований пространственной структуры флуктуаций v и T и их градиентов, и в автономной метеостанции для арктических регионов «АрктикМетео» [39, 40]. Приводимые ниже численные оценки выполняются с учетом значений некоторых параметров УАТ из АМК-03, но они легко экстраполируются на другие подобные приборы.

Влияние задержки сигнала и температурных изменений конструкции

Аппаратурно измеряемое в УАТ время \hat{t} распространения акустического сигнала на расстоянии S между парами ультразвуковых датчиков отличается от истинного значения t на задержку сигнала $\tau = \hat{t} - t > 0$ (получаемые или используемые при измерениях T значения параметров здесь и ниже обозначаются символом $\hat{}$). Такая задержка возникает как в электронных схемах прибора, так и в большей степени при преобразовании электрического сигнала в звуковую волну (в источнике) и при ее обратном преобразовании в электрический сигнал (в приемнике). Значение τ обычно оценивают еще при разработке прибора и далее учитывают как поправку $\hat{\tau}$ к \hat{t} в виде $t = \hat{t} - \hat{\tau}$. При этом остается ее неучтенный остаток $\Delta t = \hat{\tau} - \tau$, который в отличие от $\hat{\tau}$ может принимать отрицательное значение.

Первичная (основная) градуировка УАТ заключается в установлении значений расстояний S_0 между всеми используемыми парами «источник—приемник звука» при температуре воздуха T_0 , фиксируемой ЭСИ. Далее, при измерениях v и T , полученные значения S_0 используются в вычислениях групповых скоростей звука $\hat{U} \approx S_0 / (\hat{t} - \hat{\tau})$ в разных

направлениях, аналитически связанных с v и T точной формулой геометрической акустики движущихся сред [4]:

$$U = \sqrt{c^2 - v_{\perp}^2} + v_q, \quad (3)$$

где v_q и v_{\perp} — продольная и поперечная компоненты v относительно направления от источника к приемнику. Нижний индекс 0 здесь и ниже обозначает, что значение параметра относится к условиям проведения первичной градуировки.

При требовании $|\Delta T|/T \cdot 100 \leq 0,1\%$ первичная градуировка должна обеспечивать оценку S_0 с погрешностью $\Delta S_0 \approx (S_0/2)(\Delta T/T_0) \leq \pm 0,1$ мм, что является сложной задачей. Поэтому нами было предложено ее программное решение [41]: вычисления S_0 из измерений \hat{t} в климатической камере с учетом значений T_0 , r_0 и P_0 , выдаваемых ЭСИ. Программное обеспечение АМК-03 (приложение «МЕТЕО 3.0» [42]) может работать в режиме, в котором оно вычисляет расстояния между всеми имеющимися парами «источник—приемник» по алгоритму

$$\hat{S}_0 = \frac{20,067\sqrt{T_0(1+0,3192e_0/P_0)}}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{t}_i - \hat{\tau}), \quad (4)$$

где для исключения случайной погрешности в \hat{S}_0 выполняется усреднение по n отсчетам \hat{t}_i за время более 1 мин (при частоте измерений времен прохождения сигнала t в АМК-03 $F_d = 80$ Гц, $n \geq 4800$).

Описанная первичная градуировка выполняется при комнатной температуре воздуха, обычно около $+20$ °С. Ее систематическая погрешность $\Delta S_0 = \hat{S}_0 - S_0$ определяется Δt и погрешностями ΔT_e , Δr_e и ΔP_e используемых ЭСИ:

$$\Delta S_0 \approx S_0/c_0 \Delta c_0 + c_0 \Delta t, \quad (5)$$

где $\Delta c_0 = \Delta c_{eT} + \Delta c_{er} + \Delta c_{eP}$ — погрешность вычисления скорости звука c_0 в камере; $\Delta c_{eT} \approx 10/\sqrt{T_0} \cdot \Delta T_e$, $\Delta c_{er} \approx 3,2 \cdot 6,107^{m-2} \sqrt{T_0}/P_0 \Delta r_e$ (см. (2)) и $\Delta c_{eP} \ll \Delta c_{er}$.

На испытательной станции ИМКЭС СО РАН [43] применяются климатические камеры типа КХТВ-1000 (для T от -60 до $+60$ °С и для r от 20 до 98%), КТК-800 (для T от -70 до $+90$ °С и для r от 10 до 95%), Mini Subzero MC-71 (для T от -80 до $+100$ °С) и ТВВ-1000 (для T от -70 до $+90$ °С и для P от 50 до 740 мм рт.ст.), а также следующие ЭСИ: многоканальный прецизионный измеритель температуры МИТ 8.10 ($\Delta T_e = \pm |0,0035 + 10^{-5} T|$ °С) с набором эталонных платиновых термометров сопротивления типа ПТСВ-2-3, термогигрометр ИВА-6Б с датчиком ДВ2ТСМ-3Т-2П-Б ($\Delta r_e = \pm 1\%$) и барометр образцовый БОП-1М-1 ($\Delta P_e = \pm 0,1$ гПа). При использовании этого оборудования в (5) $|\Delta c_0| \leq 4,2 \cdot 10^{-3}$ м/с, и поэтому первое слагаемое здесь имеет малую величину, которая для АМК-03, где $S_0 \approx 14$ см, не превышает $2 \cdot 10^{-3}$ мм. В итоге при описанной градуировке вместо физического расстояния S_0 измеряется параметр $\hat{S}_0 = S_0 + c_0 \Delta t$, где $c_0 |\Delta t| \ll S_0$.

Температурные изменения S линейных размеров конструктивных элементов УАТ описываются как $S = S_0[1 + \alpha(T - T_0)]$; α – коэффициент температурного расширения. Для применяемой в АМК-03 конструкции УАТ из нержавеющей стали справочное значение последнего $\alpha_0 \approx 1,1 \cdot 10^{-5} 1/K$, при котором $(S_0 - S)/S_0 \cdot 100$ в случае $T = -50^\circ C$ и $T_0 = +20^\circ C$ близко к 0,1%. Поэтому в вычислительных алгоритмах температурные изменения S нами также учитываются как

$$\hat{S} \approx \hat{S}_0 [1 + \hat{\alpha}(\hat{T} - T_0)], \quad (6)$$

где с учетом того, что $|\hat{T} - T|/T \ll 1$, вместо неизвестной истинной температуры T используется ее измеренное значение \hat{T} , а применяемое значение $\hat{\alpha}$ может отличаться от α на $\Delta\alpha = \hat{\alpha} - \alpha > 0$.

Отметим, что применение формул (2) и (6) требует реализации итерационного алгоритма вычислений T , поскольку в них используется неизвестное до измерений значение \hat{T} . В «МЕТЕО 3.0» эти вычисления повторяются до тех пор, пока абсолютная разность значений \hat{T} в соседних итерациях не станет сравнимой с порогом чувствительности прибора, то есть с $\sigma_T \sim 10^{-2} K$.

Аналитические соотношения для оценивания рассматриваемых погрешностей

В настоящей работе не рассматриваются погрешности измерений T , связанные с влиянием ветра на вычисляемые в УАТ значения групповых скоростей звука $\hat{U} \approx \hat{S}/(\hat{t} - \hat{\tau})$. К ним относятся ошибки, обусловленные погрешностями учета затенения ветрового потока конструктивными элементами прибора [4, 44, 45] и аналитического исключения в (3) нелинейного вклада в \hat{U} поперечной компоненты ветра v_{\perp} . При отсутствии ветра, например в климатической камере, $\hat{U} \equiv \hat{c}$, и общая формула для описания $\Delta T = \hat{T} - T$ следует только из (1):

$$\Delta T \approx T \left[\left(\frac{\hat{c}}{c} \right)^2 \frac{1 + 0,32e/P}{1 + 0,32\hat{e}/\hat{P}} - 1 \right], \quad (7)$$

где $c = S_0[1 + \alpha(T - T_0)]/t$ – истинная скорость звука в воздухе, отличающаяся от ее измеряемой величины \hat{c} ; \hat{e} – вычисленное из (2) по измеренным значениям \hat{t} и \hat{T} значение e . Здесь, учитывая (6) и равенства $\hat{S}_0 \approx S_0 + c_0\Delta\tau$, $\hat{t} - \hat{\tau} = t + \Delta\tau$ и $\hat{\alpha} = \alpha + \Delta\alpha$, также имеем дополнительное соотношение для (7):

$$\hat{c} \approx (S_0 + c_0\Delta\tau) \left[1 + (\alpha + \Delta\alpha)(\hat{T} - T_0) \right] / (t + \Delta\tau). \quad (8)$$

В соответствии с (2) погрешность вычисления упругости водяного пара $\Delta e = \hat{e} - e$ определяется погрешностями измерений относительной влажности Δr и температуры ΔT и может оцениваться как

$$\Delta e \approx e \left[\frac{\Delta r}{r} + \frac{1,255}{243,33 + T_C} \left(1 - \frac{T_C}{243,33 + T_C} \right) \Delta T \right], \quad (9)$$

где отношение e/r в (9) зависит только от T_C . Поэтому Δe при одних и тех же Δr и ΔT достигает максимального значения Δe_{\max} при наибольшей T_C . Например, при $T_C = +50^\circ C$ и $r = 100\%$ (в этом случае $e \approx 28,5$ гПа) из (9) получается $\Delta e \approx 28,5 (0,01\Delta r + 0,005\Delta T)$, что для АМК-03 (где $\Delta r \leq \pm 3\%$ и $\Delta T \leq \pm 0,3^\circ C$) соответствует $|\Delta e_{\max}| \leq 0,9$ гПа.

В приземной атмосфере $P \sim 1000$ гПа, а значения e даже в тропиках не превышают $22 \div 24$ гПа [34], т.е. всегда $e/P \ll 1$. Поскольку погрешность встраиваемого в АМК-03 датчика атмосферного давления ΔP , как и Δe_{\max} , составляет ~ 1 гПа, то в (7) с учетом $e/P \ll 1$ имеем $e/P - \hat{e}/\hat{P} \approx -[\Delta e - e/P\Delta P]/P \approx -\Delta e/P$. В итоге вместо (7) получается формула линейного приближения по e/P , в которой не учитывается ΔP :

$$\Delta T \approx T \left[(\hat{c}/c)^2 (1 - 0,32/P\Delta e) - 1 \right]. \quad (10)$$

Поскольку $t_0 = S_0/c_0$ – время прохождения сигнала между излучателем и приемником при первичной градуировке УАТ, то с учетом (8) для \hat{c}/c в (7) и (10) можно записать физически наглядное выражение

$$\hat{c}/c \approx \frac{1 + \Delta\tau/t_0}{1 + \Delta\tau/t} \cdot \frac{1 + (\alpha + \Delta\alpha)(\hat{T} - T_0)}{1 + \alpha(T - T_0)}. \quad (11)$$

Здесь справа первый множитель описывает влияние на ΔT неучтенной задержки сигнала $\Delta\tau$, а второй – ошибки $\Delta\alpha$ учета значения α . При этом если $T \rightarrow T_0$, то также $t \rightarrow t_0$ и, следовательно, $\hat{c}/c \rightarrow 1$. Поэтому из (7) и (10) следует, что при измерениях T , близкой к T_0 , погрешность ΔT , обусловленная $\Delta\tau < 0$ и $\Delta\alpha < 0$, мала даже при очень больших $|\Delta\tau|$ и $|\Delta\alpha|$. Наибольшее значение $|\Delta T|/T$ при одних и тех же $|\Delta\tau|$ и $|\Delta\alpha|$ наблюдается при максимальном $|T - T_0|$, т.е. на границах диапазона измерений T .

Для упрощенных (инженерных) оценок ΔT выражение (11) с учетом того, что $\alpha \sim 10^{-5}$ и $|\hat{T} - T|/T \ll 1$, можно линеаризовать относительно $|\Delta\tau|/t_0 \ll 1$, $|\Delta\tau|/t \ll \ll 1$, $|\Delta\alpha(T - T_0)| \ll 1$ и $\alpha|T - T_0| \ll 1$. При этом в (10) $(\hat{c}/c)^2 \approx 1 - 2\Delta\tau(1/t - 1/t_0) + 2\Delta\alpha \times (T - T_0)$, где $1/t - 1/t_0 = c/S_0/[1 + \alpha(T - T_0)] - c_0/S_0 \approx (c - c_0)/S_0$.

Поскольку $c - c_0 \approx 20(T^{1/2} - T_0^{1/2}) = 20(T - T_0)/\sqrt{T + T_0}$, то $(\hat{c}/c)^2 \approx 1 + 2(T - T_0)[\Delta\alpha - 20/S_0/(\sqrt{T + T_0})\Delta\tau]$. Подставляя последнее соотношение в (10), с учетом $\Delta e/P \ll 1$ имеем

$$\Delta T/T \approx 2(T - T_0) \left[\Delta\alpha - 20/S_0/(\sqrt{T + T_0})\Delta\tau \right] - 0,32/P\Delta e, \quad (12)$$

где T и T_0 в Кельвинах; $\Delta\alpha$ в $1/K$; S_0 в метрах; $\Delta\tau$ в секундах; P и Δe в гПа.

В (12) величина $1/(\sqrt{T + T_0})$ перед $\Delta\tau$ слабо зависит от T . Например, при $T = -50^\circ C$ и $T_0 = +20^\circ C$

она отличается от $1/(2\sqrt{T_0})$ только на 6,8%. Поэтому вместо (12) для инженерных расчетов можно также предложить формулу

$$\Delta T/T \approx 2(T-T_0) \left[\Delta\alpha - 10/S_0/\sqrt{T_0} \cdot \Delta\tau \right] - 0,32/P\Delta\epsilon. \quad (13)$$

Из (12) и (13) следуют те же выводы, что из (11). Кроме того, (12) и (13) дополнительно показывают, что значения $|\Delta T|/T$, обусловленные $\Delta\tau$ и $\Delta\alpha$, в линейном приближении по $|\Delta\tau|/t \ll 1$ и $|\Delta\alpha(T-T_0)| \ll \ll 1$ изменяются пропорционально удвоенной разности $|T-T_0|$. При этом, чем меньше S , тем больше при одних и тех же T и $\Delta\tau$ относительная погрешность измерений временных интервалов $\Delta\tau/t = c\Delta\tau/S$ и, следовательно, больше $|\Delta T|/T$. В (12) и (13) последнее отражается через значение числового коэффициента перед $\Delta\tau$. В АМК-03 $S_0 \approx 14$ см, и при $T_0 = +20^\circ\text{C}$ в (13) $S_0 \approx 4,2$. Это означает, что здесь чувствительность $|\Delta T|/T$ к $\Delta\tau$ более чем в 4 раза выше, чем к $\Delta\alpha$.

Результаты расчетов

Ниже приводятся результаты расчетов по формулам (10) и (11) отдельных составляющих погрешности ΔT , обусловленных значениями $\Delta\tau$ (рис. 1) и $\Delta\alpha$ (рис. 2). В них использовались значения параметров, типичные для УАТ в составе АМК-03: $S_0 = 14$ см, $\alpha_0 = 1,1 \cdot 10^{-5} \text{ 1/К}$ и $T_0 = +20^\circ\text{C}$. При этом учитывалось, что для АМК-03 величина $\Delta\tau = 10^{-5}$ с близка к значению периода ультразвуковых сигналов в УАТ с частотой ~ 100 кГц, а также, что такое $\Delta\tau$ приводит к значениям ΔT , близким к наблюдаемым для АМК-03 в климатической камере.

Результаты на рис. 1, где показаны значения ΔT , обусловленные $\Delta\tau$, приводятся для значений $\Delta\tau$ в диапазоне от -50 до $+50$ мкс (до 5 периодов сигнала). В относительных единицах $\Delta\tau/t$ этот диапазон при $T = -50^\circ\text{C}$ примерно равен $\pm 0,107$, а при $T = +50^\circ\text{C}$ равен $\pm 0,129$. Следовательно, при одинаковых $|T-T_0|$ и $\Delta\tau$ при $T > T_0$ наблюдаются большие значения $|\Delta T|$, чем при $T < T_0$. При этом отрицательная величина $\Delta\tau$ при одной и той же T приводит к большим $|\Delta T|$, чем такое же ее положительное значение. Поэтому возникающую в УАТ временную задержку τ выгоднее учитывать так, чтобы $\Delta\tau \geq 0$.

Из рис. 1 следует, что игнорирование задержки сигнала τ в УАТ может привести к громадным погрешностям $|\Delta T|$, наиболее заметно проявляющимся вблизи границ диапазона измерений T . Следует учитывать, что оценить точное значение τ затруднительно и, более того, оно разное даже в однотипных образцах УАТ вследствие технологического разброса параметров применяемых электронных компонент и ультразвуковых датчиков. Поэтому в АМК-03 оценка типичного значения τ выполняется только до величины, сравнимой с периодом сигнала. На рис. 1, а дополнительно приведены значения ΔT ,

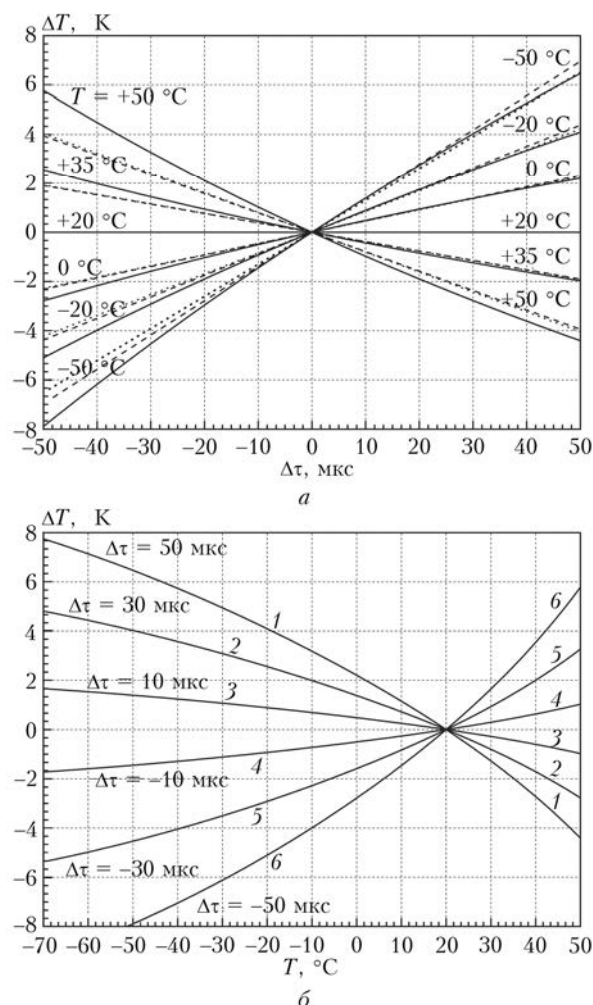


Рис. 1. Систематическая погрешность ΔT ультразвукового термометра, обусловленная $\Delta\tau$, при значениях параметров его первичной градуировки: $T_0 = +20^\circ\text{C}$, $r_0 = 80\%$, $S_0 = 14$ см и $\alpha_0 = 1,1 \cdot 10^{-5} \text{ 1/К}$: а – в зависимости от $\Delta\tau$ при разной T (штриховая линия – для данных в соответствии с (12), точки – для данных в соответствии с (13)); б – в зависимости от T при разных $\Delta\tau$

получаемые из инженерных формул (12) и (13), которые позволяют оценить границы их применимости. Нижняя граница температурного диапазона на измерений T на рис. 1, б расширена до -70°C (по сравнению с -50°C для АМК-03), чтобы показать возможность применения УАТ в арктических условиях, в том числе в составе метеостанции «АрктикМетео» [39, 40].

На рис. 2 приведены результаты аналогичных расчетов ΔT в зависимости от $\Delta\alpha$, где значения $\Delta\alpha$ задавались значительно больше, чем $\alpha_0 = 1,1 \cdot 10^{-5} \text{ 1/К}$, – до $2,2 \cdot 10^{-4} \text{ 1/К}$. Это позволяет рассмотреть погрешности ΔT за счет $\Delta\alpha$, сопоставимые по величине с приведенными на рис. 1, и оценить, при каких значениях $\Delta\alpha$ они возникают. Из сравнения рис. 2 с рис. 1 видно, что значения $|\Delta T|$, обусловленные $\Delta\tau$ и $\Delta\alpha$, зависят от температуры T подобным образом во всем диапазоне ее измерений.

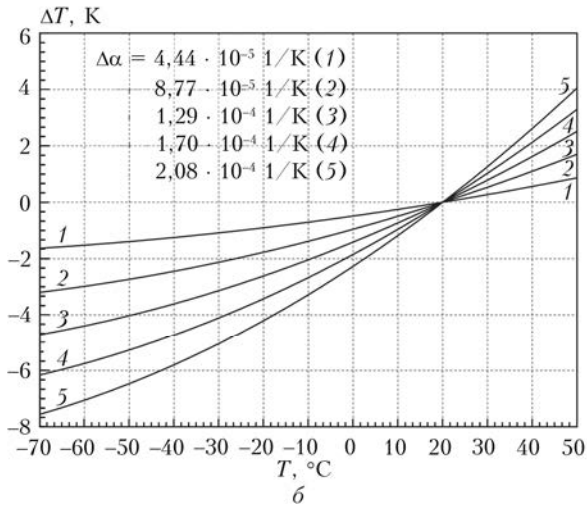
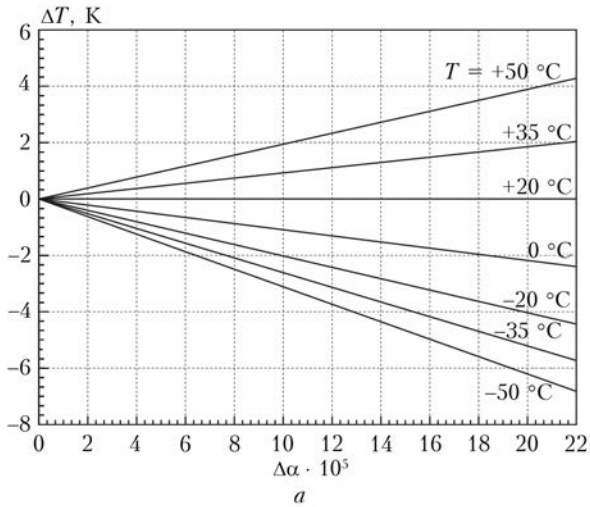


Рис. 2. Систематическая погрешность ΔT ультразвукового термометра, обусловленная $\Delta\alpha$, при значениях параметров его первичной градуировки $T_0 = +20^\circ\text{C}$, $r_0 = 80\%$, $S_0 = 14\text{ см}$ и $\alpha_0 = 1,1 \cdot 10^{-5}\text{ 1/}^\circ\text{K}$: *a* – в зависимости от $\Delta\alpha$ при разной температуре T ; *б* – в зависимости от T при разных $\Delta\alpha$

Если Δt и $\Delta\alpha$ совпадают по знаку, то их вклады в ΔT имеют противоположные знаки, что уменьшает суммарное значение $|\Delta T|$.

Рис. 3 показывает, как дополнительно влияет на суммарное значение ΔT необходимость учета в (1) величины e . Встраиваемый в УАТ датчик влажности имеет погрешность измерений Δr (в АМК-03 $\Delta r \approx \pm 3\%$), которая учитывалась здесь по формулам (9) и (10). Как и ожидалось, значения ΔT , обусловленные $\Delta r > 0$, при отрицательной температуре пренебрежимо малы при любых Δr . При увеличении положительной температуры значения ΔT начинают быстро возрастать и после $+30^\circ\text{C}$ могут превышать допустимую величину. В последнем случае этот датчик следует заменить на другой, с меньшим значением Δr .

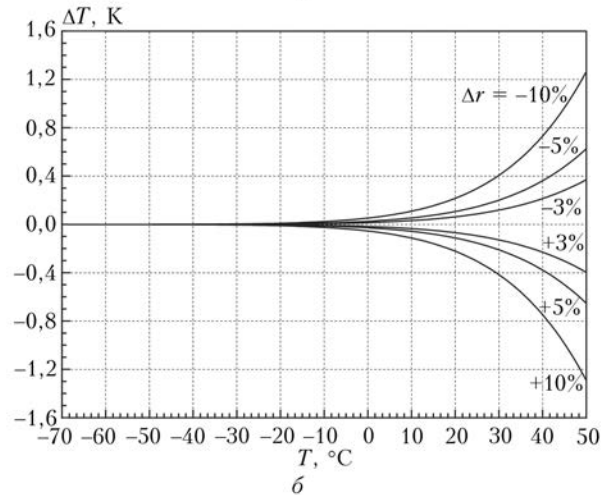
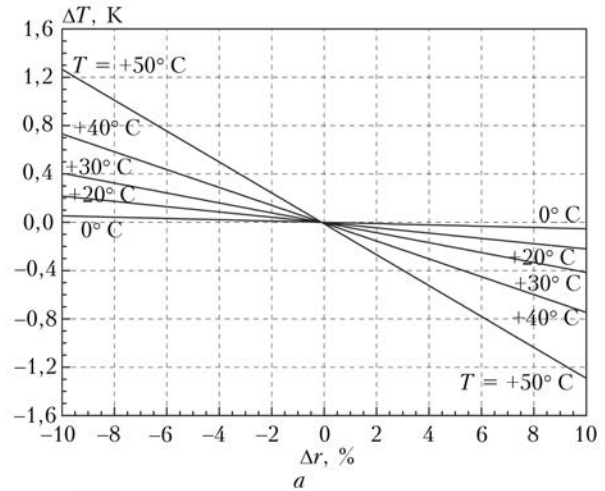


Рис. 3. Систематическая погрешность ΔT ультразвукового термометра, обусловленная Δr (при $r = 80\%$): *a* – в зависимости от Δr при разной температуре T ; *б* – в зависимости от T при разных Δr

Метод минимизации систематической погрешности измерений

Учитывая, что значения ΔT , обусловленные Δt и $\Delta\alpha$, могут иметь противоположные знаки и что при $|\Delta t|/t \ll 1$ и $|\Delta\alpha(T - T_0)| \ll 1$ они с точностью до знака аналогично зависят от T , нами был предложен метод минимизации их совместного влияния по всему диапазону измерений T . Он заключается в определении в климатической камере при $T = T_2$, близкой к нижней границе диапазона измерений, индивидуального для УАТ аналога коэффициента температурного расширения α_2 , подставляемого в (6), при котором вычисляемое значение \hat{T} будет совпадать с T_2 .

Для этой цели УАТ после первичной градуировки помещается вместе с эталонным измерителем температуры в металлический контейнер, который устанавливается внутри климатической камеры.

Контейнер необходим для полного отсекаания тепловых и ветровых потоков. Далее в камере устанавливается максимально низкая температура T_2 , обычно $-50\text{ }^\circ\text{C}$, при которой $|T_2 - T_0|$ максимальная и отсутствует влияние влаги на скорость звука c . После выдержки работающего УАТ при температуре $T_2 \sim 4\text{ ч}$ в программе «МЕТЕО 3.0» подбирается такое значение α_2 , при котором температура \hat{T} , вычисляемая ею из измеряемых величин \hat{t} , совпадает с T_2 . Этот метод имеет погрешность оценивания α_2 , величина которой обратно пропорциональна $|T_2 - T_0|$. Для АМК-03 $\alpha_2 = (4 - 8) \cdot 10^{-5}\text{ 1/K}$ и отличаются от α_0 в большую сторону. Это указывает на то, что здесь компенсируется вклад в ΔT неучтенной задержки Δt с положительным знаком, имеющей значение от одного до двух периодов ультразвукового сигнала.

Ниже приведены расчетные данные, полученные аналогично рис. 1 и 2, позволяющие оценить эффективность применения описанного метода минимизации ΔT . На рис. 4, *a* рассмотрен случай реальных для АМК-03 значений $\Delta t = 10\text{ мкс}$ и $\Delta\alpha = 4,44 \cdot 10^{-5}\text{ 1/K}$ ($\alpha_2 = 5,54 \cdot 10^{-5}\text{ 1/K}$) после градуировки УАТ при $T_0 = +20\text{ }^\circ\text{C}$ и $T_2 = -50\text{ }^\circ\text{C}$. Здесь показано, что хотя составляющие погрешности ΔT за счет указанных значений Δt (кривая 1) и $\Delta\alpha$ (кривая 2) в диапазоне T от -70 до $+50\text{ }^\circ\text{C}$ могут достигать абсолютных значений $\sim 1,7\text{ К}$, суммарное их значение близко к нулю и возрастает только при $T > +35\text{ }^\circ\text{C}$ (до $0,12\text{ К}$ для $T = +50\text{ }^\circ\text{C}$). Также на кривых 3*a* и 3*b* показано, как влияет на это суммарное значение ΔT использование датчика влажности с $\Delta r \approx \pm 3\%$.

На рис. 4, *b* приведены результаты расчетов только суммарной погрешности ΔT без учета влияния Δr при других значениях $\Delta t = 10, 20, 30, 40$ и 50 мкс и соответствующих им числовых значений $\alpha_2 = \alpha_0 + \Delta\alpha$, получаемых из вторичной градуировки при $T_2 = -50\text{ }^\circ\text{C}$. Из сравнения рис. 4, *b* с рис. 1, *b* видно, что с увеличением Δt описываемый метод минимизации ΔT продолжает эффективно работать, но достигаемый им результат ослабляется. Последнее связано с увеличением нелинейности зависимости от T вклада Δt в $\Delta T/T$.

Описанный метод минимизации ΔT допускает альтернативный вариант его реализации, когда в (6) используется фиксированное значение α , например α_0 , а при той же температуре T_2 подбирается такое значение \hat{t} , при котором $\hat{T} = T_2$. Этот вариант имеет существенный недостаток, связанный с тем, что после изменения значения \hat{t} следует снова выполнить первичную градуировку УАТ при температуре T_0 (повторно измерить $\hat{S}_0 = S_0 + c_0 \Delta t$), а затем опять уточнять значение \hat{t} при температуре T_2 . Чем больше будет проведено таких циклов, тем более точно будет определено \hat{t} . Процесс такой градуировки УАТ сильно затягивается по времени и поэтому при его промышленном изготовлении неприменим.

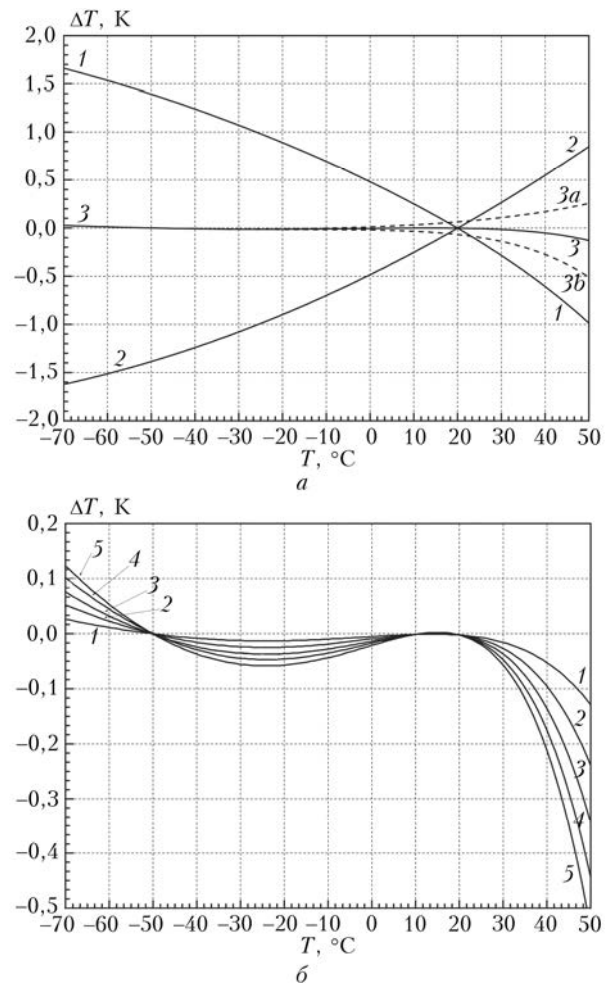


Рис. 4. Эффективность минимизации систематической погрешности ΔT ультразвукового термометра, обусловленной Δt и $\Delta\alpha$, при значениях параметров его первичной градуировки $T_0 = +20\text{ }^\circ\text{C}$, $r_0 = 80\%$, $S_0 = 14\text{ см}$ и $\alpha_0 = 1,1 \cdot 10^{-5}\text{ 1/K}$: *a* – влияние на ΔT : 1 – только $\Delta t = 10\text{ мкс}$; 2 – только $\Delta\alpha = 4,44 \cdot 10^{-5}\text{ 1/K}$; 3 – совместное влияние на ΔT величин $\Delta t = 10\text{ мкс}$ и $\Delta\alpha = 4,44 \cdot 10^{-5}\text{ 1/K}$; 3*a* и 3*b* – аналогично 3 с учетом $\Delta r = -3\%$ и $+3\%$; *b* – совместное влияние на ΔT величин Δt и $\Delta\alpha$ после вторичной градуировки при $T = -50\text{ }^\circ\text{C}$: 1 – $\Delta t = 10\text{ мкс}$ и $\Delta\alpha = 4,44 \cdot 10^{-5}\text{ 1/K}$; 2 – $\Delta t = 20\text{ мкс}$ и $\Delta\alpha = 8,67 \cdot 10^{-5}\text{ 1/K}$; 3 – $\Delta t = 30\text{ мкс}$ и $\Delta\alpha = 12,71 \cdot 10^{-5}\text{ 1/K}$; 4 – $\Delta t = 40\text{ мкс}$ и $\Delta\alpha = 16,56 \cdot 10^{-5}\text{ 1/K}$; 5 – $\Delta t = 50\text{ мкс}$ и $\Delta\alpha = 20,25 \cdot 10^{-5}\text{ 1/K}$

Однако этот вариант может оказаться полезным при создании нового УАТ для экспериментального установления его типового значения \hat{t} (с целью уменьшения Δt , см. рис. 4, *b*).

Заключение

Анализ и численные оценки совместного влияния на ультразвуковые измерения температуры T неучтенной временной задержки прохождения сигнала Δt между парами «излучатель–приемник звука» и изменений расстояний между ними, обусловленных коэффициентом температурного расширения α ,

показали, что игнорирование значений Δt и α приводит в УАТ к значительной систематической погрешности ΔT , наиболее сильно проявляющейся с увеличением границ диапазона измерений. Выявлено, что составляющие этой погрешности, обусловленные только Δt или α , могут иметь противоположные знаки и что они по абсолютной величине зависят от T подобным образом. Это позволило предложить и реализовать метод дополнительной градуировки УАТ в климатической камере с применением эталонных средств измерений, позволяющий более чем на порядок уменьшать ΔT в диапазоне измеряемых температур от -70 до $+50$ °С.

Настоящая работа выполнена по государственному заданию ИМКЭС СО РАН.

1. *International standard: ISO 16622:2002. Meteorology – Sonic anemometers/thermometers – Acceptance test methods for means wind measurements.* URL: <https://iso.org/standard/29291.html> (last access: 7.06.2021)
2. *Богушев А.Я.* Ультразвуковые методы оценивания метеорологических и турбулентных параметров атмосферы // *Оптика атмосфер. и океана.* 1999. Т. 12, № 2. С. 170–175.
3. *Тихомиров А.А.* Ультразвуковые анемометры и термометры для измерений пульсаций скорости и температуры воздушных потоков. Обзор // *Оптика атмосфер. и океана.* 2010. Т. 23, № 7. С. 585–600.
4. *Богушев А.Я.* Источники погрешностей при ультразвуковых измерениях метеовеличин в атмосфере, методы и алгоритмы их минимизации на основе опыта создания промышленной метеостанции АМК-03 // *Ученые записки физ. ф-та Моск. ун-та.* 2014. № 6. С. 14308. [Электронный ресурс]. URL: <http://uzmu.phys.msu.ru/abstract/2014/6/14308/> (дата обращения: 29.06.2021).
5. *Barrett W., Suomi E.* Preliminary report on temperature measurement by sonic means // *J. Meteorol.* 1949. V. 6, N 4. P. 273–276.
6. *Фатеев Н.П.* Акустический метод измерения температуры воздуха // *Тр. ГГО.* 1955. Вып. 52. С. 114.
7. *Schotland R.M.* The measurement of wind velocity by sonic means // *J. Meteorol.* 1955. V. 12, N 4. P. 386–390.
8. *Гурвич А.С.* Акустический микроанемометр для исследования микроструктуры турбулентности // *Акустич. журн.* 1959. Т. 5, вып. 3. С. 368–369.
9. *Kaimal J.C., Businger J.A.* A continuous wave sonic anemometer-thermometer // *J. Appl. Meteorol.* 1963. V. 2, N 2. P. 156–164.
10. *Kaimal J.C., Wyngaard J.C., Haugen D.W.* Deriving power spectra from three-component sonic anemometer // *J. Appl. Meteorol.* 1968. V. 7, N 5. P. 827–837.
11. *Kaimal J.C., Gaynor J.E.* Another look at sonic thermometry // *Bound. Lay. Meteorol.* 1991. V. 56. P. 410–418.
12. *Mitsuta Y.* Sonic anemometer-thermometer for general use // *J. Meteorol. Soc. Japan.* 1966. V. 44, N 1. P. 12–23.
13. *Hanafusa T., Fujitani T., Kobo Y., Mitsuta Y.* A new type sonic anemometer-thermometer for field operation // *Meteorol. Geophys.* 1982. V. 33. P. 1–19.
14. *Businger J.A., Miyake M., Dyer A.J., Bradley E.F.* On the direct determination of the turbulent heat flux near the ground // *J. Appl. Meteorol.* 1967. V. 6, N 6. P. 1025–1032.
15. *Антошкин Л.В., Емалеев О.Н., Лукин В.П., Сукопкина В.М., Хацко В.В., Янков А.П.* Аппаратура для метеорологических исследований в атмосфере // *ПТЭ.* 1986. № 3. С. 240–241.
16. *Патрушев Г.Я., Ростов А.П., Иванов А.П.* Автоматизированный ультразвуковой анемометр-термометр для измерений турбулентных характеристик в приземном слое атмосферы // *Оптика атмосфер. и океана.* 1994. Т. 7, № 11–12. С. 1636–1638.
17. *Ростов А.П.* Ультразвуковой комплекс для исследования пространственно-временных характеристик полей ветра и температуры // *Оптика атмосфер. и океана.* 1999. Т. 12, № 2. С. 154–158.
18. *Азбукин А.А., Богушев А.Я., Лукин В.П., Носов В.В., Носов Е.В., Торгаев А.В.* Аппаратно-программный комплекс для исследований структуры полей турбулентных флуктуаций температуры и ветра // *Оптика атмосфер. и океана,* 2018. Т. 31, № 5. С. 378–384; *Az-bukin A.A., Bogushevich A.Ya., Lukin V.P., Nosov V.V., Nosov E.V., Torgaev A.V.* Hardware-software complex for studying the structure of the fields of temperature and wind turbulent fluctuations // *Atmos. Ocean. Opt.* 2018. V. 31, N 5. P. 479–485.
19. *Nosov V., Lukin V., Nosov E., Torgaev A., Bogushevich A.* Measurement of atmospheric turbulence characteristics by the ultrasonic anemometers and calibration processes // *Atmosphere.* 2019. V. 10, N 8. P. 460. DOI: 10.3390/atmos10080460.
20. URL: <http://meteosap.ru/> (last access: 29.06.2021).
21. URL: <https://metek.de/product-group/sonic-anemometer> (last access: 29.06.2021).
22. URL: <http://gill.co.uk/> (last access: 29.06.2021).
23. URL: <https://biral.com/pcat/ultrasonic-sensors/> (last access: 29.06.2021).
24. URL: <http://vaisala.com> (last access: 29.06.2021).
25. URL: <https://youngusa.com/product/responseone-ultrasonic-anemometer/> (last access: 29.06.2021).
26. URL: <http://belfortinstrument.com/ambient-meteorological/wind/> (last access: 29.06.2021).
27. URL: <http://climatronics.com/Applications/Sensors-and-Components/index.php> (last access: 29.06.2021).
28. URL: <https://atmos-meteo.com/mesure/instruments-de-meteorologie.html> (last access: 29.06.2021).
29. URL: <https://fttechnologies.com/wind-sensors/ft7-series/> (last access: 29.06.2021).
30. URL: <https://campbellsci.com/heat-vapor-co2-flux> (last access: 29.06.2021).
31. URL: <https://thiesclima.com/de/Produkte/Wind-Ultraschall-Anemometer/> (last access: 29.06.2021).
32. URL: <http://typhoon-tower.obninsk.org/ru/ADAT3M.html> (last access: 29.06.2021).
33. URL: <https://adventspb.ru/napravleniia-deiatel-nosti/analiticheskie-i-izmeritel-nye-pribory/komplekt-meteorologicheskii-avtomatizirovannyi/> (last access: 29.06.2021).
34. *Атмосфера.* Справочник. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 512 с.
35. *Азбукин А.А., Богушев А.Я., Ильичевский В.И., Корольков В.А., Тихомиров А.А., Шелевой В.Д.* Автоматизированный ультразвуковой метеорологический комплекс АМК-03 // *Метеорол. и гидрол.* 2006. № 11. С. 89–97.
36. *Азбукин А.А., Богушев А.Я., Корольков В.А., Тихомиров А.А., Шелевой В.Д.* Полевой вариант метеорологического комплекса АМК-03 // *Метеорол. гидрол.* 2009. № 2. С. 101–106.
37. *Тихомиров А.А., Корольков В.А., Богушев А.Я., Азбукин А.А., Шелевой В.Д.* Бортовой метеорологический комплекс на базе многоцелевых гусеничных и колесных машин // *Вестн. Академии воен. наук.* 2008. Т. 24, № 3. С. 144–148.

38. Азбукин А.А., Богушевич А.Я., Кобзев А.А., Корольков В.А., Тихомиров А.А., Шелевой В.Д. Автоматические метеостанции АМК-03 и их модификации // Датчики и системы. 2012. № 3. С. 42–52.
39. Korolkov V.A., Bogushevich A.Ya., Kalchikhin V.V., Kobzev A.A., Kurakov S.A., Pustovalov K.N., Telminov A.E., Tikhomirov A.A., Petrov D.V. Experimental prototype of automatic weather station Arctic-Meteo // Proc. SPIE. V. 11560. DOI: 10.1117/12.2575822.
40. Korolkov V.A., Kobzev A.A., Tikhomirov A.A., Telminov A.E., Pustovalov K.N., Bogushevich A.Ya., Kalchikhin V.V., Kurakov S.A. Automatic weather station ArcticMeteo. First field test results // Proc. IOP. Conf. Ser.: Earth and Environ. Sci. 2020. V. 611. P. 012053. DOI: 10.1088/17551315/611/1/012053.
41. Богушевич А.Я. Программное обеспечение ультразвуковых метеостанций для целей исследования атмосферной турбулентности // Оптика атмосф. и океана. 1999. Т. 12, № 2. С. 176–180.
42. Ультразвуковая метеостанция, версия 3.0 («МЕТЕО 3.0»): Свидетельство об офиц. рег. прогр. для ЭВМ № 2002612038. Роспатент / Богушевич А.Я.; Заявл. 3.12.2002.
43. URL: <http://meteosap.ru/services/ispytaniya-izdelij> (last access: 29.06.2021).
44. Wyngard J.C., Zhang S.F. Transducer-shadow effects on turbulent spectra measured by sonic anemometers // J. Atmos. Ocean. Technol. 1985. V. 2, N 12. P. 548–558.
45. Wieser A., Fiedler F., Corsmeier U. The influence of design on wind measurements with sonic anemometer systems // J. Atmos. Ocean. Technol. 2001. V. 18, N 10. P. 1585–1608.

A.Ya. Bogushevich. Minimization of systematic errors of the sonic thermometer due to signal time delays and temperature changes in the design.

The joint influence on the systematic error of sonic temperature measurements of the unaccounted time delay of signal transmission between sound transmitter–receiver pairs and temperature changes in the distances between them is considered. Analytical relations for estimating the considered error and the results of its calculations are given. The method of calibration of such devices in a climate chamber with the use of reference measuring instruments is described, which allows one to reduce this influence by more than an order of magnitude in the range of measured temperatures from -70 to $+50$ °C.