

Ультразвуковые анемометры и термометры для измерения пульсаций скорости и температуры воздушных потоков. Обзор

А.А. Тихомиров*

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

Поступила в редакцию 15.02.2010 г.

Представлены принципы действия и история развития ультразвуковых анемометров-термометров. Приведены характеристики более 40 моделей приборов, выпускаемых ведущими фирмами мира. Анализ иллюстрируется фотографиями и таблицами, включающими диапазоны измеряемых величин, погрешности измерений, частоты опроса датчиков, условия эксплуатации, массогабаритные характеристики, параметры электропитания и др. Кратко рассмотрены вопросы метрологического обеспечения таких приборов.

Ключевые слова: измерение, воздушные потоки, скорость, направление, температура, пульсации, ультразвуковые анемометры и термометры, технические характеристики; measurement, air flows, speed, direction, temperature, fluctuations, ultrasonic anemometers and thermometers, specifications.

Введение

При распространении лазерных пучков в приземной атмосфере большое воздействие на них оказывают пульсации ветра и температуры воздуха [1], на которые, в свою очередь, сказывается динамическое и тепловое влияние подстилающей поверхности. Выделяемая в приземном слое атмосферы (ПСА) высокочастотная турбулентная (пульсационная) составляющая метеорологической величины $\xi(x, t)$ является пространственно-временной функцией и считается квазистационарным случайным процессом [2]. Частотный спектр этих величин может составлять десятки герц. Измерения пульсационных характеристик метеорологических величин в одной точке позволяют определять вертикальные потоки тепла, влаги и импульса в ПСА [3], которые влияют на флуктуации показателя преломления воздуха, что в конечном итоге отражается на работе оптических систем в атмосфере [4].

Информация о трехмерных потоках и турбулентности полей метеорологических величин, получаемая в малых временных и пространственных масштабах, необходима для описания ПСА. Эта информация должна представляться не только осредненными во времени значениями, но и турбулентными флуктуациями этих величин, которые дают вклад в образование, перенос, распространение и диссипацию процессов, происходящих в ПСА [1, 3].

Из всех существующих в настоящее время измерительных средств ультразвуковой анемометр/тер-

мометр (УЗА/Т) является наиболее подходящим инструментом для проведения измерений, необходимых для описания ПСА, поскольку позволяет одновременно измерять мгновенные значения скорости, направления и температуры воздушного потока в месте своего расположения с частотой опроса датчиков до 200 Гц. Краткий обзор УЗА/Т, выпускаемых в настоящее время, был сделан автором в [5].

Достоинством УЗА/Т является то, что он не имеет механических движущихся частей, достаточно устойчиво работает в неблагоприятных погодных условиях, что в значительной степени упрощает условия его эксплуатации. Многие модели УЗА измеряют вертикальную составляющую скорости ветра, которая характеризует градиентные характеристики ПСА. Широкий коммерческий выпуск УЗА/Т в последние два десятилетия способствовал разработке соответствующего международного стандарта ISO 16622:2002 [6].

1. Потоки тепла, влаги и импульса и турбулентность в ПСА

Следуя [2], приведем выражения для вертикальных потоков тепла H , влаги E и импульса τ , которые характеризуют пульсационные характеристики атмосферных процессов, являясь смешанными моментами метеорологических величин:

$$H = c_p \rho \langle w'T' \rangle; \quad (1)$$

$$E = \rho \langle q'w' \rangle; \quad (2)$$

$$\tau = -\rho \langle u'w' \rangle. \quad (3)$$

* Александр Алексеевич Тихомиров (tikhomirov@imces.ru).

Штрихом обозначены мгновенные значения; знак «угловые скобки» – символ статистического временного усреднения; c_p – удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении; ρ , T и q – плотность, температура и влажность воздуха соответственно; w и u – вертикальная и горизонтальная компоненты скорости ветра V . Часто в скорости горизонтального ветра выделяют широтную u и меридиональную v компоненты. Уровень (интенсивность) турбулентности I_t и полная энергия флуктуаций скорости ветра E_v определяются как

$$I_t = \sqrt{\sigma_u^2 + \sigma_v^2 + \sigma_w^2} / \langle V \rangle; \quad (4)$$

$$E_v = (\sigma_u^2 + \sigma_v^2 + \sigma_w^2) / 2, \quad (5)$$

где σ_i^2 – дисперсии турбулентных пульсаций соответствующих компонент вектора скорости ветра; $\langle V \rangle$ – среднее значение скорости ветра.

Измерив u' , v' , w' и T' , можно определить также ряд структурных постоянных флуктуаций [1, 4] температуры

$$C_T^2 = \langle [T'(t + \Delta t) - T'(t)]^2 \rangle \langle (V_m) \Delta t \rangle^{-2/3} \quad (6)$$

и оптического показателя преломления атмосферного воздуха

$$C_{no}^2 = \left[2 \cdot 10^{-6} \langle p \rangle / \langle T_k \rangle^2 (77,6 - 0,584 \lambda^{-2}) \right]^2 C_T^2, \quad (7)$$

где $\langle V_m \rangle$ – модуль среднего вектора скорости ветра; Δt – временной интервал между измерениями мгновенных значений метеорологических величин (десятки миллисекунд); $\langle V_m \rangle \Delta t = r$ – расстояние, эквивалентное временному интервалу Δt [2]; p – давление в миллибарах; T_k – температура, К; λ – длина волны излучения, мкм.

2. Принцип действия и основные соотношения для УЗА/Т

Первые термоанемометры использовали аналоговую технику обработки ультразвуковых (УЗ) сигналов [3]. Быстрое развитие вычислительной техники в конце XX в. позволило упростить многие схемные решения. Современный УЗА содержит, как минимум, пару преобразователей (излучателей/приемников) и измерительную цепь для определения времени распространения УЗ-волны на малом пути L (10...25 см) между преобразователями (рис. 1).

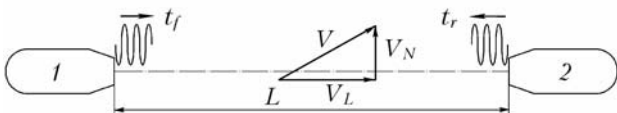


Рис. 1. Принцип работы УЗА: 1, 2 – УЗ-преобразователи сигналов

Наиболее широкое применение в УЗА получил импульсный метод, когда УЗ-преобразователи 1 и 2

попеременно излучают и принимают короткие импульсы с несущей частотой 20...200 кГц. Схема позволяет определить продольную составляющую скорости ветра V_L при измерении времен распространения УЗ-волны в прямом t_f (от излучателя 1 к приемнику 2) и обратном t_r (от излучателя 2 к приемнику 1) направлениях вдоль пути L :

$$V_L = L(1/t_f - 1/t_r)/2. \quad (8)$$

Эти времена зависят от скорости c распространения звука в атмосфере и поперечной к направлению распространения компоненты скорости ветра V_N [7, 9]:

$$t_f = L / (\sqrt{c^2 - V_N^2} + V_L), \quad (9)$$

$$t_r = L / (\sqrt{c^2 - V_N^2} - V_L). \quad (9a)$$

Дополнительно измерив компоненту V_N , можно определить скорость звука c в атмосфере:

$$c = \sqrt{[(L/2)/(1/t_f + 1/t_r)]^2 + V_N^2}. \quad (10)$$

В свою очередь, скорость c зависит от температуры воздуха T , парциального давления водяного пара e и атмосферного давления p [8, 9]:

$$c = 20,067 \sqrt{(1 + 0,3192e/p)T_k} \text{ м/с}, \quad (11)$$

где e и p измеряются в одних единицах; T_k – в кельвинах. В УЗ-термоанемометрии вводят понятие «звуковой» или «виртуальной» температуры [6, 8]:

$$T_S = T_k(1 + 0,3192e/p) = c^2/402,7. \quad (12)$$

Определив мгновенное значение скорости c по соотношению (10), можно рассчитать значение виртуальной температуры T_S по правой части соотношения (12). Этот метод имеет большое практическое значение для определения температурных флуктуаций в атмосфере.

В УЗА, измеряющих 3D-вектор скорости ветра, производят вычисление «векторного среднего» ветрового вектора V_V и его азимута α_V относительно системы координат УЗА в декартовой системе координат УЗА [6]:

$$V_V = \sqrt{(\langle u_a \rangle)^2 + (\langle v_a \rangle)^2 + (\langle w_a \rangle)^2} \quad (13)$$

и

$$\alpha_V = \arctg(\pm \langle v_a \rangle / \pm \langle u_a \rangle).$$

Здесь u_a – ветровая компонента, измеренная вдоль оси x УЗА; v_a – ветровая компонента, измеренная поперек оси x . Положительный знак u_a (при $v_a = 0$) соответствует $\alpha_V = 0^\circ$; положительный знак v_a (при $u_a = 0$) соответствует $\alpha_V = 90^\circ$.

Если от выходных данных УЗА требуется имитация отклика обычного анемометра («вертушки»), производят вычисление «скалярных средних» скорости U_S и азимута α_S ветра:

$$U_S = \sqrt{\langle u_a^2 + v_a^2 + w_a^2 \rangle}; \quad \alpha_S = \langle \arctg(\pm v_a / \pm u_a) \rangle. \quad (14)$$

Когда ветер дует только в направлении оси УЗА ($V_N = 0$), то определяется скорость ветра $V = V_L$. На таком принципе построены одномерные модели фирм Thies Clima [10] (рис. 2, а) и Kaijo Sonic Corporation [11] (рис. 2, б).

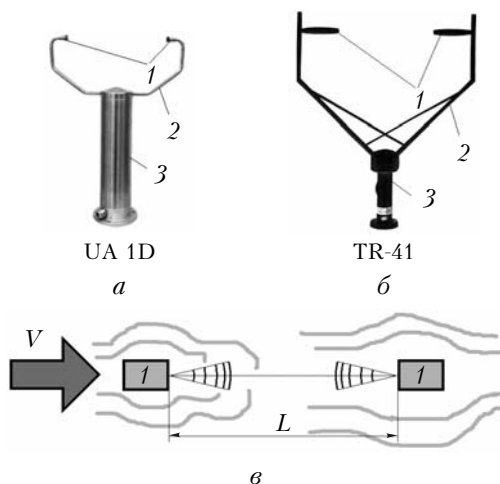


Рис. 2. Конструкции одномерных головок УЗА: а, б – внешний вид (1 – УЗ-преобразователи; 2 – поддерживающая арматура; 3 – цилиндрический стакан с электронным блоком (процессор)); в – искажение и экранирование воздушного потока

Следует отметить, что УЗ-преобразователи и поддерживающая арматура являются препятствием для воздушного потока, обтекающего анемометр. Они вызывают искажение и экранирование (затенение) потока, что приводит к соответствующему изменению отклика УЗА от истинного значения при измерении скорости ветра V [13]. Величина ослабления V зависит от размеров преобразователя и от его конструкции. Наибольшая погрешность измерений имеет место, когда направление V параллельно измерительному пути, т.е. когда весь путь распространения УЗ-волны находится в тени надветрового преобразователя (рис. 2, в). В этом случае ослабление скорости V может превышать 20%.

3. История разработки УЗА/Т

3.1. Схемы модуляции

Первые модели УЗА вычисляли времена t_f и t_r распространения ультразвука из фазового сдвига между непрерывными передаваемыми и принимаемыми сигналами. Этот метод в настоящее время не используется, так как УЗ-приемник чувствителен не только к сигналам, приходящим от излучателя, но и к сигналам от близко расположенных отражающих структур, а также к резким порывам ветра, когда фаза сигнала меняется скачком. Приборы, создаваемые в последние годы, используют импульсную модуляцию. Времена распространения t_f и t_r измеряют путем оценки либо огибающей УЗ-импульса (по превышению заданного порога), либо, чтобы повысить уровень точности, фазы несущей УЗ-частоты [12].

В первых моделях с импульсной модуляцией измеряли разность времен: $\Delta t = t_r - t_f$. Недостатком таких схем была зависимость вычисляемых значений скорости ветра от температуры и влажности воздуха. Создание систем, измеряющих полные времена распространения (t_f и t_r), позволило исключить это влияние, и в последних разработках измеряют непосредственно времена t_f и t_r .

3.2. Бистатические и моностатические системы

Первые УЗА представляли собой бистатические системы [3], когда на встречных путях работали две измерительные схемы (рис. 3).

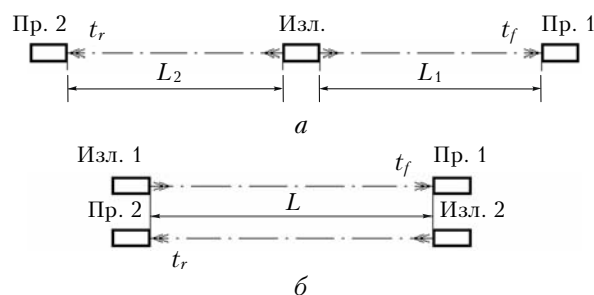


Рис. 3. Бистатические системы: а – с одним излучателем (Иzl.) и двумя приемниками (Пр.) на разных трассах; б – с двумя парами излучателей и приемников на одной трассе

Они имели недостаток, связанный с изменениями времени задержки в УЗ-преобразователях (излучателях и приемниках), например из-за загрязнения их поверхности, что приводило к уменьшению амплитуды сигнала и к дополнительной задержке во временах t_f и t_r .

Измеряемые в процессоре УЗА-времена составляют:

$$t'_f = t_f + \Delta t_1, \quad t'_r = t_r + \Delta t_2, \quad (15)$$

где t_f и t_r определяются соотношениями (9) и (9а); Δt_1 – суммарная схемная временная задержка в электронных цепях возбуждения преобразователя Изл. 1 и в цепях регистрации Пр. 1 (рис. 3, б), а Δt_2 – то же самое в цепях Изл. 2 и Пр. 2. Поскольку в общем случае $\Delta t_1 \neq \Delta t_2$, это в конечном итоге вызывает ошибку в измерениях скорости ветра по соотношению (8). Схема, приведенная на рис. 3, а, позволяет измерить время распространения УЗ-волн на разных путях (L_1 и L_2), что также влияет на точность измерения пульсационных характеристик ветра.

Моностатические системы с преобразователями, которые последовательно работают в режиме передачи и приема импульсов, стали дальнейшим прогрессом в развитии УЗА. Измерения времен t'_f и t'_r в этом случае менее чувствительны к загрязнению поверхности преобразователей из-за взаимности обмена функций излучения и приема; времена схемных задержек равны, т.е. $\Delta t_1 = \Delta t_2$, и скорость ветра по (8) определяется более точно.

3.3. Геометрия расположения УЗ-преобразователей

Процедура измерения горизонтальных компонент ветра обычно реализуется на двух ортогональных путях L_1 и L_2 по четырем направлениям распространения УЗ-импульсов (рис. 4).

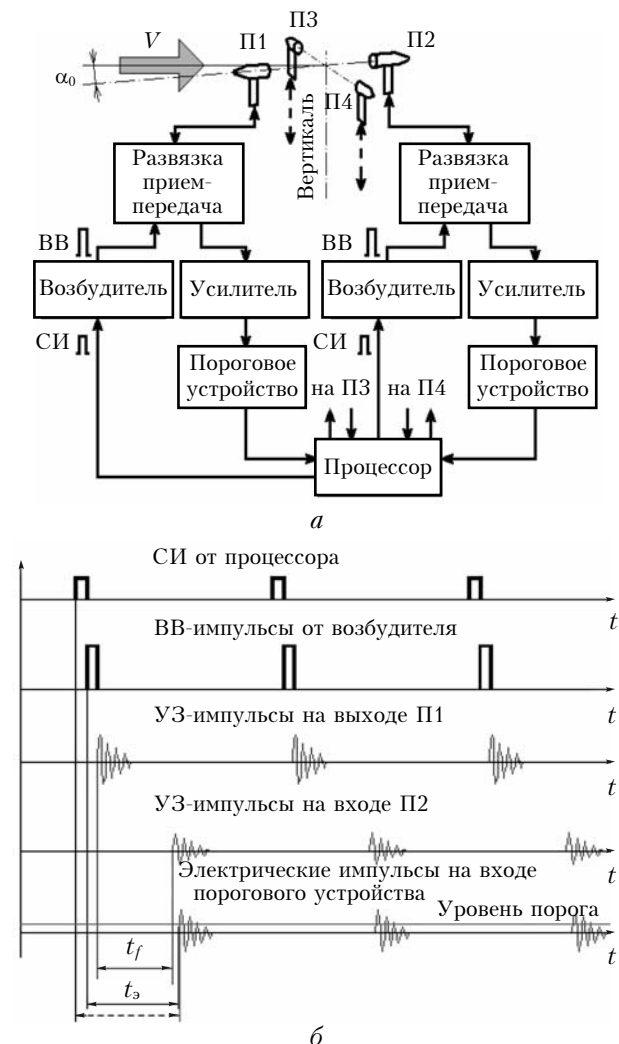


Рис. 4. Структурная схема УЗА для измерения скорости горизонтального ветра (а) и временная диаграмма работы (б)

При этом определяются две компоненты скорости ветра:

$$V_{Li} = L_i \left[\frac{1}{t_{fi}} - \frac{1}{t_{ri}} \right] / 2, \quad (16)$$

где $i = 1, 2$. На каждой паре измерительных путей L_1 и L_2 УЗ-преобразователи последовательно работают в режиме «излучение» – «прием».

Повышенная точность измерения значений скорости и направления ветра достигается при использовании более чем двух измерительных путей в горизонтальной плоскости (см. подп. 6.2). Для измерения вертикальной компоненты скорости ветра w используется трехмерная ориентация путей распространения УЗ-волн (см. разд. 7).

4. Моностатический импульсный УЗА

4.1. Принцип действия

Более детально принцип действия УЗА поясняет рис. 4. При подаче синхроимпульса (СИ) на левый (по схеме) возбудитель последний генерирует высоковольтный (ВВ) импульс, возбуждающий через устройство развязки пьезокерамику в преобразователе П1. При этом П1 излучает УЗ-импульс, который после распространения в воздухе поступает на преобразователь П2, где преобразуется в электрический сигнал и через устройство акустической развязки поступает на усилитель. После усиления, с помощью порогового устройства процессор измеряет полное время задержки $t_s = t_f$ [см. соотношение (15)] между началом СИ и моментом срабатывания порогового устройства (показано на рис. 4, б пунктиром).

Рис. 4, б поясняет возникающую системную задержку $\Delta t_1 = t_s - t_f$ между измеряемым временем прохождения сигнала по всей измерительной цепи t_s и временем распространения t_f УЗ-импульса на измерительном пути L_1 , которое определяется соотношением (9). Затем процессор запускает преобразователь П2 в режиме излучения и определяется время распространения t_r . После этого по соотношению (16) вычисляется компонента скорости ветра V_{L1} на пути L_1 . Аналогичным образом производится измерение компоненты скорости ветра V_{L2} на пути L_2 между преобразователями П3 и П4. Частота повторения синхроимпульсов F достигает 100 Гц, что и позволяет измерять пульсационные характеристики компонент ветра и температуры T_S .

4.2. Основные функции процессора УЗА

Современный УЗА/Т, как правило, включает в свой состав цифровой процессор, который выполняет следующие процедуры управления и обработки сигналов:

- управление работой преобразователей в режимах «излучение» и «прием» с заданной частотой F посылки УЗ-импульсов;
- коррекция измеренных времен t'_{fi} и t'_{ri} на системные задержки Δt_i для каждого пути L_i и каждого направления, сохраняемые в памяти процессора;
- вычисление ветровых компонент V_{Li} на соответствующих путях распространения в соответствии с уравнением (16);
- вычисление вектора ветра в декартовой (u, v, w) или в полярной системе (U_S, α_S) координат;
- выбор наименее возмущенных путей распространения УЗ для определения скорости и направления ветра, если резервные пути имеются в наличии;
- вычисление векторного среднего по (13) или скалярного среднего по (14) на заданном интервале времени $t_{\text{ср}}$;
- выдача на индикатор значений средней скорости ветра в различных форматах (цифровом и аналоговом);
- перерасчет компонент вектора ветра в желаемые координаты;

– вычисление скорости распространения звука c по соотношению (11);

– вычисление «виртуальной» (звуковой) температуры T_S по соотношению (12);

– передача в базу данных внешнего компьютера измеренных мгновенных значений метеорологических величин для хранения и последующей обработки.

4.3. Дополнительные функции процессора

Азимутальная коррекция. Вводимая электронная коррекция азимута УЗА при измерении направления ветра не требует обязательной ориентации главной оси УЗА на реальное северное направление.

Угломестная коррекция. Учет (с помощью датчиков-акселерометров) отклонения метеомачты от вертикали (при неточной первоначальной установке или под действием ветра) и введение соответствующих поправок в измеренные значения u , v и w .

Коррекция искажений потока конструкцией УЗА. Учет искажений и экранировок, вносимых поддерживающей арматурой, путем введения корректирующих коэффициентов, учитывающих направление ветра относительно главной оси УЗА [9, 13].

Автоматический контроль работоспособности УЗА/Т. Процессор может выдавать сигнал об ошибке измерений в нескольких случаях:

– принимаемый сигнал на одном или нескольких путях распространения L ниже порога детектирования. Это может быть временным явлением из-за больших препятствий на пути L (сажающиеся на УЗА/Т птицы) или постоянным (отказ одного их преобразователей);

– разница в скоростях c , измеренных на разных путях L , превышает заданный порог. Это может быть временным явлением, например из-за малых препятствий на одном или нескольких путях (насекомые, капли дождя, снежинки), или непрерывным из-за изменения длины пути L (деформация арматуры, поддерживающей УЗ-преобразователи).

5. Основные фирмы-разработчики и производители УЗА/Т

В настоящее время существует достаточно большое количество фирм-разработчиков и производителей УЗА/Т и ультразвуковых автоматических метеостанций (УАМС) на их основе. Большинство фирм представлено на сайте [14], но российские фирмы там отсутствуют. В табл. 1 приведены основные фирмы-разработчики и производители УЗА/Т (по странам фирмы расположены в алфавитном порядке). Вид выпускаемых моделей УЗА/Т и их характеристики представлены ниже. Кроме фирм-разработчиков

Таблица 1

Основные фирмы-разработчики и производители УЗА, УЗА/Т и УАМС на их основе

№ п/п	Фирма	Страна	Кол-во моделей (модификаций)	Примечание
1	Airmar Technology Corporation [15]	США	3 модификации	Все три – УАМС
2	Applied Technologies, Inc. [16]	США	7	В т.ч. одна УАМС
3	Campbell Scientific, Inc. [17]	США	1 + (1 + 1)	Также УЗА фирм пп. 6, 8
4	Climatronics Corporation [18]	США	3	Кроме того, несколько моделей УАМС
5	Met One Instruments Inc. [19]	США	1	–
6	R.M. Young Company [20]	США	4	–
7	FT Technologies Ltd. [21]	Великобритания	3	–
8	Gill Instruments Ltd. [22]	Великобритания	5	В т.ч. одна УАМС
9	МЕТЕК GmbH [23]	Германия	3	–
10	Thies Clima [10] (Adolf Thies GmbH & Co. KG)	Германия	4	–
11	Delta Ohm Srl. [24]	Италия	2	В т.ч. одна УАМС
12	Vaisala Oyj [25]	Финляндия	6	В т.ч. три УАМС
13	Kaijo Sonic Corporation [11] Sonic Corporation с 01.04.2009 [26]	Япония	8	–
14	ИМКЭС СО РАН [39, 40, 43]	Россия	3	В т.ч. две УАМС
15	ИОА СО РАН [12, 27]	Россия	2	В т.ч. одна УАМС
16	НПО «Тайфун» [28, 42]	Россия	3	В т.ч. одна УАМС
17	Belfort Instrument Company [29]	США	(2)	УЗА фирмы п. 8
18	Coastal Environmental Systems, Inc. [30]	США	(1 + 1)	УЗА фирм пп. 5, 12 и УАМС на их основе
19	NovaLynx Corporation [31]	США	(2 + 2)	УЗА фирм пп. 6, 8
20	Biral [32]	Великобритания	(3 + 3)	УЗА фирм пп. 8, 9
21	Environmental Measurements Ltd. [33]	Великобритания	(1 + 1)	УЗА фирм пп. 8, 12
22	Ammonit GmbH [34]	Германия	(3)	УЗА фирмы п. 8
23	Fischer Barometer [35]	Германия	(1)	УЗА фирмы п. 10
24	Theodor Friedrichs & Co. [36]	Германия	(2)	УЗА фирмы п. 9
25	Geonica SA [37]	Испания	(3 + 2 + 1)	УЗА фирм пп. 6, 8, 12
26	Atmos Sarl [38]	Франция	(2)	УЗА фирмы п. 6

Примечание. Цифры в скобках означают выпускаемые модели УЗА других фирм.

и производителей собственных моделей УЗА, имеются компании, выпускающие модели основных фирм (поз. 1–12). Производимые в этом случае модели УЗА выпускаются как под наименованиями фирм-разработчиков, так и под новыми наименованиями.

6. Измерение скорости и направления горизонтального ветра

6.1. УЗА/Т с ортогональным расположением преобразователей

Для измерения параметров горизонтального ветра выпускается достаточно много моделей УЗА, работа которых в основном соответствует описанной в разд. 4. Внешний вид приборов приведен на рис. 5, а характеристики – в табл. 2.

Представленные в табл. 2 параметры взяты с сайтов [10, 15, 16, 18–20, 22, 26, 32]. Ряд приборов обеспечивает также измерение «виртуальной» температуры, что отмечено в табл. 2 как «Измер. T_S ». В столбце «Электропитание» аббревиатура DC обозначает постоянный ток, AC – переменный. Габаритные размеры и масса относятся только к измерительным

головкам УЗА, изображенным на рис. 5. Для наглядности приборы показаны примерно в одном масштабе.

Рассматриваемые приборы можно разделить на две группы. Основную часть составляют модели, изображенные на рис. 5, а, в, д, е, ж–н. Их УЗ-преобразователи установлены на открытом воздухе и подвержены воздействию атмосферных осадков (дождя и снега). При этом геометрия расположения преобразователей соответствует рис. 4.

У второй группы УЗА/Т (WindSonic, UA Compact, LB 150, P/N 102751, P/N 102729) УЗ-преобразователи размещены в объеме между двумя плоскостями, через который проходит воздушный поток, т.е. под «крышей», защищающей их от прямого воздействия осадков. У этих УЗА/Т, кроме UA Compact (рис. 5, з), путь распространения УЗ-волн включает отражение от металлической поверхности «крыши» (WindSonic – рис. 5, б) или от нижней плоскости (остальные конструкции). То есть у конструкций, имеющих отражение УЗ-волн от металлической поверхности, вектор ветра всегда пересекает пути распространения УЗ-волн под углом. Это учитывается в расчетных формулах, использующих соотношение (16).

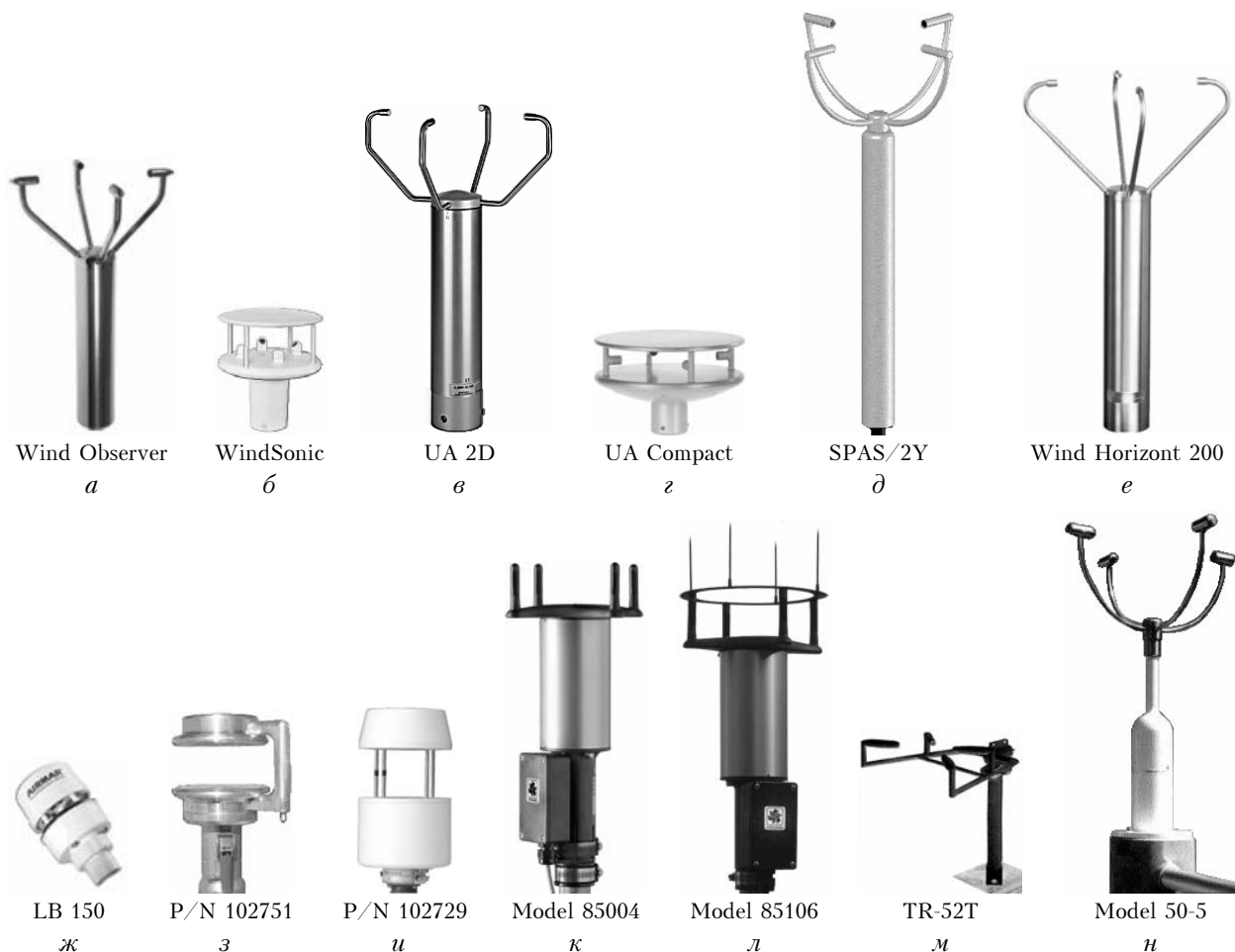


Рис. 5. Внешний вид УЗА для измерения горизонтального ветра. Модели фирм: а, б – Gill Instruments Ltd.; в, з – Thies Clima; д – Applied Technologies Inc.; е – Biral (METEK GmbH); ж – Airmar Technology Corporation; з, и – Climatronics Corporation; к, л – R.M. Young Company; м – Kaijo Corporation; н – Met One Instruments Inc.

Сравнительные характеристики УЗА/Т для измерения горизонтального ветра и температуры

Модель (внешний вид)	F, Гц	t _{уср} , с	Скорость ветра, м/с			Направление, град		Условия эксплуатации		Габариты, мм масса, кг	Электропитание	Примечание
			Диапазон	Разрешение	Погрешность	Диапазон	Погрешность	T, °C	r, %			
Wind Oserver (рис. 5, а)	1; 2; 4; 5; 8; 10	1...3600	0...65	0,01	±2%	0...359	±2 при 12 м/с	-40...+70	5...100	∅212×405 1,5	9...30 В, 40 мА, DC	Подогрев (75 Вт)
WindSonik (рис. 5, б)	1; 2; 4	*	0...60	0,01	±2%	0...359	±3 при 12 м/с	-35...+70	5...100	∅142×163 1,5	7...30 В, 15 мА, DC	—
UA 2D (рис. 5, в)	400	0,5... 6000	0...75	0,1	±0,1 (≤5) ±2% (>5)	0...360	±1	-40...+70	*	∅287×424 2,5	8...24 В, 2,5 Вт, DC	Подогрев (70 Вт) Измер. T _S
UA Compact (рис. 5, з)	200	0,01... 10	0,01...65	0,1	±0,2 (≤5) ±2% (>5)	0...360	±2	-40...+60	*	∅200×129 2	8...36 В, 1,2 Вт, DC	Подогрев (250 Вт) Измер. T _S
SPAS/2Y (рис. 5, д)	200	*	0...30	0,01	±0,01	0...359	0,1	-40...+60	*	∅239×600	9...18 В, 100 мА, DC	Подогрев
Wind Horizont 200 (рис. 5, е)	до 30	3600	0...60	0,01	±3%	0...360 0...540	±3	-40...+60	*	∅300×540 3,4	24 В, 125 мА, DC	Подогрев (60 Вт) Измер. T _S
LB 150 (рис. 5, ж)	*	*	5...40 0...5	0,1	±1 ±0,5	0...360	±3 ±6	-25...+55	10...95	∅72×130 0,285	9...16 В, <150 мА, DC	—
P/N 102751 (рис. 5, з)	2	*	0...65	0,1	±0,5	0...360	±2	-40...+60	0...100	164×127×180 <2,0	9...36 В, 35 мА, DC	Подогрев (350 Вт)
P/N 102729 (рис. 5, и)	2	*	0...65	0,1	±0,5	0...360	±5	-40...+60	0...100	∅102×203 1,0	9...36 В, 35 мА, DC	Подогрев (100 Вт)
Model 85004 (рис. 5, к)	*	*	0...70	0,1	±2%	0...360	±2	-50...+50	*	∅170×340 1,7	9...16 В, 30 мА, DC	Подогрев (60 Вт)
Model 85106 (рис. 5, л)	*	*	0...70	0,1	±2%	0...360	±2	-50...+50	*	∅170×390 1,7	9...16 В, 30 мА, DC	Подогрев (60 Вт)
TR-52T (рис. 5, м)	20	30...600	0...30	0,005	±1%	0...540	*	-20...+50	0...100	*	110/220 В AC 50/60 Гц	—
Model 50-5 (рис. 5, н)	3	*	0...50	0,1	±2%	0...360	±3	-30...+55	*	∅238×505 2,5	9...18 В, 10 мА, DC	Подогрев (50 Вт)
WS425 (рис. 6, а)	1	1...3600	0...65	0,1	±3%	0...360	±2	-55...+55	*	∅286×350 1,7	10...15 В, 12 мА, DC	Подогрев (25 Вт)
WS425 F/G (рис. 6, б)	1	1...30	0...85	0,1	±3%	0...360	±2	-62...+55	*	∅286×350 1,7	240 В, 50 Гц 150 Вт	Подогрев
WMT52 (рис. 6, в)	1, 2, 4	1...3600	0...60	0,1	±3% (≤35) ±5% (>35)	0...360	±3	-52...+60	0...100	∅139×114 0,51	5...32 В, 14 мА, DC	Подогрев

Примечание. Звездочка означает отсутствие данных.

Следует отметить, что в модификациях приборов фирмы Airmar Technology Corporation (рис. 5, ж) расстояние между металлическими плоскостями достаточно мало, что влияет на характеристики воздушного потока. Штыри на УЗА Model 85106 (рис. 5, л) предназначены для защиты от птиц. Подобный штырь небольшой высоты предусмотрен для установки в вершине цилиндра модели UA 2D (рис. 5, в).

Для обеспечения работоспособности УЗА/Т при низких температурах в большинстве конструкций предусматривается подогрев УЗ-преобразователей, что отмечено в табл. 2. На подогрев затрачивается боль-

ше энергии, чем на непосредственную работу прибора, связанную с излучением и приемом УЗ-волн.

По мнению автора обзора, верхние пределы измерения скорости ветра (60...75 м/с), представленные на сайтах фирм, являются завышенными.

6.2. УЗА с резервными путями

Отдельную группу представляют модели УЗА фирмы Vaisala [25] (рис. 6), характеристики которых также представлены в табл. 2.



Рис. 6. Внешний вид УЗА фирмы Vaisala

Конструкция этих УЗА по технологии WINDCAP® [41] предусматривает измерение скорости ветра с использованием резервных путей, при этом УЗ-преобразователи расположены в вершинах равностороннего треугольника (рис. 7, а).

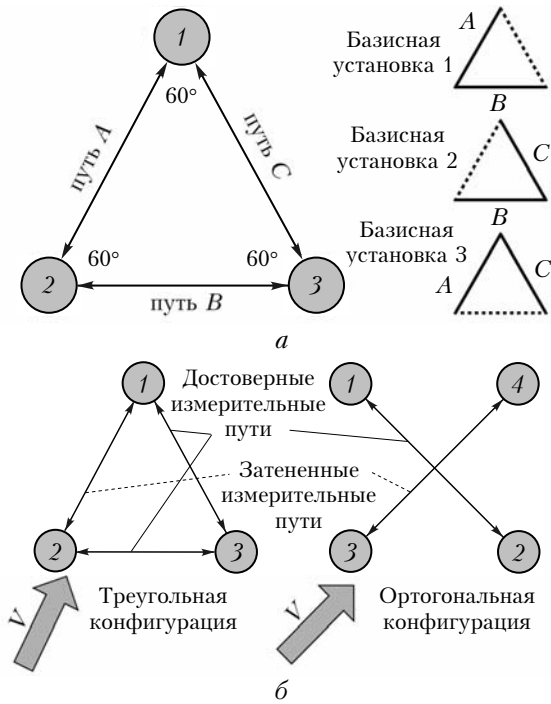


Рис. 7. Принцип работы УЗА фирмы Vaisala (а) и ее отличие от моделей УЗА с ортогональным расположением преобразователей (б): 1–4 – УЗ-преобразователи

Такая геометрия обеспечивает шесть измерительных направлений на трех путях (А, В, С) в горизонтальной плоскости. В течение односекундного интервала времени прибор измеряет три пары времен t_{fi} и t_{ri} на путях А, В, С. На основе этих значений рассчитываются три компоненты скорости и направления ветра на каждой из трех базисных установок (1, 2, 3). Это позволяет при расчете скорости ветра по соотношениям (16) исключать направления, находящиеся близко к направлению ветра V (рис. 7, б), на которые влияет затенение, создаваемое УЗ-преобразователями и поддерживающей арматурой. Затем используют два мало отличающихся значения векторов ветра (на достоверных измерительных путях – рис. 7, б), чтобы вычислить конечный результат измерений. УЗА с ортогональным расположением преобразователей требуют введения специальных поправочных коэффициентов, учитывающих влияние конструкции на измерения скорости ветра (см., например, [9, 13]).

Конструкция УЗА WMT52 предусматривает установку специальной штыревой насадки (см. рис. 6, д), защищающей от птиц. Для этой цели служат и центральные штыри в моделях WS425 и WS425 F/G.

6.3. УЗА на основе акустического резонанса

Разновидностью УЗА, измеряющих параметры горизонтального ветра, являются датчики фирмы FT Technologies Ltd. [21], действие которых основано на использовании акустического резонанса. Воздушный поток проходит между двумя плоскостями (рис. 8, а),

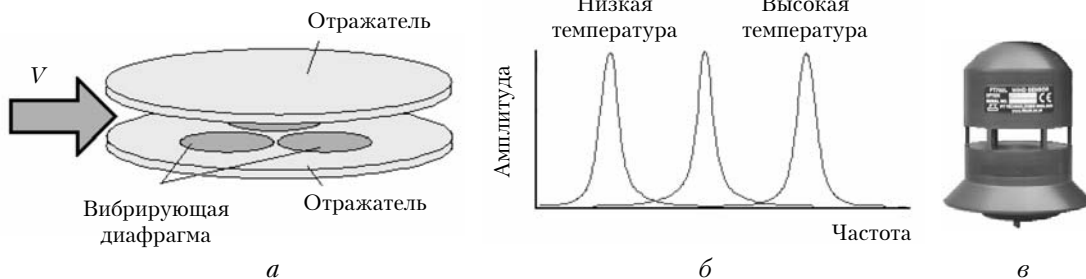


Рис. 8. УЗА на основе акустического резонанса: а – схема конструкции; б – температурная зависимость резонанса; в – внешний вид ветрового датчика FT702 LM

отражающими УЗ-волны, которые генерируются и принимаются с помощью трех вибрирующих диафрагм, связанных с соответствующим числом пьезоэлектрических элементов. Диафрагмы установлены в вершинах треугольника, и каждая из них создает поле УЗ-волн, которое в вертикальном сечении образует стоячую волну на резонансной частоте, а в горизонтальной плоскости — двумерную радиальную бегущую волну.

Измерение скорости воздушного потока основано на использовании бегущей волны. Разность фаз колебаний между любой парой диафрагм определяется скоростью воздушного потока вдоль оси пары. Измеряя разности фаз для всех трех пар диафрагм, можно определить компоненты вектора воздушного потока вдоль сторон треугольника, образуемого парами диафрагм. Из комбинации этих компонент определяют полную скорость и направление воздушного потока.

Прибор способен автоматически компенсировать изменения скорости c от температуры воздушного потока. При работе частота УЗ-волн автоматически подстраивается так, чтобы максимизировать принимаемый сигнал и попасть на резонанс при изменении температуры (рис. 8, б). При этом показания прибора становятся независимыми от скорости звука c . В итоге прибор обеспечивает линейную зависимость разности фаз от скорости воздушного потока в достаточно широком диапазоне изменений c .

Габариты прибора $\varnothing 70 \times 78$ мм, масса 0,2 кг. Диапазон измеряемых скоростей ветра 0...50 м/с при погрешности $\pm 4\%$. Погрешность определения направления ветра $\pm 2^\circ$.

7. Измерение скорости и направления трехмерного ветра

Размещение по крайней мере трех пар УЗ-излучателей/приемников в трехмерном пространстве обеспечивает измерение трехкомпонентного вектора скорости ветра. На рис. 9 представлены основные типы таких УЗА/Т (внешний вид приборов показан примерно в одном масштабе), а в табл. 3 приведены их характеристики. Часть УЗА/Т измеряют температуру T_S и скорость звука c , что отмечено в последнем столбце табл. 3.

Большой ряд УЗА/Т создан фирмой Applied Technologies Inc. [16]. Модель K Style (рис. 9, а) образована тремя парами УЗ-преобразователей, расположенными в трех ортогональных плоскостях, каждая из пар измеряет одну компоненту скорости ветра. Дальнейшее усовершенствование УЗА/Т было направлено на уменьшение габаритов и создание более жесткой конструкции (рис. 9, б–г). Экранирование горизонтального ветра поддерживающей арматурой — недостаток конструкций рис. 9, в, г. Все модели обеспечивают определение T_S и c .

Широкий спектр УЗА/Т выпускался фирмой Kaijo с 1980-х гг. (рис. 9, е–л) [9, 26]. Сейчас вы-

пускаются модификации моделей DA-600, SAT-500, WA-590 [26]. Модели (рис. 9, е–з) имеют длину пути $L = 20$ см, модель TR-62Т — 10 см. Модель TR-90Т предназначена для измерения турбулентных потоков в помещениях микроэлектронной техники, и у нее $L = 5$ см. Разработана также модель TR-92Т с $L = 3$ см. Модель SAT-500 имеет модификации, отличающиеся частотой F посылок (для SAT-550 $F = 50$ Гц).

Следующим шагом в разработке конструкций УЗА/Т стало размещение пар преобразователей таким образом, чтобы распространение УЗ-волн проходило через один локальный объем по наклонным путям (под углом $45\text{--}60^\circ$ к земной вертикали), остающимся преимущественно ортогональными друг к другу. Конструкции можно разделить на две группы — с основной центральноосевой поддерживающей арматурой (рис. 9, т, ф–и) и боковой: симметричной (рис. 9, ж, к–м, п–с), асимметричной (рис. 9, е, и, н) и смещенной (рис. 9, д, о, у). Последний вид обеспечивает наименьшие затенения для ветрового потока. Для уменьшения искажений, которые вносятся в воздушный поток электронным блоком, размещаемым в цилиндрическом стакане или в коробке, в ряде конструкций измерительная головка удалена от электронного блока на дополнительной штанге (рис. 9, к–о, р, у–ц, ю).

3D-УЗА фирмы Gill Instruments Ltd. [22] (рис. 9, м–о) кроме 3D-вектора V вычисляют скорость c , а T измеряется дополнительным платиновым термометром. Модели HS-100 (рис. 9, о) и CSAT3 [17] (рис. 9, у) предназначены для научных исследований атмосферной турбулентности, но их конструкция не обладает достаточной жесткостью.

Модели фирмы R.M. Young Company [20] (рис. 9, н, р) дополнительно вычисляют скорость c и T_S . Модификации этих моделей выпускает ряд фирм США и Германии (см. табл. 1). Фирма Biral выпускает модификации модели USA-1 фирмы Metek GmbH [23] под наименованиями Wind Professional и Wind Research [32]. Модель HD2003.1 [24] (рис. 9, с) имеет характеристики, аналогичные Model 81000, но превосходит их по диапазону измерения V .

НПО «Тайфун» выпускает опытные образцы УЗА АЦАТ-3 и АЦАТ-3М [28, 42] (рис. 9, и, ч). Модель ИОА СО РАН под условным названием «Ростов» [12] является экспериментальным образцом. Ее отличие от остальных рассматриваемых модификаций УЗА в том, что для более точного измерения разности времен t_f и t_r используется фазовый метод. Конструкции УЗА/Т (рис. 9, и, э, ю), в которых УЗ-преобразователи располагаются на двух ортогональных кольцах, имеют 4 пути распространения УЗ-волн, но построены по бистатической схеме, т.е. на каждом пути имеют одно направление распространения УЗ-волн.

В ряде моделей УЗА/Т зарубежных и отечественных фирм дополнительно установлены платиновые термометры для сопоставления измеряемых T

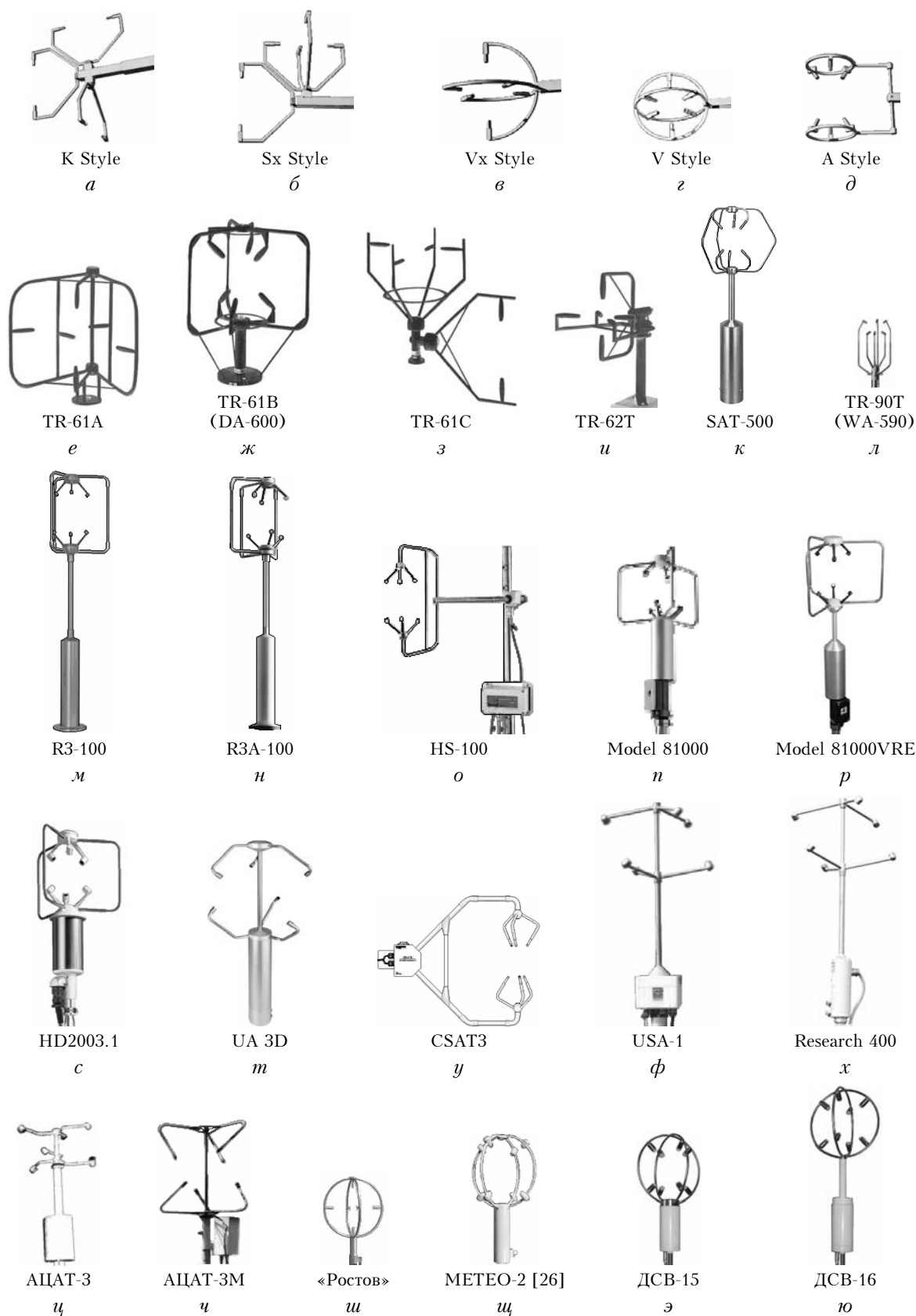


Рис. 9. Внешний вид УЗА для измерения трехкомпонентного вектора скорости ветра. Модели фирм: *а–д* – Applied Technologies Inc.; *е–л* – Kaijo (Sonic Corporation); *м–о* – Gill Instruments Ltd.; *п–р* – R.M. Young Company; *с* – Delta Ohm Srl.; *т* – Thies Clima; *у* – Campbell Scientific Inc.; *ф* – МЕТЕК GmbH; *х* – Biral; *ц–ч* – НПО «Тайфун»; *ш–щ* – ИОА СО РАН; *э–ю* – ИМКЭС СО РАН

Сравнительные характеристики УЗА/Т для измерения трехкомпонентного ветра и температуры

Модель (внешний вид)	F, Гц	t _{уср} , с	Скорость ветра, м/с			Направление, град		Условия эксплуатации		Габариты, мм масса, кг	Электро- питание	Приме- чание
			Диа- пазон	Разре- шение	Погреш- ность	Диа- пазон	Погреш- ность	T, °C	r, %			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
K Style (рис. 8, а)	200	до 300	0...30	0,01	0,03	0...359	±0,1	-40...+60	*	<u>254×330×406</u> <1,0	9...18 В, 100 мА, DC	Измер. T _S , c
Sx Style (рис. 8, б)	200	то же	то же	то же	то же	то же	то же	то же	*	<u>254×356×356</u> <1,0	то же	то же
Vx Style (рис. 8, в)	200	то же	0...20	то же	то же	то же	то же	то же	*	<u>254×254×254</u> <1,0	то же	то же
V Style (рис. 8, г)	200	то же	0...15	то же	то же	то же	то же	то же	*	<u>∅178</u> <1,0	то же	то же
A Style (рис. 8, д)	200	то же	0...60	то же	то же	то же	то же	то же	*	<u>126×226×196</u> <1,0	то же	то же
TR-61A (рис. 8, е)	20	30...600	0...30	0,005	±1%	0...540	*	-20...+50	0...100	<u>450×365×480</u>	100/115/220 В 50/60 Гц	Измер. T _S
TR-61B (DA-600) (рис. 8, ж)	20	то же	0...60	то же	то же	то же	*	то же	то же	<u>∅518×580</u>	то же	то же
TR-61C (рис. 8, з)	20	то же	0...30	то же	то же	то же	*	то же	то же	<u>380×560×550</u>	то же	то же
TR-62T (рис. 8, и)	20	то же	0...30	то же	то же	то же	*	то же	то же	*	то же	—
SAT-550 (рис. 8, к)	50	1...900	0...60	0,01	±2%	540	±3	-20...+50	0...100	<u>∅295×620</u> 1,5	12...24 В, 4 Вт, DC	Подогрев Измер. T _S
TR-90T (WA-590) (рис. 8, л)	10	*	0...10	0,005	±2%	*	*	0...40	0...80	<u>∅100×250</u> 0,64	12 В, 9 Вт, DC	—
R3-100 (рис. 8, м)	100	1...3600	0...45	0,01	< ±1%	0...359	< ±1%	-40...+60	5...100	<u>∅240×810</u> 1,7	9...30 В, 300 мА, DC	Измер. c
R3A-100 (рис. 8, н)	то же	то же	то же	то же	то же	то же	то же	то же	то же	то же	то же	то же
HS-100 (рис. 8, о)	100	*	0...45	то же	то же	0...360	то же	то же	то же	<u>120×300×344</u> 2,0	то же	то же
Model 81000 (рис. 8, п)	160	*	0...30 30...40	0,01	±1% ±3%	0...360	±2 ±5	-50...+50	*	<u>∅340×560</u> 1,7	12...24 В, 110 мА, DC	Измере- ние T _S
Model 81000VRE (рис. 8, р)	160	*	то же	то же	то же	то же	то же	то же	*	<u>∅340×560</u> 1,2	12...24 В, 110 мА, DC	Измер. T _S
HD2003.1R (рис. 8, с)	60; 60	3600	0...60	0,1	±1%	0...360	±1	-40...+60	0...100	<u>∅320×537</u> 1,5	5...30 В, <2 Вт, DC	Подогрев (6 Вт) Измер. T _S , c
UA 3D (рис. 8, м)	285	0,6... 6000	0,1...6 5	0,1	±0,2 (≤5) ±2% (>5)	0...360	±2	-40...+70	*	<u>∅300×600</u> 1,5	12...24 В, 3 Вт, DC	Подогрев (150 Вт) Измер. T _S , c
CSAT3 (рис. 8, y)	1...60	*	u, v: ±60 w: ±8±0,0005	±0,001 ±0,02	±0,04 ±0,02	*	*	-30...+50	*	<u>473×424×137</u> 1,7	10...16 В, 200 мА, DC	Измер. T _S , c
USA-1 (рис. 8, ф)	до 50	1800	0...60	0,01	±2%	0...360 0...540	±2	-40...+50	*	<u>∅320×690</u> 2,8	9...36 В, 2,5 Вт, DC	Подогрев (55 Вт) Измер. T _S
Research 400 (рис. 8, х)	50	3600	0...45	0,01	±2%	0...360	±2	-40...+50	*	<u>∅320×690</u> 2,8	9...36 В, 180 мА, DC	Измер. T _S

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
АЦАТ-3 (рис. 8, <i>у</i>)	12,5	*	0...40	0,05	*	0...360	±1	-50...+50	0...98	$\frac{190 \times 450 \times 450}{1,7}$	220 В, 50 Гц, 12 Вт	Подогрев (12 Вт)
АЦАТ-3М (рис. 8, <i>ч</i>)	12,5	*	0...55	0,05	*	0...360	±2	-50...+50	*	$\frac{\varnothing 370 \times 550}{4,0}$	220 В, 50 Гц, 12 Вт, АС	Подогрев (12 Вт)
«Ростов» (рис. 8, <i>ш</i>)	36	*	0...25	*	*	0...360	*	-30...+30	*	$\frac{\varnothing 245 \times 300}{2}$	12 В, 3 Вт, DC	На основе измере- ния раз- ности фаз
МЕТЕО-2 (рис. 8, <i>щ</i>)	10	*	0,2...30	0,02	±3%	0...360	±3	-40...+50	10...98	$\frac{\varnothing 240 \times 440}{2}$	220 В, 50 Гц, 12 Вт, АС	–
ДСВ-15 (рис. 8, <i>э</i>)	40 80	до 600	0...40	0,01	±2%	0...360	±4	-50...+55	0...100	$\frac{\varnothing 230 \times 380}{1,4}$	12 В, 4 Вт, DC	Измере- ние T_S
ДСВ-16 (рис. 8, <i>ю</i>)	40	до 600	0...40	0,01	±2%	0...360	±4	-50...+55	0...100	$\frac{\varnothing 230 \times 520}{1,9}$	12 В, 2 Вт, DC	Измере- ние T_S

Примечание. Звездочка означает отсутствие данных.

и $\langle T_S \rangle$. Современные модели УЗА/Т обеспечивают выдачу информации о скорости и направлении ветра, температуре и скорости звука в различных форматах, как указано в подп. 4.2. Подробную информацию о характеристиках УЗА/Т можно получить на сайтах фирм, указанных в табл. 1.

8. Ультразвуковые автоматические метеостанции

На основе разработанных УЗА/Т, дополнив их датчиками давления, влажности, а также платиновыми термометрами, процессорами и дисплеями, ряд фирм производит ультразвуковые автоматические метеостанции (УАМС). Выносные дисплеи, показывающие полученную информацию, связаны с датчиками проводной или радиосвязью. В ряде УАМС предусмотрена передача получаемой информации в банк данных внешнего компьютера.

Некоторые УАМС показаны на рис. 10 (примерно в одном масштабе), а их характеристики по диапазону измеряемых параметров ветра и температуры T_S соответствуют параметрам используемых УЗА/Т, указанным в табл. 2 и 3. Диапазоны и погрешности измерения давления, влажности и обычной температуры приведены на сайтах фирм изготовителей. Датчики давления, влажности и температуры размещаются обычно в стандартных жалюзийных корпусах с радиационными экранами, которые либо объединены в один конструктивный блок с УЗА/Т (рис. 10, *а–д, з*) либо выполнены в виде отдельных выносных блоков (рис. 10, *ж, и, к*). У модели рис. 10, *е* эти датчики размещены в металлическом цилиндре с отверстиями для связи датчиков с внешней атмосферой.

Модели ТАСМЕТ и ОИЛ [18] (рис. 10, *а, б*) созданы на основе УЗА Р/Н 102729 и отличаются в основном конструктивным расположением датчиков давления и влажности. Модель ТАСМЕТ и ее модификации имеют военное применение.

Особо следует отметить модель WXT520 – преобразователь метеоданных (рис. 10, *в*) [44], созданную на основе УЗА WMT52. В корпусе прибора WXT520 вместе с датчиками давления, влажности и температуры установлен датчик измерения осадков на основе пьезоэлектрического преобразователя (Vaisala RAINCAP® [45]), который расположен под плоской верхней крышкой прибора. В итоге этот комплекс выдает информацию о шести метеорологических величинах. УАМС на основе WXT520, включающая метеомачту и блок питания, именуется MAWS100, а УАМС на основе УЗА WS425 – MAWS410 (рис. 10, *ж*).

УАМС MetPak [22] (рис. 10, *з*) и MSS-1000 [16] (рис. 10, *д*) используют УЗА WindSonic (см. рис. 5, *б*). У модели MSS-1000 информация от датчиков передается по радиоканалу. УАМС HD2003 [24] (рис. 10, *э*) выпускается в Италии.

Отечественная УАМС ИМКЭС СО РАН 1Б65 (рис. 10, *е*) на основе УЗА/Т ДСВ-15 имеет две модификации – переносную (1Б65) с разборной 4-метровой мачтой и бортовую (1Б65Б) с автоматически раздвижной мачтой [40]. УАМС НПО «Тайфун» на основе УЗА АЦАТ-3 называется МК-15 [28] (рис. 10, *и*).

9. Измерения пульсационных характеристик метеовеличин с помощью УАМС

Накопление в компьютере массива данных измеренных мгновенных значений метеовеличин позволяет при обработке этого массива получать их временные изменения за определенный период времени и вычислять на интервале $t_{\text{уср}}$ средние значения, дисперсии, корреляционные функции, смешанные моменты и т.п., влияющие на распространение лазерных пучков в атмосфере. На рис. 11 для примера показаны результаты измерений атмосферных

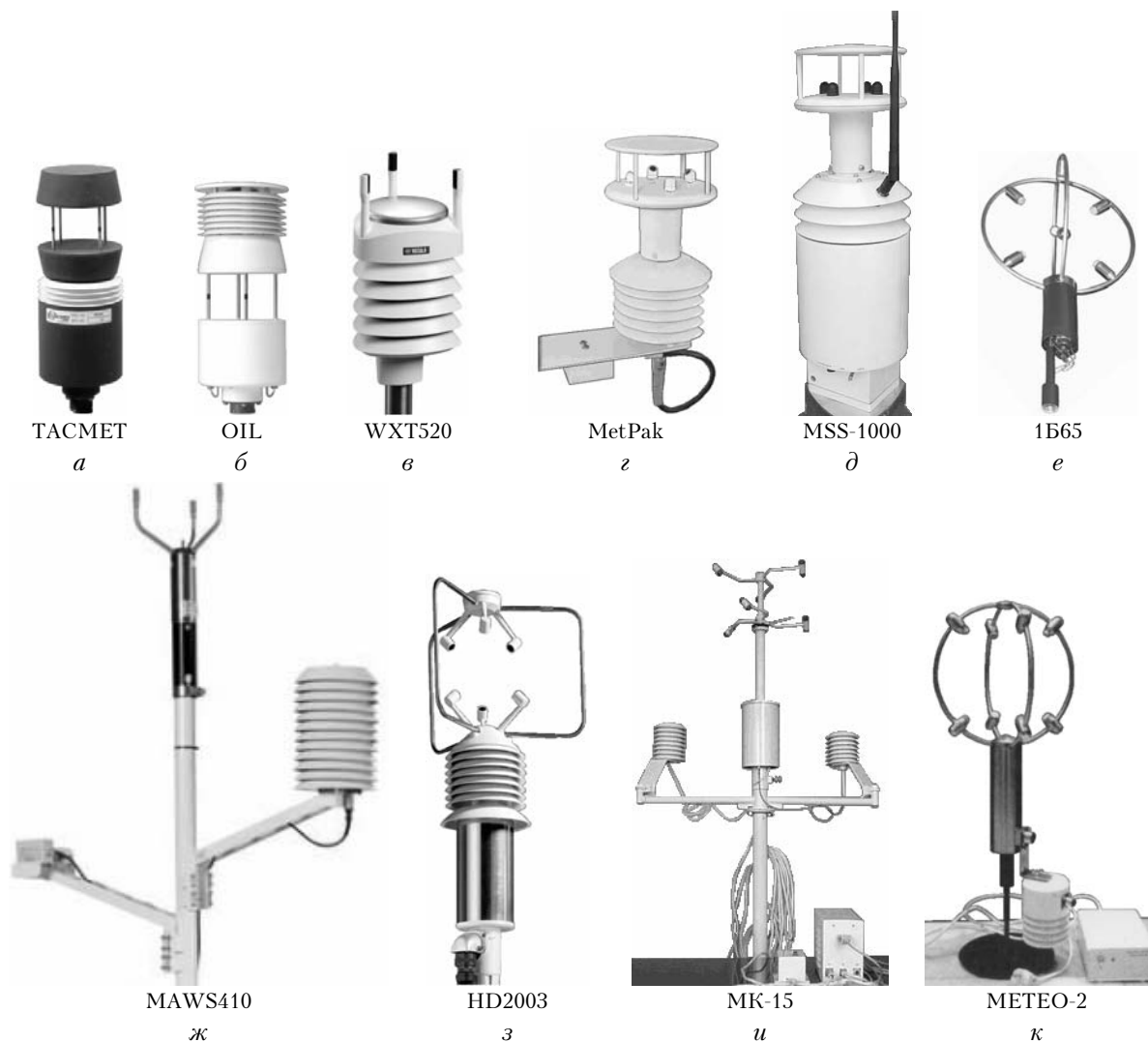


Рис. 10. Измерительные датчики УАМС: *a, б* – Climatronics Corporation; *в, ж* – Vaisala; *з* – Gill Instruments Ltd.; *д* – Applied Technologies, Inc.; *е* – ИМКЭС СО РАН; *з* – Delta Ohm Srl.; *и* – НПО «Тайфун»; *к* – ИОА СО РАН

параметров за 1...5 мая 2003 г. в Томске, полученные УАМС АМК-03 с использованием программ «МЕТЕО 3.0», «МЕТЕО DV» и «МЕТЕО DP» [39] (результаты предоставлены А.Я. Богушевичем).

Верхняя шкала абсцисс показывает дату, нижняя – местное время. Рис. 11, *a–б* представляет средние значения метеовеличин при $t_{\text{уср}} = 20$ мин, остальные рисунки – параметры, вычисляемые из флуктуаций температуры и скорости ветра.

Суточный ход изменения T (рис. 11, *a*) показывает общий тренд возрастания при переходе от одних суток к последующим. В ночь с 4 на 5 мая наблюдалась облачность, поэтому понижение T было минимальным. Изменения относительной влажности характеризуют суточные колебания – уменьшение днем вследствие возрастания T (рис. 11, *б*). Полная энергия флуктуаций скорости ветра [формула (5)] показывает дневное возрастание (рис. 11, *в*). Изменения потока тепла H (1) отмечают интенсивные восходящие потоки в дневное время (конвективные условия) и нисходящие потоки тепла ночью (рис. 11, *з*).

Значения потока импульса τ (3) и C_{no}^2 (7) также увеличиваются по амплитуде в дневное время (рис. 11, *д, е*).

Разработано программное обеспечение «МЕТЕО ПРОГНОЗ» [46] для локального краткосрочного (на 6 ч вперед) прогноза значений основных метеовеличин из результатов регулярных измерений УАМС АМК-03 в предыдущие сроки, что позволяет оценивать влияние изменений состояния атмосферы на распространение лазерных пучков.

10. Метрологическое обеспечение УЗА/Т

Важной проблемой при создании и эксплуатации УЗА/Т является обеспечение их метрологических характеристик. В ряде стран разработаны национальные стандарты, а с 2002 г. действует международный стандарт ISO 16622:2002 [6]. В нем определены методы приемосдаточных испытаний УЗА для измерений скорости и направления среднего значения ветра.

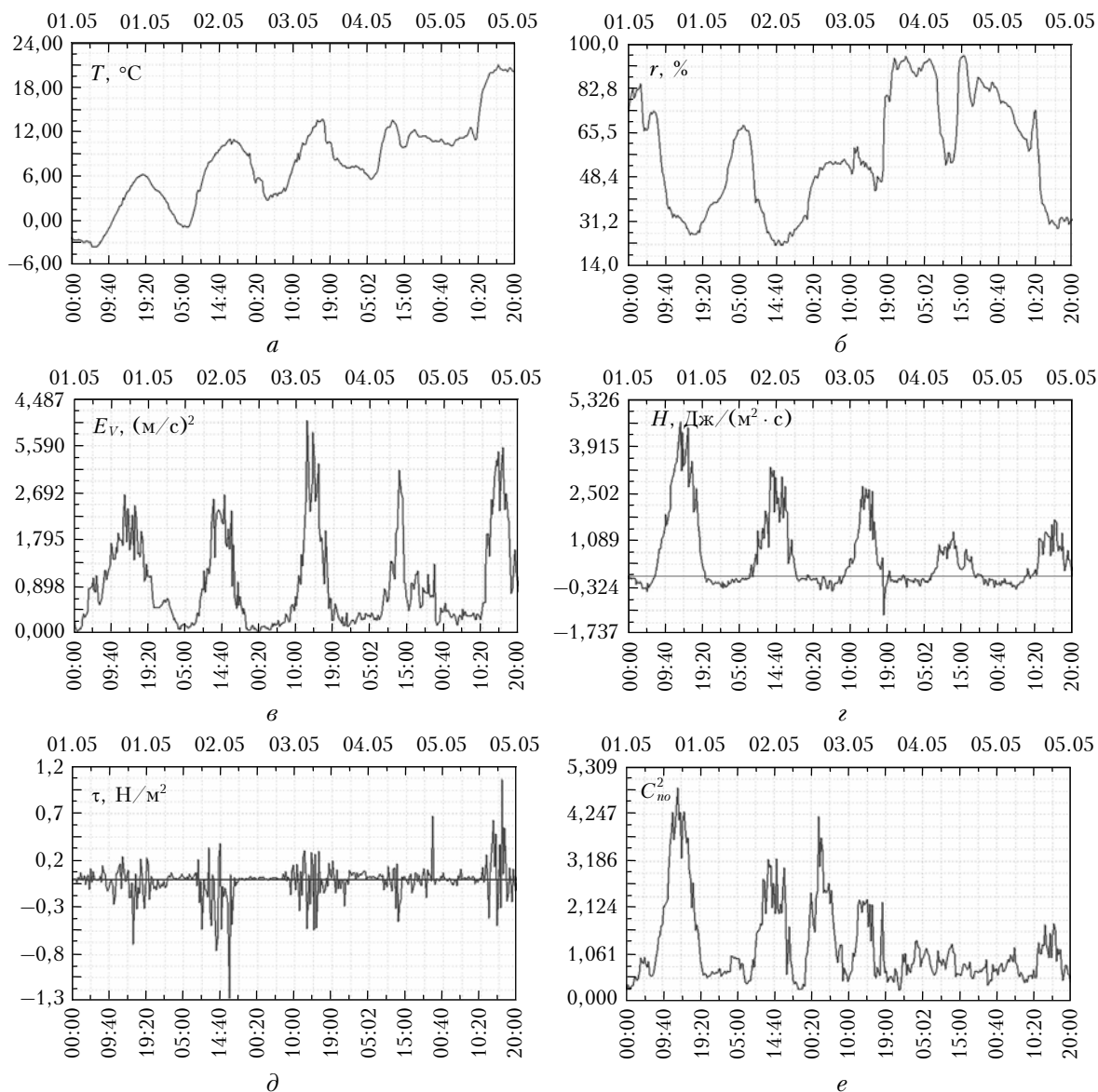


Рис. 11. Результаты обработки метеоданных, полученных АМК-03: *a* – температура; *б* – относительная влажность; вторые и смешанные моменты: *в* – E_V ; *г* – H ; *д* – τ ; *е* – $C_{no}^2 \cdot 10^{15}$

Существенным видом этих проверок является измерение расстояний между парами УЗ-преобразователей – L_i , величина которых влияет на погрешности измерений компонент скорости ветра V_{Li} в соответствии с (16). Стандарт ISO также устанавливает следующие виды испытаний: 1) испытания в камере нулевого ветра для определения отклонения измеряемой скорости V от нулевых значений во всем диапазоне рабочих температур; 2) испытания в ветровой трубе для определения отклонений измеряемой скорости V от реальной скорости воздушного потока (во всем рабочем диапазоне скоростей потоков и направлений ветра); 3) испытания в барокамере – для определения предельных рабочих высот УЗА; 4) полевые (натурные) испытания – для получения откликов прибора на потенциально неблагоприятные условия окружающей среды, которые трудно смоделировать в лабораторных условиях.

Дополнительно необходимо проводить испытания УЗА в термокамере на соответствие заданным требованиям по температурному диапазону (рабочему) и предельному (по условиям хранения). В соответствующих российских ГОСТах эти виды испытаний изложены.

Ряд фирм [47–49] выпускает дополнительное оборудование, которое используется при поверках УЗА/Т в полевых условиях.

Заключение

За последние 20 лет ультразвуковые анемометры/термометры нашли широкое применение в метеорологии, энергетике, экологии, обороне, научных исследованиях [10, 15–38]. К настоящему времени разработано около 50 модификаций УЗА/Т. Ежегодно выпускается несколько тысяч подобных приборов.

В стандартной метеорологии, где измеряются только параметры горизонтального ветра, широко используются УЗА с ортогональным расположением УЗ-преобразователей фирм [10, 18, 20, 22] и треугольным расположением [25].

Для более точного учета влияния конструкции УЗА/Т на искажения воздушного потока *желательно* измерять вертикальную компоненту ветра. Тем более измерение этой компоненты *необходимо* в исследованиях, когда определяются потоки тепла, влаги, импульса, а также турбулентные характеристики атмосферы и другие смешанные моменты. Для этих целей применяются 3D-измерители скорости ветра с шестью преобразователями фирм [10, 16, 17, 20, 22–24, 26, 28] и с восьмью преобразователями (четырьмя путями распространения) [27, 39].

На основе разработанных УЗА/Т в ряде стран выпускаются УАМС, которые имеют соответствующие национальные и международные сертификаты.

В России серийного производства УЗА/Т нет. ИМКЭС СО РАН совместно с ООО «Сибаналит-прибор» по заказам научных учреждений, а также МЧС РФ, МО РФ мелкосерийно производит УАМС АМК-03 и их модификации [39, 40, 43], которые зарегистрированы в Государственном реестре средств измерений РФ под № 36115-07.

1. Зуев В.Е., Банах В.А., Покасов В.В. Современные проблемы атмосферной оптики. Т. 5. Оптика турбулентной атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 270 с.
2. *Атмосфера*: Справочник. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 512 с.
3. Афиногенов Л.П., Грушин С.И., Романов Е.И. Аппаратура для исследований приземного слоя атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 320 с.
4. Гурвич А.С., Кон А.И., Миронов В.Л., Хмелевцов С.С. Лазерное излучение в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1976. 277 с.
5. Тихомиров А.А. Ультразвуковые термометры/анемометры для измерения скорости ветра и температуры (обзор): Материалы Росс. конф. / Под ред. М.В. Кабанова // Восьмое Сибирское совещание по климато-экологическому мониторингу. Томск: Аграф-Пресс, 2009. С. 21–23.
6. *International standard: ISO 16622–2002. Meteorology – Sonic anemometers/thermometers – Acceptance test methods for means wind measurements.*
7. Schotland R.M. The measurement of wind velocity by sonic means // J. Meteorol. 1955. V. 12. P. 386–390.
8. Kaimal J.C., Gaynor J.E. Another look at sonic thermometry // Boundary Layer Meteorol. 1991. V. 56. P. 410–418.
9. Hanafusa T., Fujitani T., Kobori Y., Mitsuta Y. A new type sonic anemometer-thermometer for field operation // Meteorol. and Geophys. 1982. V. 33. N 1. P. 1–19.
10. URL: <http://www.thiesclima.com> (дата обращения: 10.01.2010)
11. URL: <http://www.kaijasonic.co.jp> (дата обращения: 12.05.2009)
12. Патрушев Г.Я., Ростов А.П., Иванов А.П. Автоматизированный ультразвуковой анемометр-термометр для измерения турбулентных характеристик в приземном слое атмосферы // Оптика атмосфер и океана. 1994. Т. 7. № 11–12. С. 1636–1638.
13. Wieser A., Fiedler F., Corsmeier U. The influence of design on wind measurements with sonic anemometer systems // J. Atmos. Oceanic Technol. 2001. V. 18. N 10. P. 1585–1608.
14. URL: http://www.meteo-technology.com/company_address.htm#Young (дата обращения: 22.08.2009)
15. URL: <http://www.airmar-emea.com> (дата обращения: 13.05.2009)
16. URL: <http://www.apptech.com> (дата обращения: 26.04.2009)
17. URL: <http://www.campbellsci.com> (дата обращения: 07.05.2009)
18. URL: <http://www.climatronics.com> (дата обращения: 16.04.2009)
19. URL: <http://www.metone.com> (дата обращения: 30.03.2009)
20. URL: <http://www.youngusa.com> (дата обращения: 15.05.2009)
21. URL: <http://www.fttech.co.uk> (дата обращения: 23.07.2009)
22. URL: <http://www.gill.co.uk> (дата обращения: 31.08.2009)
23. URL: <http://www.metek.de> (дата обращения: 05.04.2009)
24. URL: <http://www.deltaohm.com> (дата обращения: 13.04.2009)
25. URL: <http://www.vaisala.com> (дата обращения: 11.05.2009)
26. URL: http://www.u-sonic.co.jp/index_e.html (дата обращения: 12.05.2009)
27. URL: <http://www.iao.ru/ru/resources/equip/dev/meteo2> (дата обращения: 31.08.2009)
28. URL: <http://typhoon-tower.obninsk.org/ru/index.html> (дата обращения: 22.03.2009)
29. URL: <http://www.belfortinstrument.com> (дата обращения: 17.04.2009)
30. URL: <http://www.coastalenvironmental.com> (дата обращения: 16.04.2009)
31. URL: <http://www.novalynx.com> (дата обращения: 02.04.2009)
32. URL: <http://www.biral.com> (дата обращения: 06.04.2009)
33. URL: <http://www.emtld.net> (дата обращения: 22.08.2009)
34. URL: <http://www.ammonit.de> (дата обращения: 04.05.2009)
35. URL: <http://www.fischer-barometer.de> (дата обращения: 04.05.2009)
36. URL: <http://www.th-friedichs.com> (дата обращения: 06.05.2009)
37. URL: <http://www.geonica.com> (дата обращения: 30.09.2009)
38. URL: <http://www.atmos-meteo.com> (дата обращения: 30.09.2009)
39. Азбукин А.А., Богушевич 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.
40. Тихомиров А.А., Корольков В.А., Богушевич А.Я., Азбукин А.А., Шелевой В.Д. Бортовой метеорологический комплекс на базе многоцелевых гусеничных и колесных машин // Вестн. Академии военных наук. 2008. № 3(24). С. 144–148.
41. URL: <http://www.vaisala.com/files/WINDCAP%20Brochure.pdf> (дата обращения: 10.01.2010)
42. URL: <http://www.atom.nw.ru/ATC/askro/atsat3m.htm> (дата обращения: 10.01.2010)
43. Азбукин А.А., Богушевич А.Я., Корольков В.А., Тихомиров А.А., Шелевой В.Д. Полевой вариант метеорологического комплекса АМК-03 // Метеорол. и гидрол. 2009. № 2. С. 101–106.
44. URL: http://www.vaisala.com/files/WXT520_Datasheet_RU.pdf (дата обращения: 10.01.2010)

45. URL: <http://www.vaisala.com/files/raincap0905.pdf> (дата обращения: 10.01.2010)
46. *Богушевич А.Я.* Краткосрочный прогноз временной эволюции метеорологических параметров в атмосфере из данных измерений ультразвуковой метеостанции: Матлы совещания // 6-е Сибирское совещание по климато-экологическому мониторингу. Томск, 2005. С. 83–88.
47. URL: http://www.vaisala.com/files/WS425FG_User_Guide_in_English.pdf (дата обращения: 10.01.2010)
48. URL: http://www.climatronics.com/Applications/Calibration-Test-Fixtures/test_fixtures-501506.php (дата обращения: 16.04.2009)
49. URL: <http://www.biral.com/met/wind/fieldcal.htm> (дата обращения: 13.05.2009)

A.A. Tikhomirov. **Ultrasonic anemometers and thermometers for measuring fluctuations of air flux velocity and temperature. Review.**

The principles of operation of ultrasonic anemometer-thermometers and their development history are described. The specifications of more than 40 design models manufactured by world leading firms are presented. The analysis is illustrated by pictures and tables, which include measurement ranges for measurable parameters, measurement accuracy, sensor sample rate, application conditions, weight and size, power supply, etc. The metrological provision problems for these devices are described as well.