

Аппаратно-программный комплекс для исследований структуры полей турбулентных флуктуаций температуры и ветра

А.А. Азбукин¹, А.Я. Богушевич¹, В.П. Лукин², В.В. Носов²,
Е.В. Носов², А.В. Торгаев^{2*}

¹Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН

634055, г. Томск, Академический пр., 10/3

²Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН

634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

Поступила в редакцию 22.02.2018 г.

Создан новый аппаратно-программный ультразвуковой комплекс АМК-03-4 для измерения характеристик турбулентных метеополей. В отличие от подобных измерителей комплекс состоит из четырех идентичных ультразвуковых термоанемометров. Конструкция позволяет регистрировать не только характеристики турбулентности, но и статистические характеристики пространственных производных турбулентных пульсаций температуры и ортогональных компонент скорости ветра вдоль каждой из осей декартовой системы координат. Это делает возможным исследование пространственно-временной структуры турбулентных метеополей приземного слоя атмосферы для последующих применений в теории подобия. Улучшен применяемый в ультразвуковых термоанемометрах стандартный алгоритм вычисления структурных характеристик флуктуаций температуры и скорости ветра, что значительно снизило погрешности их измерения.

Ключевые слова: турбулентность, ультразвуковой термоанемометр, пространственные производные; turbulence, ultrasonic anemometer, spatial derivatives.

Введение

В последние десятилетия для исследований и измерений метеорологических и турбулентных характеристик атмосферы в приземном слое все более широко используются ультразвуковые термоанемометры различных конструкций. К основным преимуществам этих приборов относятся их способность измерять мгновенные значения характеристик турбулентной атмосферы с большими частотами снятия отсчетов (до 100 Гц и более), отсутствие внесения искажений в измеряемые воздушные потоки из-за деталей конструкции, получение большого объема данных измеряемых и рассчитываемых параметров в реальном времени.

В работе описан созданный в рамках сотрудничества между ИОА СО РАН и ИМКЭС СО РАН принципиально новый автономный метеорологический комплекс АМК-03-4 для исследования свойств приземной турбулентной атмосферы.

Конструкция и работа комплекса

В комплексе АМК-03-4 (рис. 1) реализуются ультразвуковые измерения турбулентных флуктуаций температуры и компонент скорости ветра одновременно в четырех пространственно разнесенных (на 30–35 см в ортогональных направлениях) областях в атмосфере. Каждая из областей имеет диаметр ~7 см и соответствует своему ультразвуковому термоанемометру. Четыре термоанемометра размещены на специальной монтажной конструкции, закрепленной на метеомачте; местоположение и ориентация устройств фиксированы. Комплекс оценивает не только стандартные параметры атмосферной турбулентности в каждой из областей измерений в отдельности, но и статистические характеристики мгновенных пространственных производных турбулентных пульсаций вдоль каждой из осей декартовой системы координат. Это позволяет исследовать пространственно-временную структуру турбулентных метеополей для последующих применений в теории подобия и изучения турбулентных когерентных структур.

В комплексе используются новые ультразвуковые термоанемометры УГИ-75, представляющие собой малогабаритную модификацию термоанемометров, применяемых в серийно выпускаемых метеостанциях АМК-03 [1–6]. Принцип действия этих приборов

* Александр Анатольевич Азбукин (lep@imces.ru); Александр Яковлевич Богушевич (bay@imces.ru); Владимир Петрович Лукин (lukin@iao.ru); Виктор Викторович Носов (nosov@iao.ru); Евгений Викторович Носов (nev@iao.ru); Андрей Витальевич Торгаев (torgaev@iao.ru).

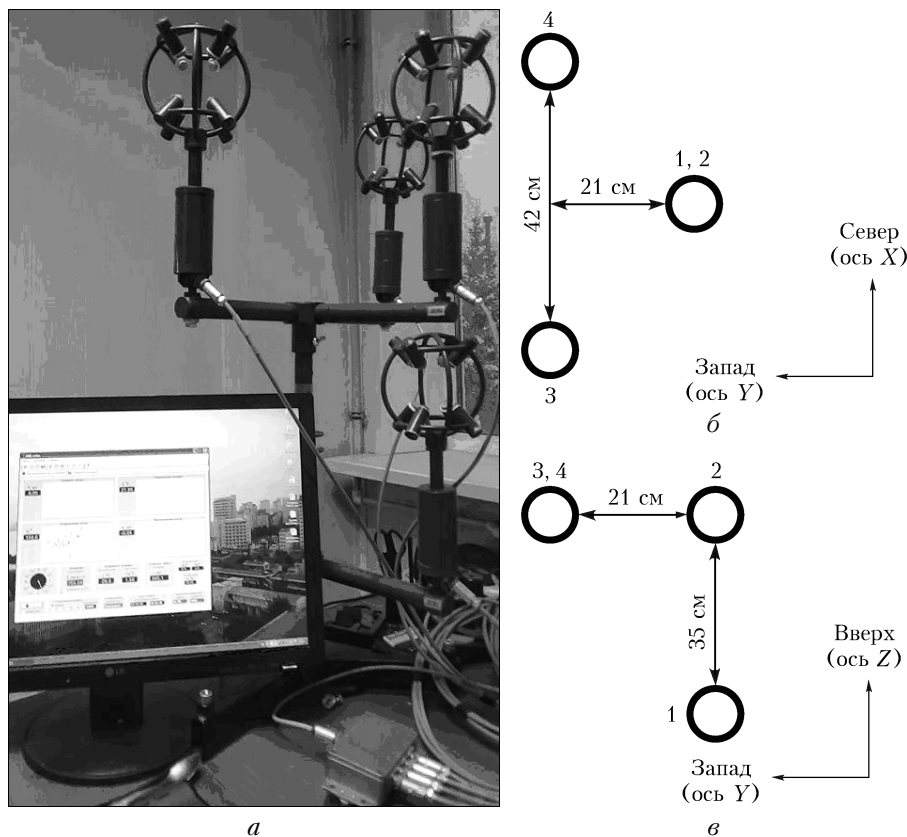


Рис. 1. Внешний вид комплекса АМК-03-4 (а) и схема размещения в нем ультразвуковых термоанемометров УГИ-75 (1–4): вид сверху (б), вид сбоку в направлении на север (е)

заключается в измерении групповых скоростей ультразвука в четырех различных направлениях между парами акустических датчиков, закрепленных на измерительной головке. Последняя состоит из двух перпендикулярных друг к другу одинаковых металлических колец (диаметром ~12 см) с общим центром. Кольца в нижней точке их пересечения прикреплены к верхней стороне цилиндрического корпуса радиусом ~2,2 и длиной ~10 см.

По сравнению с серийными термоанемометрами, используемыми в метеостанциях АМК-03, в УГИ-75:

- используются более современные микросхемы и микропроцессор;

- применены новые датчик атмосферного давления с частотным выходным сигналом и трехкоординатный акселерометр для автоматического учета ориентации термоанемометра относительно вектора силы тяжести;

- примерно в 2 раза уменьшен (до 7 см) линейный размер рабочей области исследуемого атмосферного воздуха, т.е. расстояния между парами ультразвуковых датчиков;

- ультразвуковые датчики вынесены на угол 45° из плоскостей конструктивных колец для уменьшения влияния ветрового затенения на результаты измерений;

- частота кварцевого генератора f_G , используемого для цифровых измерений времен прохождения акустических сигналов в воздухе, увеличена с 32 до 72 МГц;

- приблизительно в 2 раза уменьшено время всех ультразвуковых измерений, необходимых для вычисления мгновенных значений температуры воздуха и трех ортогональных компонент скорости ветра, т.е. параметр инерционности измерений прибора.

В комплект поставки комплекса АМК-03-4 входят:

- 4 ультразвуковые термоанемометра УГИ-75;
- 4 экземпляра Windows-приложения «МЕТЕО 4.0» с индивидуальными настройками и значениями градуировочных параметров для каждого УГИ-75;
- контроллер сбора информации (КСИ);
- Windows-приложение «АМК-rotor» для работы с выходными данными КСИ;

- блок питания БППИ-01;

- специальная монтажная конструкция, предназначенная для фиксации взаимного пространственного расположения четырех УГИ-75 и их азимутальной ориентации относительно направления на север (рис. 1, б, е);

- метеомачта высотой 4 м;
- комплект соединительных кабелей;
- транспортная тара.

Монтажная конструкция с термоанемометрами УГИ-75 устанавливается в самой верхней части метеомачты, а контроллер КСИ прикрепляется к ней же на высоте около 1,5 м. Блок питания БППИ-01 обычно размещается рядом с компьютером, на котором регистрируются результаты измерений.

Схема соединения составных частей комплекса АМК-03-4 и их функционального взаимодействия

показаны на рис. 2. При включении блока питания БППИ-01 от стандартной электрической сети переменного напряжения (220 В, 50 Гц) он выдает постоянное напряжение 12 В на контроллер КСИ и далее от него на каждый из термоанемометров УГИ-75. При наличии питания термоанемометры УГИ-75 автоматически выполняют измерения, необходимые для оценки метеорологических параметров, повторяя их с частотой снятия отсчетов (дискретизации) $F_d = 80$ Гц. Первичные данные измерений с периодичностью $1/F_d$ поступают в контроллер как цифровые информационные пакеты в стандарте RS485 со скоростью 57600 бит/с.

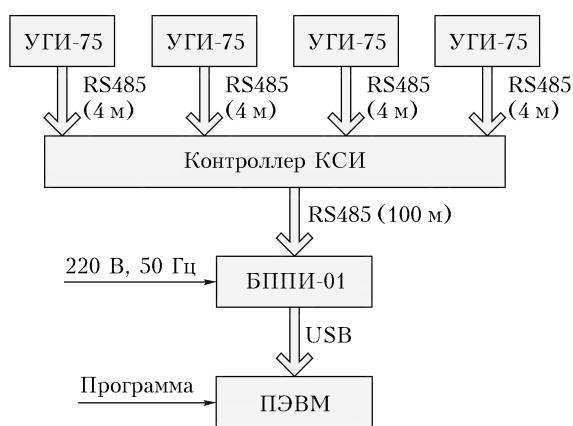


Рис. 2. Структурная схема комплекса АМК-03-4

В этих пакетах объемом по 23 байта каждый первые 2 байта (AA 55) являются признаком его начала, 20 последующих байтов содержат информацию об измеренных термоанемометром физических параметрах, а последний — контрольную сумму информативных байтов. Контроллер поочередно для каждого из подключенных к нему термоанемометров считывает по одному информационному пакету данных и объединяет полученные результаты в один общий пакет объемом 83 байта аналогичной структуры. При этом если какой-либо термоанемометр, идентифицируемый по порядковому номеру используемого для него кабельного разъема, не подключен к КСИ, то в его пакете вместо измеренных физических параметров передаются нулевые значения. Нулевое значение также передается для отдельного физического параметра, если в термоанемометре неисправен датчик, который измеряет этот параметр. Нулевые значения в объединенном пакете служат для автоматического распознавания программным обеспечением ошибок подключения или функциональной работы аппаратной части комплекса АМК-03-4.

Объединенные пакеты выдаются в БППИ-01 также с частотой повторения 80 Гц и в стандарте RS485, но уже на более высокой скорости 115200 бит/с; там они преобразуются таким образом, что уже могут считываться компьютером через любой свободный порт USB. После установки необходимого драйвера этот порт распознается программным обеспечением как виртуальный порт COM.

Программное обеспечение

Вместе с каждым термоанемометром УГИ-75 поставляется Windows-приложение «МЕТЕО 4.0», являющееся новой, более развитой версией программного обеспечения «МЕТЕО 3.0», ранее стандартно используемого в метеостанциях АМК-03 при подключении ультразвукового термоанемометра к компьютеру [1–3]. В «МЕТЕО 4.0» сохранены все ранее использовавшиеся рабочие функции «МЕТЕО 3.0», но расширен интерфейс пользователя и добавлены новые функции вторичной математической обработки измеряемых метеорологических данных. В комплексе АМК-03-4 приложение применяется только на этапах его изготовления и ремонта — для настройки, градуировки и метрологической проверки термоанемометров УГИ-75. Оно также может использоваться в метеорологических измерениях и исследованиях атмосферной турбулентности каждым из четырех термоанемометров в отдельности, если у потребителя возникнет необходимость разделить комплекс АМК-03-4 на несколько автономных метеостанций. В этом случае контроллер КСИ не применяется, а каждый из используемых термоанемометров УГИ-75 подключается к своему блоку питания БППИ-01.

Для комплекса АМК-03-4 как единой системы было разработано новое программное обеспечение — Windows-приложение «АМК-rotor» (рис. 3). Его основные функциональные задачи:

- считывание в компьютер первичных данных всех измерений, выполняемых в комплексе АМК-03-4, с непрерывной автоматической диагностикой технического состояния устройства в целом и его составных частей с оперативной выдачей соответствующей информации оператору;

- непрерывное заранее не ограниченное по времени вычисление мгновенных значений метеорологических параметров: температуры воздуха, трех ортогональных компонент вектора скорости ветра, атмосферного давления, относительной влажности воздуха, а также мгновенных пространственных производных перечисленных параметров по трем осям декартовой системы координат;

- вычисление средних значений перечисленных выше метеорологических параметров (и осредненных производных от случайных метеопараметров) с заданным оператором временем усреднения (от 1 до 20 мин), а также их минимальных и максимальных значений за интервал усреднения и за период между регистрацией средних величин;

- вычисление ряда стандартных статистических характеристик турбулентных флуктуаций полей температуры и скорости ветра;

- вычисление наиболее значимых числовых параметров, используемых в теории атмосферной турбулентности;

- периодическое автоматическое сохранение всех результатов на жесткий диск компьютера в виде файлов различных типов, отличающихся по содержанию, в заданные оператором временные сроки.

В программе «АМК-rotor» имеется ряд диалоговых окон, в которых пользователь может контролировать и изменять используемые в ней настройки.

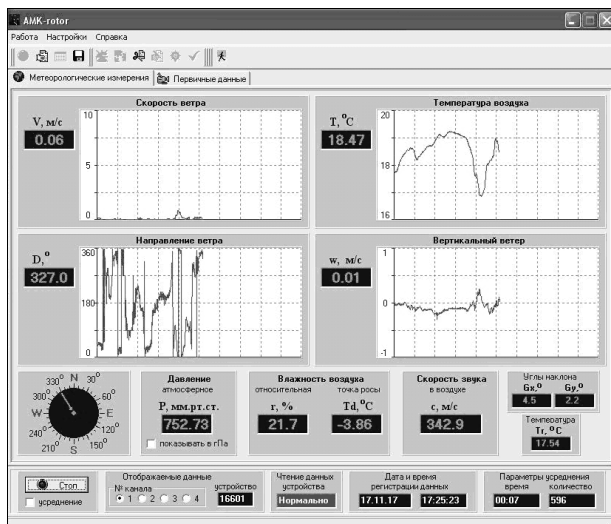


Рис. 3. Главное окно программы «АМК-rotor»

Все последние настройки, введенные пользователем, программа автоматически сохраняет во вспомогательном файле, из которого считывает их при каждой новой загрузке. Поэтому большинство настроек меняются только при замене ультразвуковых термоанемометров и изменении схемы их подключения к контроллеру. При запуске измерений в программе «АМК-rotor» она открывает диалоговое окно «Параметры измерений...», в котором необходимо задать требуемый временной интервал, мгновенные данные измерений за который должны использоваться при усреднении метеорологических параметров и вычислении характеристик атмосферной турбулентности, а также сроки метеорологических наблюдений, в которые программа должна записывать на жесткий диск компьютера файлы с результатами измерений и ее вычислений. Программа «АМК-rotor» может одновременно записывать файлы разных типов, отличающиеся между собой по содержанию сохраняемой в них информации. Перечень записываемых файлов и частично их структура для текущего сеанса работы программы устанавливаются в отдельном диалоговом окне. Файлы могут импортироваться другими программами, часто применяемыми в научных исследованиях.

Регистрируемые метеорологические и статистические данные

Для каждой из четырех областей измерений, которые определяются местоположением ультразвуковых термоанемометров, в комплексе АМК-03-4 с частотой выдачи его данных 80 Гц оцениваются мгновенные значения шести метеорологических параметров: температуры воздуха; ортогональных компонент вектора скорости ветра, вычисляемых из измеренных времен распространения звука между парами акустических датчиков; атмосферного давления и относительной влажности воздуха. Давление и влажность измеряются дополнительными датчиками в термоанемометрах. Все данные сохраняются

в оперативной памяти компьютера за временной интервал, равный заданному времени усреднения, отсчитываемый назад от момента поступления последнего информационного пакета из устройства. То есть всегда имеются массивы мгновенных значений метеорологических параметров с большим количеством N их элементов (при усреднении за 10 мин $N = 48000$). Программа «АМК-rotor» в определенные оператором сроки наблюдений и с периодичностью вычисляет по этим массивам средние значения метеорологических параметров и их статистические моменты (среднеквадратические отклонения, коэффициенты асимметрии, эксцесса, корреляции и др.), а также стандартные числовые характеристики атмосферной турбулентности, автоматически сохраняя полученные результаты в текстовых файлах. Основные рассчитываемые характеристики турбулентности включают: энергию температурных (E_T) и ветровых (E_V) флуктуаций; потоки тепла (H) и импульса (τ); масштабы температурных (T^*) и ветровых (V^*) флуктуаций; масштаб (L^*) и число ($\xi = z/L^*$, z – высота измерений) Монина–Обухова; структурные характеристики флуктуаций температуры (C_T^2), продольной составляющей скорости ветра (C_V^2), акустического (C_{na}^2) и оптического (C_n^2) показателей преломления.

Выходные данные измерений комплекса АМК-03-4 частично (только значения первичных данных термоанемометров и основных метеорологических параметров) отображаются на экране монитора в главном окне программы «АМК-rotor». Гораздо более многообразная информация записывается в файлы.

Каждый файл любого типа, используемого в программе, начинается с раздела с общей информацией о проведенных измерениях, который при необходимости можно исключить. В этот раздел записываются тип и конфигурация используемого устройства; дата и время с указанием часового пояса; географические координаты и высота над земной поверхностью места измерений.

Файл отчета (типа *.ггR, гг – две последние цифры текущего года), кроме общей информации, содержит еще минимум один раздел, в который записываются средние значения метеорологических параметров: температуры воздуха, трех ортогональных компонент вектора скорости ветра, скорости и направления горизонтального ветра, атмосферного давления, относительной влажности воздуха, температуры точки росы и т.д., а также минимальные и максимальные мгновенные значения температуры и скорости ветра. Кроме того, в файл отчета, как правило, включаются еще два раздела: один содержит значения вычисленных статистических характеристик турбулентных пульсаций температуры и ветра, а второй – вычисленные параметры атмосферной турбулентности.

В файл с мгновенными данными (типа *.ггD) после общей информации записываются строки, содержащие в виде колонок порядковый номер информационного пакета с устройства и вычисленные из него мгновенные значения температуры T , южной v_s , восточной v_e и вертикальной w компонент

вектора скорости ветра, атмосферного давления P и относительной влажности воздуха r . Количество этих строк в файле всегда соответствует количеству информационных пакетов устройства, принятых в компьютер за интервал времени перед записью файла, равный заданному времени усреднения.

Файл с таблицей строк с усредненными данными (типа *.гТ), в отличие от файлов предыдущих двух типов, за время одного сеанса измерений формируется в единственном числе. Он создается в памяти программы и сохраняется на жестком диске при наступлении первого срока регистрации результатов. При наступлении каждого нового срока регистрации результатов в образ файла, сохраняемого в памяти программы, добавляется снизу новая строка данных, и новый образ повторно записывается на жесткий диск под тем же именем, что и записанный ранее файл. В каждую строку данных здесь включаются (в порядке следования): порядковый номер строки данных; дата и время (срок), к которым относятся сохраняемые данные; фактическое время усреднения данных; средние значения метеорологических параметров; среднеквадратические отклонения флуктуаций температуры и компонент скорости ветра; параметры атмосферной турбулентности C_T^2 , C_V^2 , C_n^2 , C_{na}^2 , τ , H , T^* , V^* , L^* и ξ .

Описанные выше три типа файлов с выходными данными создавались и ранее в серийной метеостанции АМК-03 в программе «МЕТЕО 3.0». В комплексе АМК-03-4 программа «АМК-rotor» может записывать их в двух вариантах: для каждого используемого термоанемометра УГИ-75 в отдельности (это сделано для совместимости со старыми программами вторичной обработки данных ультразвуковой метеостанции) и для комплекса АМК-03-4 в целом. Во втором варианте для каждого атмосферного параметра вместо одного его значения Q в файлы записываются четыре его значения, полученные из данных измерений разных термоанемометров, в виде $Q_1/Q_2/Q_3/Q_4$, где индексы обозначают номера разъемов на контроллере, применяемых для их подключения.

Программа «АМК-rotor» также записывает файл с мгновенными пространственными производными метеорологических параметров (типа *.гV), данные для которого могут быть получены только из измерений, выполняемых новым комплексом АМК-03-4. По формату записи он аналогичен файлу типа *.гD, но вместо мгновенных значений T , v_s , v_e , w , P и r здесь в каждой строке записаны мгновенные пространственные производные этих же метеорологических параметров в пяти направлениях: вдоль осей X , Y , Z и вдоль векторов, соединяющих точку 2 с точками 3 и 4 на рис. 1, б. Данные этого файла открывают принципиально новые возможности для исследований пространственно-временной структуры атмосферной турбулентности.

При вторичной обработке данных файлов типа *.гD и *.гV дополнительно рассчитываются другие статистические функции турбулентных флуктуаций: автокорреляции и взаимной корреляции, распределения плотности вероятности (гистограммы),

структурные функции и энергетические спектры. Эти функции могут представляться как во временном (частотном) масштабе, так и в пространственном (используя гипотезу «замороженной» турбулентности [7, 8]).

Основные погрешности измерений и чувствительность. Возможные методики измерений

Систематические погрешности измерений в комплексе АМК-03-4 определяются техническими возможностями градуировки входящих в его состав термоанемометров УГИ-75 и для основных усредненных параметров не превышают: 0,3 °С — для температуры; 0,15 м/с — для компонент вектора скорости ветра; 0,4 мм рт. ст. — для давления; 2,5% — для относительной влажности.

Такие погрешности измерений температуры и скорости ветра более чем на порядок превышают пороговые чувствительности σ_T и σ_V ультразвукового термоанемометра к турбулентным флуктуациям температуры и скорости соответственно. Это обусловлено существенным превалированием в подобных устройствах систематических погрешностей над случайными ошибками измерений. В [6] приведены инженерные формулы для оценивания σ_T и σ_V :

$$\sigma_T \approx 10qT^{3/2}/S;$$

$$\sigma_V \approx 200qT/S,$$

где $q = 1/f_G$ — единица квантования измеряемых временных интервалов в ультразвуковых термоанемометрах (их цифровое разрешение); T — температура воздуха, К; S — расстояние между ультразвуковыми датчиками. Поскольку в УГИ-75 частота f_G увеличена сильнее, чем уменьшены значения S , то это устройство имеет несколько лучшие характеристики пороговой чувствительности, чем стандартные термоанемометры, применяемые в АМК-03. В таблице приведены величины пороговой чувствительности для $f_G = 72$ МГц и $S = 7$ см при трех разных значениях температуры.

Пороговые чувствительности измерений температуры и скорости ветра

T , °С	σ_T , °С	σ_V , м/с
-50	0,007	0,009
0	0,009	0,011
+50	0,012	0,013

Частота снятия отсчетов мгновенных значений температуры и компонент скорости ветра в АМК-03-4 ($F_d = 80$ Гц) приводит к обрезанию частот > 40 Гц в оцениваемых спектрах их турбулентных флуктуаций, поэтому комплекс не чувствителен к турбулентным неоднородностям, размеры которых меньше V/F_d (например, при средней скорости ветра $V = 3$ м/с — меньших, чем 4 см). Это обстоятельство не сказывается на измерениях флуктуаций температуры и компонент скорости ветра от инерцион-

ного интервала частот атмосферной турбулентности до синоптического диапазона, но ограничивает возможности экспериментального изучения мелкомасштабных компонент турбулентности на более высоких частотах (в вязком турбулентном интервале). Для гарантированного захвата наименьших размеров неоднородностей воздуха (< 1 см) при обычных средних скоростях ветра (до 5 м/с) требуется поднять частоту измерений F_d до 500 Гц. Однако это ограничение практически не влияет на точность измерения случайных характеристик метеополей. Так, результаты прямых измерений спектров турбулентности показывают, что при регистрации случайных температуры и скорости ветра погрешность, вносимая значением $F_d = 80$ Гц, обычно не превышает 1%. Это обусловлено незначительным вкладом обрезанного участка спектра в общую энергию турбулентных флуктуаций.

При измерениях турбулентных параметров время осреднения (длина случайной выборки) выбирается из условия, чтобы масштаб длины осредненного турбулентного течения (средняя скорость ветра, умноженная на время осреднения) существенно превышал внешний масштаб турбулентности по направлению среднего течения (или время осреднения должно существенно превышать характерный временной масштаб корреляции изучаемого поля согласно эргодической теореме Тейлора [7, 8]). В этом случае средние по времени значения статистически устойчивы. Измерения в приземном слое над ровной поверхностью обычно производят со временем осреднения не менее (или порядка) 100 с [5, 7, 8]. Соответствующий масштаб длины для скорости ветра 1–10 м/с составляет 0,1–1 км, что больше внешнего масштаба турбулентности (который вблизи подстилающей поверхности обычно не превышает десятка метров [5, 7, 8]).

В случае неровной поверхности продольный внешний масштаб турбулентности в нижнем приземном слое определяется характерным расстоянием между неровностями или неоднородностями поверхности. Для горного рельефа такое приповерхностное расстояние невелико – порядка десятков метров. Следовательно, и для неровной поверхности измерения в приземном слое можно проводить со временем осреднения ~ 100 с [5].

При измерениях в закрытом помещении внешний масштаб турбулентности ограничен размерами помещения. Однако реально он значительно (в 5–10 раз [5]) меньше. Для времени осреднения 100 с и типичной скорости ветра 0,05–0,50 м/с масштаб длины составляет 5–50 м и превышает внешний масштаб турбулентности, наблюдающейся в помещениях. Поэтому в закрытых помещениях измерения также можно проводить с осреднением 100 с.

Как показано в [5, 7, 8], при измерениях турбулентных параметров достаточно, чтобы интервал зарегистрированных в измерениях частот флуктуаций перекрывал большую часть так называемого микрометеорологического максимума спектра атмосферной турбулентности, где сосредоточена основная энергия турбулентных флуктуаций. Нижняя гра-

ница микрометеорологического максимума обычно находится около частоты 0,01 Гц [5, 7, 8], что соответствует времени осреднения 100 с. Поэтому за обычное время осреднения при регистрации параметров турбулентности ультразвуковыми комплексами берется $t_{av} = 120$ с. За такое время осреднения при частоте измерений $F_d = 80$ Гц количество отсчетов составляет $N = 9600$ ($N = t_{av}F_d$) с интервалом между ними $\Delta t = 1,25 \cdot 10^{-2}$ с. При измерениях метеорологических параметров (в области более низких частот, чем турбулентные), связанных с суточными и сезонными изменениями метеоситуации, ширины одного микрометеорологического интервала часто уже недостаточно и приходится увеличивать время осреднения до 10 мин и более (за счет расширения интервала зарегистрированных в измерениях частот в область более низкочастотного синоптического максимума [5, 7, 8]).

Относительная погрешность измерений структурных турбулентных характеристик C_T^2 , C_V^2 , C_n^2 определяется в первую очередь пороговой чувствительностью прибора и уменьшается с увеличением средней скорости ветра, времени осреднения и значений самих структурных характеристик. Например, в условиях относительно слабой турбулентности ($C_n^2 = 5 \cdot 10^{-16}$ см^{-2/3}) при времени осреднения 2 мин и средней скорости ветра 0,5–10 м/с относительная погрешность измерений C_n^2 находится в диапазоне 0,4–14% (0,4; 7 и 14% для скорости ветра 10; 1 и 0,5 м/с соответственно). С такими же ошибками измеряются и характеристики C_T^2 и C_V^2 . Скорости диссипации кинетической энергии ϵ и температуры N измеряются на основе закона Колмогорова–Обухова. Следовательно, относительные погрешности измерений параметров ϵ и N являются суммами погрешностей C_V^2 и постоянной Колмогорова C и C_T^2 и постоянной Обухова C_0 соответственно.

Погрешности измерений пространственных производных (от регистрируемых параметров) с помощью комплекса АМК-03-4 можно оценить с помощью средних характеристик и теории подобия. Так, для вертикальной производной в случае нейтральной стратификации в приземном слое относительная погрешность ее измерений составляет приблизительно $\Delta z / (2z)$ (Δz – вертикальное расстояние между термоанемометрами, z – высота измерительной головки над подстилающей поверхностью), т.е. для $\Delta z = 35$ см, $z = 2,5$ м погрешность не превышает 7% и убывает с ростом z .

Алгоритм регистрации структурных характеристик турбулентных флуктуаций

В новом ультразвуковом комплексе АМК-03-4 усовершенствован алгоритм вычисления структурных характеристик флуктуаций температуры C_T^2 , показателя преломления C_n^2 и скорости ветра C_V^2 по сравнению с алгоритмом, обычно применяемым в ультразвуковой измерительной аппаратуре для исследования

Заключение

Создан новый комплекс АМК-03-4, позволяющий, кроме стандартных для ультразвуковых термоанемометров параметров, измерять статистические характеристики пространственных производных турбулентных пульсаций. Улучшен алгоритм вычисления структурных характеристик турбулентных флуктуаций, что приводит к уменьшению погрешностей их оценивания.

турбулентных свойств приземной атмосферы (например, [1–5]). Усовершенствование заключается в более точном выборе аргумента (временного разнеса τ) для структурных функций, например для временной структурной функции флуктуаций температуры. Временная D' и пространственная D структурные функции связаны в силу замороженности равенством $D'_T(\tau) = D_T(V\tau) = C_T^2 \tau^{2/3}$ ($C_T^2 = D'_T(\tau)/(V\tau)^{2/3}$; $D'_T(\tau) = \langle [T(t+\tau) - T(t)]^2 \rangle$, V – средняя скорость ветра) [7, 8]. Величина разнеса τ должна обеспечивать уверенное попадание аргумента структурной функции в область применения 2/3-асимптотики структурной функции для колмогоровской турбулентности. Для этого должно выполняться условие $V\tau \gg l_{0T}$, или для временного разнеса $\tau \gg l_{0T}/V$ (l_{0T} – температурный внутренний масштаб турбулентности), поскольку при меньших масштабах турбулентности наблюдается иное поведение структурной функции ($D'_T(\tau) \sim \tau^2$) [7, 8]. Это условие для данных, полученных в измерениях ультразвуковыми системами с высокой частотой снятия отсчетов F_d , может нарушаться. Временной интервал между двумя соседними измерениями $\Delta t = 1/F_d$ часто оказывается меньше оптимального для попадания в инерционный интервал разнеса $\tau = N\Delta t$, что приводит к значительным погрешностям измерений. Как показывают расчеты, для выполнения условия $V\tau \gg l_{0T}$ значение структурной характеристики флуктуаций температуры C_T^2 следует вычислять по формуле

$$C_T^2 = 0,19734(n_{gr}/N)^{2/3} \langle [T(t + N\Delta t) - T(t)]^2 \rangle,$$

где $n_{gr} = 0,11407$ м (F_d/V); N – ближайшее целое число, превышающее вещественное число n_{gr} (или равное n_{gr} , если n_{gr} – целое). Учет в алгоритмах расчета комплекса АМК-03-4 данной формулы (и аналогичных для C_n^2 , C_V^2) увеличивает точность измерений структурных характеристик C_T^2 , C_n^2 , C_V^2 (погрешность обычно не превышает 10%).

A.A. Azbukin, A.Ya. Bogushevich, V.P. Lukin, V.V. Nosov, E.V. Nosov, A.V. Torgaev. Hardware-software complex for studying the structure of the fields of turbulent fluctuations of temperature and wind.

A new hardware-software ultrasonic complex АМК-03-4 is created for measurements of the characteristics of turbulent weather fields. In contrast to similar measuring instruments, the complex consists of four identical ultrasonic anemometers. The design of the complex allows one to record not only turbulent, but also statistical characteristics of spatial derivatives of turbulent pulsations of temperature and orthogonal wind speed components along the Cartesian axes. This allows investigating the spatial-temporal structure of turbulent meteorological fields of a surface air layer for subsequent applications in the similarity theory. Besides, the standard algorithm for calculation of structural characteristics of fluctuations of temperature and wind speed used in the ultrasonic anemometers is improved, which provides for considerably lower errors of their measurements.

1. 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. 47–52.
2. Богушевич А.Я. Ультразвуковые методы оценивания метеорологических и турбулентных параметров атмосферы // Оптика атмосф. и океана. 1999. Т. 12, № 2. С. 170–174.
3. Богушевич А.Я. Программное обеспечение ультразвуковых метеостанций для целей исследования атмосферной турбулентности // Оптика атмосф. и океана. 1999. Т. 12, № 2. С. 175–180.
4. Антошкин Л.В., Емалеев О.Н., Лукин В.П., Суконкина В.М., Хацко В.В., Янков А.П. Аппаратура для метеорологических исследований в атмосфере // Приборы и техн. эксперим. 1986. № 3. С. 240–241.
5. Носов В.В., Емалеев О.Н., Лукин В.П., Носов Е.В. Полуэмпирические гипотезы теории турбулентности в анизотропном пограничном слое // Оптика атмосф. и океана. 2005. Т. 18, № 10. С. 845–862.
6. Богушевич А.Я. Источники погрешностей при ультразвуковых измерениях метеовеличин в атмосфере, методы и алгоритмы их минимизации на основе опыта создания промышленной метеостанции АМК-03 // Учен. зап. физ. фак-та Моск. ун-та. 2014. № 6. С. 146308.
7. Татарский В.И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1967. 548 с.
8. Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика. Т. 1. М.: Наука, 1967. 696 с.; Т. 2. СПб: Гидрометеиздат, 1996. 742 с.