

Выводы. Стандартные условия измерений необходимо дополнить физической величиной, значение которой характеризует качество (кондиционность) природного газа. Предлагаем при определении расхода к общепринятым абсолютным значениям температуры $T_c = 293,15$ К и давления $p_c = 0,101325$ МПа как дополнение ввести стандартное обозначение температуры точки росы по влаге t_p , ее численное значение $-14,5$ °С приведено и пересчитано к давлению $3,92$ МПа (40 кгс/см²).

Предлагается внести изменения во все действующие стандарты по измерению объема, расхода и количества газа (международные, межгосударственные, национальные, технические условия, регламенты и контракты). Методику выполнения измерений [3] необходимо дополнить разработанной методикой, алгоритмами и программным обеспечением для измерений расхода и расчета количества (объема) сухой части влажного природного газа. Для вычислителей расхода в составе измерительных комплексов необходимо разработать и внедрить программное обеспечение для

расчета количества (объема) сухой части влажного природного газа.

Л и т е р а т у р а

1. **ГОСТ 2939—63.** Газы. Условия определения объема.
2. **РМГ 75—2004.** ГСИ. Измерение влажности веществ. Термины и определения.
3. **Измерение** расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Сборник национальных стандартов. М.: Стандартинформ, 2007.
4. **ГОСТ 5542—87.** Газ природный горючий для промышленного и коммунально-бытового назначения. Технические условия.
5. **ISO 6976:1995.** Natural gas calculation of calorific value, density, relative density and Wobbe index from composition.

Дата принятия 02.04.2013 г.

621.396.969.14:621.373.8

Доплеровский лидарный профилометр для измерений параметров ветра

**В. Р. АХМЕТЬЯНОВ, Д. Н. ВАСИЛЬЕВ, Д. В. КЛОЧКОВ, М. А. КОНЯЕВ,
М. С. ПЕНКИН, А. Е. ОРЛОВ, Г. А. ПЕТРОВ, З. С. ЦАРЕВ, И. В. ШАТАЛОВ,
И. Ф. ШИРЯЕВ**

НПП «Лазерные системы», Россия, С.-Петербург, e-mail: shatalov@lsystems.ru

Создан доплеровский лидар, позволяющий проводить дистанционные измерения скорости (в диапазоне 0—55 м/с) и направления ветра на заданных высотах (3—300 м), обработку, отображение и передачу полученных данных на компьютер оператора. Лидар предназначен для автономной непрерывной работы в различных климатических условиях. Приведены результаты исследований его технических и метрологических характеристик.

Ключевые слова: скорость ветра, лазер, доплеровский лидар.

The created Doppler lidar allowing to measure distantly the wind speed in the range 0—55 m/s and the wind direction at given heights (3—300 m) and to carry out the data processing, displaying and transmitting of all data to operator's computer is considered. The lidar is intended for autonomous continuous work in different climate conditions. The results of its technical and metrological characteristics studies are given.

Key words: wind speed, laser, dopler lidar.

Оперативные измерения параметров ветра являются необходимым условием метеорологического обеспечения авиационного транспорта, имеют большое значение для мониторинга состояния окружающей природной среды, научных исследований в области гидрометеорологии.

В настоящее время для измерений ветра в атмосфере используют контактные приборы — анемометры, устанавливаемые на специальные метеорологические вышки или высотные строения; радиолокаторы метрового и других диапазонов длин волн; акустические локаторы — содары и радиоакустические системы; оптические локаторы — лидары. Каждое из указанных средств измерений имеет свои ограничения. Так, применение анемометров серьезно затрудняется при обледенении, сильных ветрах или при штиле, а

зона действия анемометров ограничивается высотой вышки, на которой они установлены. Использование акустических средств ветрового зондирования атмосферы обычно ограничено высотами до 700—900 м и затруднено при осадках и высоком уровне естественных шумов. Нижняя граница измерений радиолокаторов, работающих в дециметровом и метровом диапазонах длин волн, начинается от 500—900 м [1].

Для определения параметров ветра в приземном слое широко распространены доплеровские лидары. Их отличительной особенностью является применение лазеров в качестве источников зондирующего излучения. Длина волны излучения лазера доплеровского лидара находится в микрометровом диапазоне, в то время как в радиолокаторах —

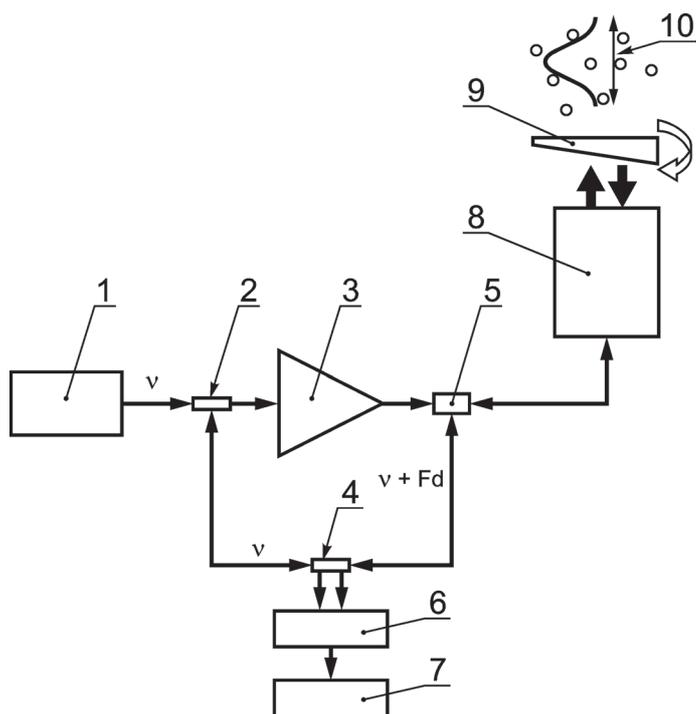


Рис. 1. Принципиальная схема лидара:

1 — полупроводниковый лазер; 2 — оптоволоконный делитель; 3 — эрбий-иттербиевый волоконный усилитель EYDFA; 4 — оптоволоконный сумматор; 5 — оптоволоконный циркулятор; 6 — балансный приемник; 7 — аналого-цифровой преобразователь; 8 — телескоп; 9 — сканер; 10 — объект измерений

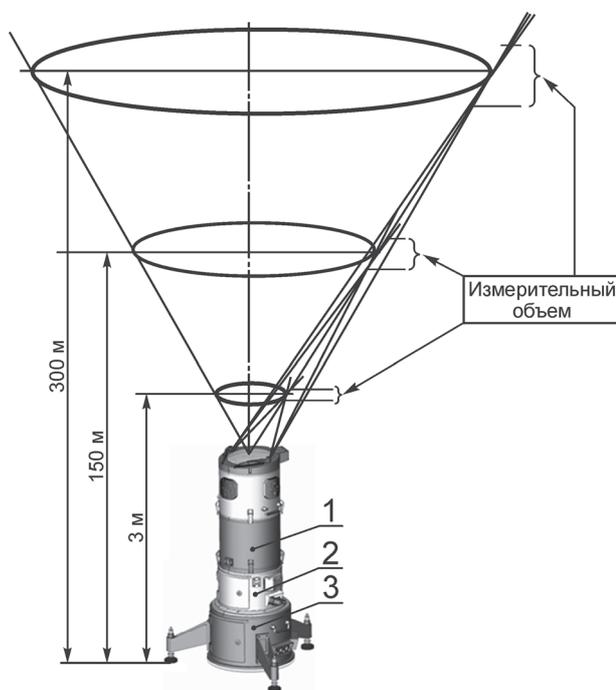


Рис. 2. Состав лидара и схема измерений скорости ветра:

1 — модуль сканирующий; 2 — модуль управления и обработки сигнала; 3 — модуль автономного электропитания и узел опор

в миллиметровом и сантиметровом диапазонах. Это дает преимущество при использовании лидаров в задачах измерения скорости ветра в атмосфере, когда естественный аэрозоль, распределенный в воздушных массах, имеет размер порядка длины волны излучения, что облегчает измерения скорости ветра в условиях высоких значений метеорологической дальности видимости [2]. Развитие элементной базы полупроводниковых лазеров и оптоволоконной техники привело к снижению стоимости компонентов и повышению их надежности, что дало возможность использовать оптоволоконные технологии в задачах лазерной диагностики атмосферы. В настоящее время разработано и производится несколько ветровых лидаров, предназначенных для детектирования ветровых полей, сдвига ветра, вихревых следов на различных дистанциях, среди которых можно выделить зарубежные [3—6] и российские [7—9] разработки.

Ниже дано описание созданного в НПП «Лазерные системы» профилометра лидарного ветрового с монитором оператора ПЛВ-300 (далее — лидара), служащего для круглосуточного оперативного дистанционного измерения скорости и направления ветра на заданных высотах (3—300 м), отображения и передачи полученных данных при помощи средств связи на компьютер оператора для дальнейшего анализа. Лидар позволяет дистанционно определять:

вертикальную и горизонтальную составляющие скорости ветра;

направление вектора скорости ветра относительно направления на север.

Область применения лидара — метеорологическое обеспечение авиационного транспорта, научные исследования в гидрометеорологии, мониторинг состояния окружающей среды.

Физические принципы, функциональная схема и конструкция лидара. Принцип действия заключается в том, что при распространении в атмосфере лазерного зондирующего излучения с известной базовой частотой происходит отражение сигнала от аэрозоля (частицы пыли, капельки воды и т. д.), увлекаемого ветровым потоком, вызывающее изменение частоты отраженного сигнала (доплеровский сдвиг). Измерив этот сдвиг, можно вычислить скорость частиц, а следовательно, и воздушного потока.

Схема приемно-передающего тракта лидара представлена на рис. 1. В качестве задающего лазерного генератора используется полупроводниковый лазер 1 с волоконным выходом, излучение которого делится оптоволоконным делителем 2. Основная часть излучения поступает в эрбий-иттербиевый волоконный EYDFA усилитель 3, где оптическая мощность возрастает до 1 Вт. Усиленное излучение при помощи оптоволоконного циркулятора 5 направляется в приемопередающий телескоп 8, формирующий зондирующий луч.

Меньшая часть излучения, которая используется в качестве опорного излучения гетеродина, при помощи транспортного одномодового оптоволокна поступает на оптоволоконный сумматор 4, где смешивается с рассеянным излучением атмосферы и направляется на балансный приемник 6, который обеспечивает прием и преобразование оптического сигнала разностной частоты в электрический в диапазоне частот 0—50 МГц.

Вышедшее из оптического тракта лидара излучение фокусируется приемопередающим телескопом 8 на заданной дистанции, которая определяет высоту измерения вектора

скорости ветра (рис. 2). При фиксированном положении оси зондирующего пучка лидар способен измерять лишь радиальную составляющую вектора скорости ветра (проекцию вектора на ось пучка). Чтобы получить информацию о скорости и направлении ветра, требуется проводить измерения, как минимум, при трех различных положениях зондирующего пучка в пространстве. В лидаре реализован алгоритм непрерывного сканирования пространства со скоростью 1 с^{-1} по азимуту под углом 22° относительно вертикали, которое осуществляется при помощи отклоняющего клина, расположенного на вращающейся платформе.

Во время каждого сеанса измерений аналоговый сигнал фотоприемника 6 (см. рис. 1) поступает на вход аналого-цифрового преобразователя 7, преобразуется в цифровой сигнал, который подвергается математической обработке по заданному алгоритму встроенным в лидар процессором. Обработанный сигнал по каналу Ethernet, модемной связи либо WiFi поступает на монитор оператора (внешняя ПЭВМ). Монитор оператора обеспечивает управление режимами работы лидара и обработку, анализ и визуализацию результатов измерений скорости, направления и вертикального профиля ветра на различных высотах. Результаты измерений метеорологических параметров могут распечатываться и архивироваться периферийными устройствами ПЭВМ.

Конструктивно лидар состоит из трех модулей (см. рис. 2), жестко соединенных между собой и связанных электронными и оптическими каналами: сканирующего; управления и обработки сигнала; автономного электропитания, а также монитора оператора. Каждый модуль предназначен для выполнения определенных функций и состоит из нескольких подсистем. Соединение отдельных модулей позволяет быстро привести изделие в рабочее положение. Внутренние полости модулей изолированы друг от друга. В сканирующем модуле расположены приемопередающий телескоп, узел поворотной призмы, электронный компас. Модуль управления и обработки сигнала состоит из оптоэлектронного оборудования (лазерного излучателя, оптоволоконного усилителя, приемника гетеродинного сигнала), аналого-цифрового электронного блока, системы управления и сбора данных на базе встроенного компьютера. В модуле автономного электропитания размещены аккумуляторные батареи, обеспечивающие автономную работу лидара в течение 15 мин, универсальное зарядное устройство. Модуль имеет регулируемые по высоте опоры, позволяющие устанавливать лидар на неподготовленной площадке.

Лидар предназначен для работы на открытом воздухе, имеет степень защиты IP 54, диапазон рабочих температур монитора оператора, размещаемого в помещении, $10\text{--}40^\circ\text{C}$. Для обеспечения работоспособности лидара в требуемых климатических условиях (температурный диапазон значительно расширен по сравнению с существующими аналогами [3, 4]) предусмотрена система термостабилизации для поддержания внутри корпуса температуры и влажности, необходимых для устойчивой работы аппаратуры. Защитное окно сканирующего модуля, через которое выходит излучение, снабжено датчиком дождя и стеклоочистителем. В каждом модуле поддерживается влажность ниже 80 % без конденсации и определенный температурный режим (в модулях сканирующем и автономного электропитания: $-10\text{...} + 45^\circ\text{C}$; в модуле управления и обработки сигнала: $5\text{...}35^\circ\text{C}$). Основ-

ные метрологические и технические характеристики лидара представлены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики профилометра лидарного ветрового ПЛВ-300

Наименование	Значение
Диапазон измерений скорости ветра, м/с	1—55
Пределы допускаемой погрешности измерений скорости ветра: абсолютной, м/с, при $v \leq 5 \text{ м/с}$ относительной, %, при $v > 5 \text{ м/с}$,	$\pm 0,5$ ± 10
Диапазон измерений направлений ветра, °	0—360
Пределы допускаемой погрешности измерений направления ветра, °	± 10
Диапазон задаваемых высот измерений, м	3—300
Отклонение от заданной высоты измерений, %	± 10
Габаритные размеры, не более, мм	450×800×1200
Масса, не более, кг	70
Интерфейс связи с ПЭВМ	RS-485, Ethernet
Напряжение электропитания: от сети переменного тока частотой $50 \pm 1 \text{ Гц}$, В от встроенного источника постоянного тока, В	$220 \pm 10 \%$ 24
Продолжительность работы от встроенного источника постоянного тока, не менее, мин	15
Потребляемая электрическая мощность, не более, Вт	450
Дальность передачи выходных сигналов от ПЛВ на пульт управления или ПЭВМ, м	8 000
Условия эксплуатации: диапазон рабочих температур, °С предельные температуры, °С относительная влажность при температуре 25°C , % атмосферное давление, ГПа	от -50 до $+50$ $-65, 70$ 20—98 600—1080
Стойкость к воздействию воздушного потока, не более, м/с	55
Стойкость к воздействию внешних факторов	Дождь, иней, роса, пыль
Класс лазерной опасности	1
Время непрерывной работы без технического обслуживания и регулировок, не менее, ч	200
Средний срок службы, лет	7

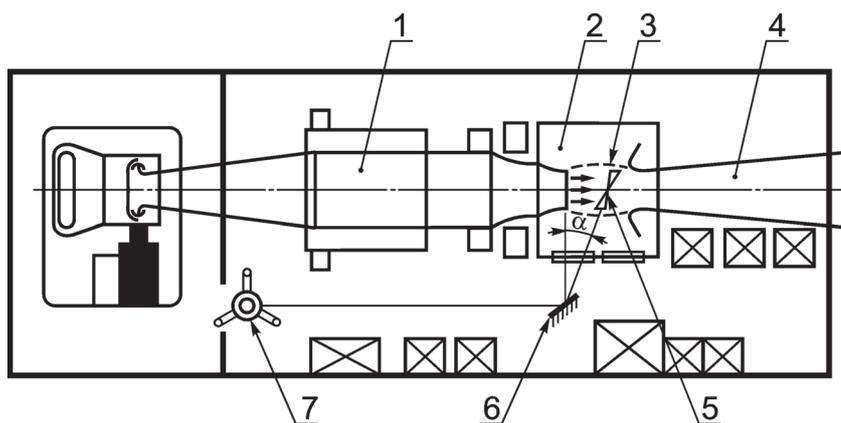


Рис. 3. Схема установки для проверки диапазона измерений скоростей:

1 — аэродинамическая труба; 2 — рабочая часть; 3 — границы воздушного потока; 4 — выхлопной диффузор; 5 — измерительный объем, 6 — отклоняющее зеркало; 7 — лидар

Типовой алгоритм работы лидара состоит из нескольких измерений на заданных высотах, например: 25, 50, 100, 150 и 300 м (высоту измерений устанавливает оператор и может менять ее с шагом 1 м в отличие от зарубежных аналогов [3, 4], где количество заданных высот ограничено). На каждой высоте определяют направление и скорость ветра и вычисляют их стандартные отклонения.

Сканирование на каждой выбранной высоте осуществляется со скоростью 1 с^{-1} в течение 4 с. По истечении времени измерения на одной высоте подается команда на перефокусировку телескопа на следующую высоту. Затем цикл измерений повторяется. После завершения сканирования на крайней высоте из установленного диапазона двигатель вторичного зеркала телескопа возвращает фокус на начальную высоту измерений. При необходимости получения большого массива данных для статистической обработки измерения на одной высоте проводятся многократно в течение определенного времени, устанавливаемого оператором на автоматизированном рабочем месте (мониторе). Временная циклограмма работы в ручном режиме — часть общей циклограммы, единичный цикл измерения на одной высоте.

Программное обеспечение (ПО) лидара является приложением, функционирующим в среде операционной системы Win32 Microsoft Windows XP Professional, разработано на базе лицензированных продуктов (Delphi и C++). Уровень защиты ПО от непреднамеренных и преднамеренных изменений соответствует «С» [10]. Программное обеспечение лидара не является источником погрешности при обработке сигнала измерительной информации и формировании результатов измерений.

Клиентская метеорологическая часть ПО предназначена для удаленного выполнения процедур запуска и остановки лидара, съема, обработки и визуализации сигнала от измерителя; используется для подготовки и запуска циклограмм, отображения конечных результатов работы — информации о параметрах ветра, вертикальном сдвиге ветра с распределением по высотам в выбранном диапазоне сканирования, а также о техническом состоянии оборудования и действиях оператора, архивирования и хранения всей информации в памяти компьютера.

Основные функции клиентской части ПО: отображение ветрового режима — высотного профиля скорости и направления ветра с цветовым кодированием опасных участков со сдвигом ветра, а также текущих показаний лидара — данных о скорости и направлении ветра для заданной высоты; вычисление значений сдвига по результатам измерений скорости и направления ветра и их визуализация при помощи средств отображения; осуществление архивирования, каталогизации и хранения полученной информации о параметрах ветра, техническом состоянии оборудования и действиях оператора.

Функционально окно «Экран» разделено на следующие области управления и отображения результатов измерений: задания диапазона высот сканирования, запуска и остановки циклограммы; отображения статуса последней отосланной команды на запуск или остановку циклограммы и результатов сканирования на последней отработанной высоте заданного диапазона, а также графическое представление распределений горизонтальной и вертикальной составляющих скорости ветра и углов направления ветра относительно направления на север в зависимости от высоты из диапазона сканирования с заданным шагом.

Методика и результаты испытаний лидара. Испытания в целях утверждения типа профилометров лидарных ветровых с монитором оператора ПЛВ-300 были проведены во ВНИИМ им. Д. И. Менделеева в соответствии с утвержденной программой, предусматривающей полный цикл испытаний по всем параметрам, представленным в табл. 1.

Для проверки точности измерений скорости воздушного потока был использован аэродинамический стенд АДС 700/100, входящий в состав государственного специального эталона единицы скорости воздушного потока [11]; диапазон воспроизведения скоростей 0,1—100 м/с, среднее квадратическое отклонение 0,2 %, неисключенная систематическая погрешность 0,2 %.

Место установки лидара в помещении стенда было выбрано с учетом возможности обеспечения прохождения зондирующего луча на расстоянии не менее 5 м от оси воздушного потока аэродинамической трубы. Схема экспериментального стенда представлена на рис. 3. Поскольку создаваемый воздушный поток течет в горизонтальной плоскости, использовали отклоняющее зеркало, позволяющее направить зондирующее излучение горизонтально. Для проведения измерений отключали механизм сканирования и зондирующий луч профилометра направляли в воздушный поток под углом 22° к оси аэродинамической трубы. Использовали индикаторную пластину для уточнения местоположения источника инфракрасного излучения, положение сфокусированного зондирующего луча лидара контролировали на оси воздушного потока, формируемого на рабочем участке стенда АДС 700/100.

Проверка диапазона измерений и определение погрешности лидара при измерениях скорости ветра были проведены методом прямых измерений скорости потока, воспроизводимой аэродинамическим стендом. Последовательно задавали скорости воздушного потока в трубе $v_{\text{эт}} = (0,5 \pm 0,1) \dots (55 \pm 0,5) \text{ м/с}$ и в установившемся режиме для каждого заданного значения наблюдали измеренные значения $v_{\text{изм}}$ скорости на мониторе оператора лидара.

Абсолютную погрешность измеряемых лидаром скоростей вычисляли по формуле

$$\Delta_1 = V_{\text{изм}} - V_{\text{эт}}$$

Результаты экспериментов принимали положительными, если значения Δ_1 удовлетворяли неравенствам $|\Delta_1| < 0,5$ м/с при $v \leq 5$ м/с и $|\Delta_1| < 10\%$ при $v > 5$ м/с.

Результаты определения погрешности измерений скорости воздушного потока на аэродинамическом стенде при помощи лидара приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты измерений скорости воздушного потока

Скорость воздушного потока $V_{\text{эт}}$, м/с, при порядке следования		Показания $V_{\text{изм}}$, м/с, при порядке следования		Погрешность $\Delta_1 = V_{\text{изм}} - V_{\text{эт}}$, м/с, при порядке следования		Пределы допускаемой погрешности, м/с
прямым	обратным	прямым	обратным	прямым	обратным	
0,45	0,5	0,5	0,55	0,05	0,05	$\pm 0,5$
1,35	1,41	1,42	1,48	0,07	0,09	$\pm 0,5$
2,11	2,26	2,19	2,36	0,08	0,1	$\pm 0,5$
3,02	3,21	3,07	3,14	0,05	-0,07	$\pm 0,5$
4,08	4,16	4,05	4,29	-0,03	0,13	$\pm 0,5$
5,52	5,46	5,58	5,52	0,06	0,06	$\pm 0,6$
9,61	9,72	9,53	9,68	-0,08	-0,04	$\pm 1,0$
14,59	14,73	14,46	14,64	-0,13	-0,09	$\pm 1,5$
19,76	19,82	19,7	19,71	-0,06	-0,11	$\pm 2,0$
25,24	24,96	25,08	25,08	-0,16	0,12	$\pm 2,6$
29,92	30,12	29,9	30,19	-0,02	0,07	$\pm 3,0$
34,89	35,02	34,72	34,90	-0,17	-0,12	$\pm 3,5$
40,07	40,2	39,75	39,81	-0,32	-0,21	$\pm 4,0$

Проверку диапазона и определение погрешности измерений направления ветра осуществляли сличением показаний лидара с показаниями измерителя параметров ветра типа WAA151/WAV151 фирмы «Vaisala», который устанавливали на телескопической мачте на высотах 5 и 15 м. Режим усреднения по времени при сличении результатов измерений направления ветра принимали 10 мин. Разность показаний усредненного направления ветра лидара и эталонного измерителя составляла в экспериментах не более $\pm 10^\circ$, что находилось в пределах допускаемой погрешности измерений.

Также были проведены проверка диапазона задаваемых высот и определение отклонений от заданной высоты. Лазерный луч направлялся к горизонтальной плоскости при помощи зеркала, закрепленного на лидаре. В ПО была предусмотрена последовательная установка дистанций фокусировки излучения (высоты измерений). Для проверки фокусировки луча использовали индикаторную пластину Thorlabs и измеритель профиля луча, фокусное расстояние и длину перетяжки измеряли при помощи аттестованного лазерного дальномера. Результаты испытаний показали, что погрешность установки фокусного расстояния излучения находилась в допустимых пределах ($\pm 10\%$).

Проверку технических и эксплуатационных характеристик лидара проводили также на базе ВНИИМ им. Д. И. Мен-

делеева. Для проверки устойчивости лидара к воздействию внешних факторов (иней, росы, дождя), повышенных и пониженных рабочих температур и влажности применяли климатотермокамеру КТК-3000, испытательную камеру «Дождь-1» и др. Прочность к воздействию механических ударных нагрузок проверяли при помощи ударного стенда ST-800. Все испытательное оборудование имеет действующие аттестаты. В процессе испытаний использовали термометры, термогигрометры, барометры, мегаомметры и другие средства измерений, имеющие действующие свидетельства о поверке.

По результатам испытаний на профилометры лидарные ветровые с монитором оператора ПЛВ-300 в Федеральном агентстве по техническому регулированию и метрологии получено Свидетельство об утверждении типа средства измерений [12].

Таким образом, разработан и аттестован профилометр лидарный ветровой с монитором оператора ПЛВ-300, позволяющий проводить дистанционные измерения скорости в диапазоне 0—55 м/с и направления ветра на заданных высотах (3—300 м). Прибор может применяться для метеорологического обеспечения авиационного транспорта, научных исследований в области гидрометеорологии, ветроэнергетике, а также для мониторинга состояния окружающей среды.

Литература

1. **Финкельштейн М. И.** Основы радиолокации: Учеб. для вузов. М.: Радио и связь. 1983.
2. **Савин А. В., Коняев М. А.** Доплеровские метеолидары для систем обеспечения вихревой безопасности полетов // Метеоспектроскопия. 2008. № 1. С. 147—152.
3. **Lidar Wind Technologies.** WINDCUBEv2: Reduce uncertainty and increase profitability. 2012 [Электрон. ресурс]. <http://www.lidarwindtechnologies.com> (дата обращения: 05.10.2012).
4. **ZephIR 300** [Электрон. ресурс]. <http://www.yourwindlidar.com/zephir-300> (дата обращения: 05.10.2012).
5. **Sgurr energy** Galion Lidar wind profiler [Электрон. ресурс]. <http://www.sgurrenergy.com/galion-lidar> (дата обращения: 05.10.2012).
6. **Lockheed Martin.** WindTracer [Электрон. ресурс]. <http://www.lockheedmartin.com/us/products/windtracer.html> (дата обращения: 05.10.2012).
7. **Борейшо А. С. и др.** Мобильные многоволновые лидарные комплексы // Квантовая электроника. 2005. № 12(35). С. 1167—1177.
8. **Гордиенко В. М., Путивский Ю. Я.** Ветровой когерентный доплеровский TEA CO₂-лидар // Квантовая электроника. 1994. № 21 (3). С. 284—290.
9. **Gordienko V. M. e. a.** Wind Doppler lidar with 1.5μm fiber laser // Laser Phys. Lett. 2008. V. 5. N 5. P. 390—393.
10. **МИ 3286—2010.** Проверка защиты программного обеспечения и определение ее уровня при испытаниях средств измерений в целях утверждения типа.
11. **ГОСТ 8.542—86.** ГСИ. Государственный специальный эталон и государственная поверочная схема для средств измерений скорости воздушного потока.
12. **Laser systems** [Электрон. ресурс]. <http://lsystems.ru/news/96/?page=7> (дата обращения: 05.10.2012).

Дата принятия 26.03.2013 г.