

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРИБОРОВ И МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ И НАПРАВЛЕНИЯ ВЕТРА

А. Д. Плотников, Л. И. Сучкова

Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова
г. Барнаул

Проблема измерения скоростей (анемометрия) воздушных потоков и направления их перемещения в промышленности, в медицине, в системах экологического мониторинга, в системах автоматического управления вентиляцией диктует всё более высокие требования к метрологическим и эксплуатационным характеристикам измерительных приборов. Эти требования уже не могут быть выполнены путём улучшения приборов, основанных на традиционных принципах, таких как тепловые и тахометрические. Потребность обеспечения безынерционности измерений, достаточно широкого динамического диапазона, высокой чувствительности, приемлемой точности в начале диапазона и достаточной надёжности привела к необходимости обратиться к другим физическим идеям, в частности, к акустическим методам измерения.

Существует несколько методов измерения скорости воздушных потоков, каждый из которых может быть применен в любой из сфер. Все методы можно разделить по физической идее на пять групп [5]:

а) Методы, основанные на использовании энергии потока:

1) методы, использующие переменный перепад давлений,

2) методы, использующие измерение крутящего момента,

3) методы, использующие явление обтекания.

б) Тепловые методы:

1) методы, использующие измерение температуры нагретого тела, помещаемого в поток (термоанемометры),

2) методы, использующие измерение температуры потока, нагреваемого нагревателем (теплокалориметры).

в) Методы, основанные на введении в поток невесомой метки и измерении ее скорости:

1) методы, использующие впрыскивание порции иного состава, цвета,

2) методы, использующие намагничивание,

3) методы, использующие ионизацию,

4) методы, использующие подогрев,

5) акустические (условно).

г) Корреляционные методы.

д) Оптические методы.

Рассмотрим каждый метод с его достоинствами и недостатками подробнее.

Из реализаций методов, основанных на использовании энергии потока, наибольшее распространение получили турбинные анемометры с вращающейся турбинкой, реже встречаются приборы с заторможенной турбинкой, измеряющие отклонение пластины, воспринимающей напор контролируемого потока, обладающие большей погрешностью. Основным недостатком турбинных анемометров является наличие в конструкции подвижных частей.

Методы, использующие перепад давлений, являются старейшими и конструктивно наиболее просто реализуемыми. Для измерения скоростей воздушных потоков в шахтах используется напорная трубка Пито [2]. С помощью трубки Пито измеряют разность полного и статического давления потока, и по этой разности вычисляют значение скорости. Одним из недостатков трубки Пито является забивание пылью входного отверстия трубки. Недостатком напорных устройств также является очень малая чувствительность при небольших скоростях.

Все большую популярность, особенно на Западе, в последнее время завоевывают вихревые анемометры. Различают два способа организации вихреобразования: преобразователь с закруткой потока и преобразователь с естественным вихреобразованием. Эти анемометры имеют в первичном преобразователе неподвижное тело, при обтекании которого возникают срывающиеся вихри, создающие пульсации давления. Скорость потока может быть вычислена по частоте пульсаций, которая измеряется с помощью преобразователей давления, напряжения, температуры, ультразвуковых или других преобразователей. Вихревые анемометры обладают линейной характеристикой, они не подвержены влиянию изменений параметров газовой среды, почти не зависят от ориентации в пространстве. Они удовлетворяют большому числу промышленных требований, в частности, имеют простую компактную конструкцию и не содержат движущихся частей, загрязнение и эрозия обтекаемого тела очень мало сказываются на процессе вихреобразования. Основным преимуществом вихревых

первичных преобразователей является достаточно большой динамический диапазон измерений. Однако работу вихревых анемометров могут нарушать акустические и вибрационные помехи, создаваемые различными источниками.

Другим методом измерения скорости воздушного потока является тепловой метод. Различают два его направления: термоанемометрический и термокаталитический. Приборы, в которых измеряемый сигнал является функцией тепла, рассеиваемого в контролируемую среду телом, нагреваемым электрическим источником энергии, относят к группе термоанемометров. Существует два способа измерения скорости потока термоанемометрами. При первом способе поддерживают постоянный ток, нагревающий термоэлемент, и измерение скорости потока связывают с измерением температуры термоэлемента. При втором способе током нагрева поддерживают постоянную температуру нити, вследствие чего происходит выделение необходимого компенсирующего количества тепла. Принцип работы большинства термоанемометров состоит в том, что нагретая электрическим током нить включается в цепь моста Уинстона. Нить охлаждается протекающим потоком, уменьшается ее температура, в результате чего уменьшается ее электрическое сопротивление, что вызывает разбаланс моста и фиксируется электрическим прибором. Достоинствами термоанемометров является возможность измерения малых скоростей (0.1-0.5 м/с), отсутствие тепловой инерции термоэлементов. Однако существуют такие недостатки, как нестабильность результатов градуировки, зависимость показаний от температуры потока, хрупкость конструкции.

Приборы, в которых тепло переносится от нагревателя к измерительно-преобразовательному элементу контролируемым газовым потоком, относятся к контактному калориметрическому анемометрам. С увеличением скорости контролируемого потока их чувствительность падает, поэтому они пригодны для измерения малых скоростей. К недостаткам термоанемометров относится чувствительность термонити к температуре и давлению среды.

Меточные анемометры основаны на измерении времени перемещения какой-либо характерной части потока (метки) на контрольном участке пути. В зависимости от устройств, для создания метки и ее детектирования способ может быть химическим, тепловым, оптическим, ядерно-магнитным, ионизационным и др. Меточные вещественные методы применяются для определения скоро-

стей потоков в протяженных воздуховодах и сетях, но практически непригодны для создания компактных приборов аэрологического контроля. Меточные расходомеры чаще применяют не в качестве эксплуатационных приборов для непрерывного измерения, а для различных лабораторных и исследовательских работ.

Принцип действия акустических анемометров основан на перемещении акустических колебаний движущейся средой. Основными достоинствами акустических анемометров является то, что они не имеют подвижных частей, а значит не имеют физического износа; не вносят аэродинамического сопротивления в контролируемый поток; не нарушают аэродинамической эпюры скоростей; практически безынерционны.

Среди акустических анемометров наибольшее распространение получили приборы, в которых измеряется разность времен прохождения акустических колебаний по потоку и против него. Реже встречаются приборы, в которых акустические колебания направляются перпендикулярно к потоку и измеряется степень отклонения этих колебаний от первоначального направления.

Излучатели и приемники колебаний выполняются на основе пьезокерамических электроакустических преобразователей, которые преобразуют переменное электрическое напряжение в акустические колебания той же частоты (обратный пьезоэффект) или наоборот (прямой пьезоэффект).

Приборы с рассмотренными первичными преобразователями по схеме работы могут быть фазовыми, частотными или времяимпульсными. Наиболее чувствительной является фазовая схема измерений, при которой измеряется фазовый сдвиг акустических колебаний, возникающих на приемных пьезоэлементах, в результате разности времен прохождения этими колебаниями одинакового расстояния по потоку или против него. Частотные измерители основаны на зависимости разности частот повторения коротких импульсов или пакетов колебаний от направления распространения акустических волн по или против потока. Во времяимпульсных анемометрах измеряется разность времен перемещения коротких импульсов по направлению потока и против него при одинаковой длине пути.

Корреляционные методы имеют много общего с меточными. Они основаны на измерении корреляции двух случайно изменяющихся величин в двух сечениях потока, расположенных на фиксированном расстоянии друг от друга. Корреляционные расходомеры предназначены в первую очередь для изме-

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРИБОРОВ И МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ И НАПРАВЛЕНИЯ ВЕТРА

рения скоростей многофазных потоков и потоков, имеющих какие-либо неоднородности. К их недостаткам относятся длительность процесса измерения и необходимость иметь перед преобразователем расходомера достаточно протяженный прямой участок воздуховода.

Основной тип оптических приборов, применяемых для измерения скоростей потоков газов – доплеровские лазерные анемометры, основанные на измерении разности частот, возникающей при отражении светового луча движущимися частицами потока. Оптические анемометры имеют высокую точность и быстроедействие, отсутствие контакта с веществом контролируемого потока. Лазерные анемометры сложны и дороги, они применяются в основном для измерения местных скоростей жидкости и газа в различных исследовательских работах.

С целью сравнения приборов, основанных на различных методах, ниже представлены их характеристики [1].

Анемометр АПА-1 – акустический анемометр, взрывозащищенный – производство SiR Sensor, Россия. Его характеристики приведены в таблице 1.

Таблица 1

Тип анемометра	акустический
Диапазон измерения скорости воздушного потока	0,02 ... 30 м/с
Динамический диапазон измерений	до 1500
Измерение малых скоростей	≈ 0,02 м/с
Точность измерения	± 1 % от диапазона измерений
Диапазон рабочих температур	0 ... 40 °С

В таблице 2 приведены характеристики термоанемометр МЭС-200Ех (взрывозащищенный, производство Электронстандарт, Россия).

Таблица 2

Тип анемометра	термоанемометр
Диапазон измерений	0,1 ... 20 м/с
Основная абсолютная погрешность:	
в диапазоне скоростей 0,1 ... 0,5 м/с	± (0,05 + 0,05·V)
в диапазоне скоростей 0,5 ... 2 м/с	± (0,1 + 0,05·V)
в диапазоне скоростей 2 ... 20 м/с	± (0,5 + 0,05·V)
Диапазон рабочих температур	- 20 ... + 60 °С

В таблице 3 приведены характеристики крыльчатого анемометра ИСП-МГ4 (Стройприбор, Россия).

Таблица 3

Тип анемометра	крыльчатый
Диапазон измерения скорости воздушного потока	0,3 ... 30 м/с
Предел допускаемой погрешности измерения усредненной скорости, где V – измеренная скорость ветра, не более	± (0,1 + 0,05·V) м/с
Предел допускаемой погрешности измерения мгновенной скорости, где V – измеренная скорость ветра, не более	± (0,1 + 0,06·V) м/с
Диапазон рабочих температур	температура от - 20 до + 60 °С

В таблице 4 приведены характеристики ультразвукового анемометра WindScribe (Davis Instruments, США).

Таблица 4.

Тип анемометра	ультразвуковой
Диапазон измерений	0,2 ... 67 м/с
Основная абсолютная погрешность	± 3 %
Разрешающая способность	0,1 м/с
Диапазон рабочих температур	- 20 ... + 50 °С

Данные об термоанемометре ТА34 (Trottes, Германия) приведены в таблице 5.

Таблица 5

Тип анемометра	термоанемометр
Диапазон измерений	0 ... 30 м/с
Разрешение:	
в диапазоне скоростей 0 ... 3 м/с	0,01 м/с
в диапазоне скоростей 3,1 ... 30 м/с	0,1 м/с
Погрешность:	
в диапазоне скоростей 0 ... 3 м/с	± 3 %, ± 0,05 м/с
в диапазоне скоростей 3,1 ... 30 м/с	± 3 %, ± 0,2 м/с
Диапазон рабочих температур	0 ... + 50 °С

Направление ветра может быть определено относительно географических сторон света, относительно каких-то определенных направлений в системе. В различных ситуациях предъявляются разные требования к

определению направления ветра. В одном случае необходимо знать направление только вдоль одной оси, в другой – на плоскости (горизонтальные составляющие скорости ветра), в третьей – интересны все три составляющие перемещения.

Для точного определения направления требуется точная установка и калибровка приборов, определяющих направление перемещения воздушных масс.

На сегодняшний день популярными методами определения направления ветра являются флюгерный и акустический. В качестве датчика флюгера могут выступать потенциометры, оптоэлектронные системы, индуктивные датчики. Недостатками флюгеров являются наличие подвижных частей и механизмов, необходимость в обслуживании по очистке, после некоторого срока работы на открытом воздухе, обледенение вращающихся частей в зимнее время года. Для устранения этих недостатков производители стараются сделать свои конструкции более герметичными, защищенными от внешних воздействий. Для устранения обледенения применяют обогревательные приборы.

Не имеют перечисленных недостатков приборы, основанные на акустических методах. В акустических приборах для определения направления ветра применяют закон сложения скоростей. Производятся замеры скоростей по нескольким направлениям. Далее, применяя закон сложения скоростей, рассчитывают результирующую скорость ветра и находят углы между полученным вектором скорости и составляющими скорости, направления которых известны.

Список продукции представлен на сайте метеорологического оборудования [4].

Датчик направления ветра WAV151 (флюгер). WAV151 – сбалансированный, с малым порогом чувствительности оптоэлектронный флюгер.

Инфракрасные светодиоды и фототранзисторы смонтированы на шести орбитах с каждой стороны 6-битового диска GRAY-кода. При обороте флюгера диск меняет код, принимаемый фототранзисторами. Код меняется с шагом 5.6° , один бит в единицу времени для устранения неясности кодирования.

Ультразвуковой датчик ветра WS425 определяет направление и скорость ветра при помощи ультразвука. Измерение основано на времени прохождения сигнала в зависимости от скорости ветра, времени, которое требуется для ультразвука, чтобы переместиться от одной головки преобразователя до другой. Датчик не имеет движущихся частей и устойчив к коррозии и загрязнению. В дополнение к повышенной точности и надежности данных

при любом ветре и климате датчик WS425 не требует периодического и специального технического обслуживания.

Ультразвуковой анемометр для измерения скорости и направления ветра предназначен для электронной передачи данных о горизонтальных компонентах скорости, направлении ветра и температуры воздуха. Благодаря высокой точности измерения ультразвуковой анемометр может использоваться для безынерционных измерений в условиях шквального ветра, достигающего максимальных значений. При необходимости датчики и корпус автоматически обогреваются. Диапазон измерения устройства - 0 - 60 м/с, $0-360^\circ$, $-30 - +70^\circ\text{C}$, точность - $\pm 0.1\text{ м/с}$ [0.5 м/с], далее $\pm 2\%$ от измеренного значения [$>5\text{ м/с}$], $\pm 1.5^\circ$, $\pm 1\text{ К}$, диапазон рабочих температур $-40 - +70^\circ\text{C}$.

В ходе сравнительного анализа методов и технических средств измерения скорости и определения направления ветра наибольшее предпочтение было отдано акустическому методу с использованием ультразвуковых датчиков. Метод обеспечивает безынерционность измерений, достаточно широкий динамический диапазон, высокую чувствительность, приемлемую точность в начале диапазона и достаточную надёжность конструкции, которая исключает подвижные и трущиеся детали.

В качестве первичных преобразователей должны использоваться ультразвуковые датчики, работающие в диапазоне ультразвука низких частот 15-100 кГц, т.к. звуковые волны именно таких частот имеют наименьшее затухание при перемещении в воздушной среде [3]. В качестве первичных преобразователей могут быть выбраны УЗ-датчики TR40-18U фирмы Audiowell. Эти датчики имеют подходящие характеристики для использования их в анемометре акустического типа: резонансная частота $40\pm 1.0\text{ кГц}$, чувствительность 230 мВ, время затухания 1,3 мс, рабочий диапазон температур $-40\dots+85^\circ\text{C}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анемометры – разработчики и изготовители. [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://www.anemometers.ru>
2. Аэрология горных предприятий. [Текст] / Ушаков К.З [и др.] - М.: Недра, 1987.
3. Красильников В. А., Звуковые и ультразвуковые волны в воздухе, воде и твердых телах [Текст], 3 изд. - М., 1960.
4. Метеорологическое оборудование. [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://www.raimet.ru/?p=catalog&c=402>
5. Шкундин, С.З. Состояние и перспективы развития анемометрии в угольной промышленности. [Электронный ресурс] / С.З. Шкундин, О.А. Кремлёва, А. Л. Иванников // Режим доступа: http://www.sirsensor.ru/art_3.htm