

УДК 628.85

ИНТЕГРАЛЬНЫЙ ТЕРМОАНЕМОМЕТР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СРЕДНЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И РАСХОДА ВОЗДУХА В КАНАЛАХ, НА ВЫХОДАХ АНЕМОСТАТОВ И В ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ РЕШЁТКАХ

О. С. Цаканян, канд. техн. наук

tsakoleg@rambler.ru

ORCID: 0000-0002-1077-9818

С. В. Кошель, канд. техн. наук

koshel@nas.gov.ua

ORCID: 0000-0003-3603-0909

Институт проблем машиностроения
им. А. Н. Подгорного НАН Украины,
61046, Украина, г. Харьков,
ул. Пожарского, 2/10

При создании систем вентиляции важно правильно рассчитать объемы притока и оттока воздуха. Если при расчете допущена ошибка или требуется перераспределение потоков воздуха, без измерений не обойтись. Существующие способы определения расхода воздуха с помощью точечных измерений в сечении трудоемки и требуют значительных временных затрат, а снятие показаний в различные моменты времени приносит в результате значительную погрешность. В Институте проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины разработан термоанемометр новой конструкции, использование которого значительно упрощает измерительный процесс. Он позволяет проводить измерения средних значений температуры и скорости (расхода) воздуха в сечении воздухопроводов или на входах и выходах решеток и анемостатов. Прибор может использоваться в режиме реального времени для контроля и управления расходом и температурой воздуха в системах вентиляции. Зонд термоанемометра представляет собой металлическую обечайку с направляющими, на которые уложен чувствительный элемент. Принцип работы прибора заключается в изменении коэффициента теплоотдачи при различной скорости натекания воздуха. Предварительно в лабораторных условиях проводится градуировка термоанемометра при различных скоростях. Получена градуировочная зависимость, которая может использоваться при измерениях расхода воздуха на входах и выходах воздухопроводов и распределительных устройств и непосредственно в воздухопроводах. Для повышения точности измерений необходимо обеспечить угол натекания воздушного потока на зонд термоанемометра, равный 90°. Для этого используются специальные воздухоборники и выпрямители воздушного потока.

Ключевые слова: термоанемометр, измерения, чувствительный элемент.

Основная часть

При исследовании вентиляционных систем необходимо проводить измерения расходов и средних температур воздушных потоков в каналах, на выходных решётках и вентиляционных установках. ГОСТ 12.3.018–79 «Системы вентиляционные. Методы аэродинамических испытаний» устанавливает требования для проведения испытаний вентиляционных систем, в том числе требования к измерительной аппаратуре, расположению сечения, где проводятся измерения, количеству и координатам точек замера. Методика испытаний достаточно сложна, она не годится для наблюдения в режиме реального времени и, к тому же, может приносить значительную погрешность в измерительный процесс.

Для измерения скорости или расхода воздушного потока в вентиляционных системах используются приборы, которые называют анемометрами [1]. Существует несколько разновидностей анемометров, отличающихся принципом действия и измерением различных физических величин: перепада давления (прибор – дифманометр [2], зонд – трубка Пито), электрического сопротивления или силы тока (прибор – термоанемометр [3], зонд – обычно нагретая струна, но могут быть и другие, например, термопленка [4]), а также частоты вращения (прибор – измеритель частоты механического вращения, зонд – крыльчатка или чашечки [5]). Каждый из анемометров имеет свою область применения в зависимости от внешних условий, состояния воздушной среды, структуры течения и диапазона измерения скорости воздушного потока.

Для систем вентиляции, установленных в жилых, административных, офисных и других помещениях, не связанных с производством, существует ограничение на максимальную скорость движения воздуха в воздухопроводах, которая не должна превышать 6 м/с. В диапазоне изменения скорости воздуха от 0,5 до 10 м/с наиболее точными приборами являются термоанемометры. К их недостаткам

Статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Международная.

© О. С. Цаканян, С. В. Кошель, 2020

следует отнести чувствительность к турбулизации [6] и углу натекания воздушного потока на поверхность струны, что вносит погрешность в измерения. Зонды современных термоанемометров выполняются компактными (минимальный диаметр – 10–15 мм), что позволяет проводить точечные измерения [7] в мерных сечениях по координатам, установленным ГОСТом. Такой процесс измерения является довольно трудоёмким, так как размеры измерительных зондов чаще всего оказываются в несколько раз меньше, чем сечения вентиляционных каналов (минимальный диаметр воздухопроводов промышленного назначения составляет 80 мм), к тому же распределение скорости потока воздуха неравномерно по сечению воздуховода, и в нем могут присутствовать турбулентные пульсации. В работе [8] дана оценка точности измерений в вентиляционных системах. Показано, что учесть все факторы, влияющие на погрешность, не удастся, поэтому при пусконаладке и паспортизации вентиляционных систем необходимо закладывать погрешность не менее 20 %.

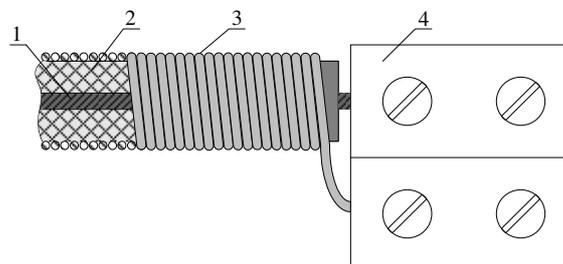
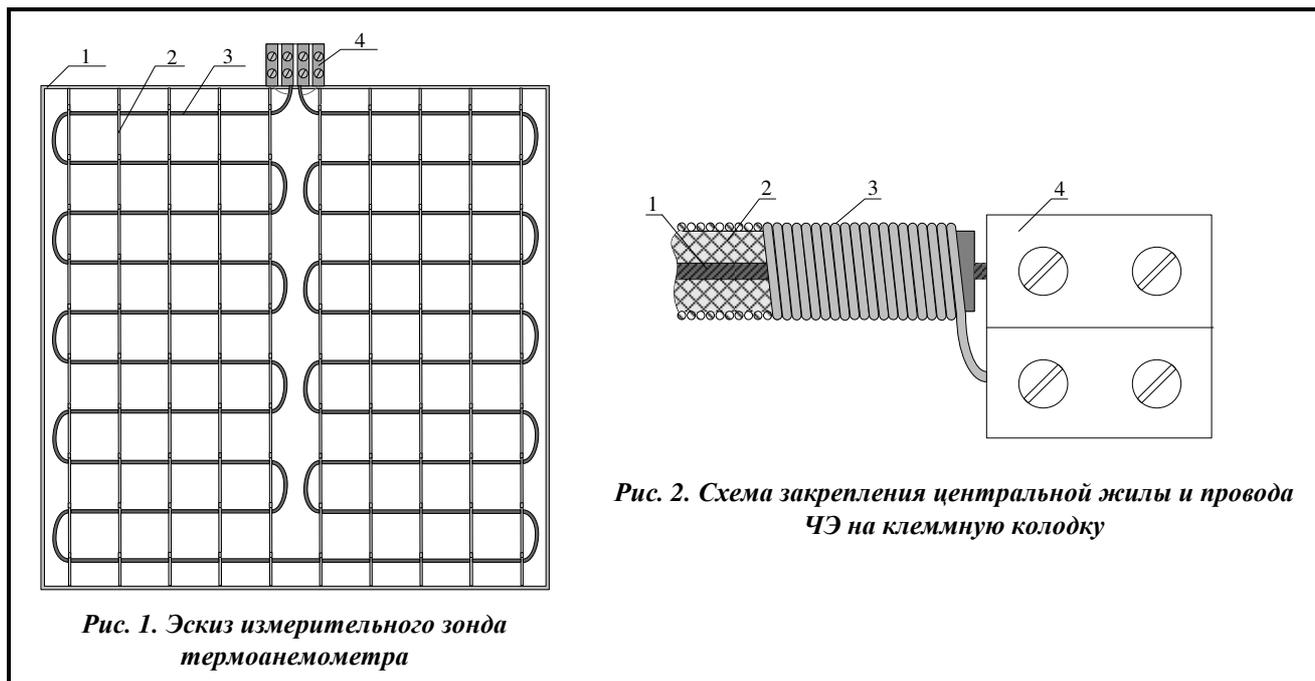
В связи с этим необходима конструкция зонда, с помощью которой можно проводить одно-временные измерения скорости воздушного потока в нескольких точках мерного сечения, с последующим суммированием и получением в мерном сечении общего расхода. Эта идея нашла воплощение в приборе Testo420 от известного производителя измерительной аппаратуры Testo. В этом анемометре в качестве зондов используются объединённые коллекторами приёмники перепада полного и статического давления с несколькими отверстиями по всей длине. Оба коллектора соединены со входами электронного дифференциального манометра. Прибор предназначен для работы при средней скорости воздуха 5 м/с и выше.

Анемометр с крыльчаткой предназначен для определения скорости в диапазоне от 0,5 до 30 м/с. К его преимуществам следует отнести хорошую устойчивость к измерению скорости турбулизованных потоков воздуха. Крыльчатки с малым диаметром используются для измерения в воздуховодах, а с диаметрами от 60 до 100 мм – на входах и выходах воздухораспределительных устройств. В случае превышения размеров мерных сечений относительно размера зонда применяют технологию сканирования сечения с помощью точечных измерений с последующим вычислением общего расхода. Следует учитывать, что размер крыльчатки достаточно велик, что непосредственно влияет на структуру потока и вносит искажения в измерительный процесс [9].

Измерения закрученных потоков воздуха для всех трёх типов зондов возможны при использовании воздухоборников и устройств, спрямляющих поток, при этом воздухоборник и устройство спрямления должны согласовываться с формой и площадью живого сечения проточной части зонда.

Современные анемометры позволяют проводить одновременное измерение температуры и скорости потока с помощью дополнительного датчика температуры. Также они снабжены целым рядом вспомогательных функций, облегчающих математическую обработку результатов измерения, например, осреднение за интервал времени [10]. Однако осреднение результатов измерения скорости по сечению канала реализовано лишь в приборе Testo420.

С целью уменьшения времени и повышения точности измерений разработан зонд – интегральный термоанемометр (рис. 1), который предназначен для измерения средней по сечению канала температуры и скорости (или расхода) воздушного потока в каналах различной формы, а также для определения тепловой энергии, транспортируемой воздухом. Рабочий диапазон измерения скорости для него составляет от 0,5 до 10 м/с. Для цилиндрических и прямоугольных каналов зонд термоанемометра выполнен из обечайки (корпуса) 1, держателей 2, в дистанцирующих пазах которых крепится гибкий чувствительный элемент 3, и клеммной колодки 4. Чувствительный элемент (ЧЭ) (рис. 2) состоит из центральной жилы 1, имеющей большое удельное электрическое сопротивление, слабо зависящее от температуры. Жила покрыта электроизолирующей оболочкой 2, поверх которой навит тонкий эмалированный провод 3, сопротивление которого имеет известную зависимость от температуры. Концы жилы и провода подключены к клеммной колодке 4, вынесенной на внешнюю поверхность канала. ЧЭ располагается в плоскости сечения проточной части зонда с шагом размещения от 0,03 до 0,075 гидравлического диаметра сечения. Шаг размещения ЧЭ выбирается таким образом, чтобы относительная площадь живого сечения зонда не была бы меньше 0,85, что является компромиссным решением, поскольку, с одной стороны, необходимо иметь малое аэродинамическое сопротивление, а с другой – получить близкое к реальному распределение скорости в мерном сечении, что непосредственно связано с длиной ЧЭ и шагом его размещения.



Измерительный зонд имеет два режима работы – пассивный и активный. Пассивный режим служит для измерения интегральной температуры воздушного потока, когда зонд представляет собой гибкий термометр сопротивления. Измерительный ток, проходящий по проводу 3 (см. рис. 2), имеет малую величину, а выделяемая тепловая энергия практически не оказывает влияния на точность измерения температуры. Активный режим предназначен для измерения расхода или средней скорости воздушного потока, следующего через канал. В этом режиме нагрев ЧЭ осуществляется током, протекающим по центральной жиле. Его величина должна обеспечить на поверхности ЧЭ плотность теплового потока не менее 6000 Вт/м^2 для измерения скорости в диапазоне от 0,5 до 10 м/с. С увеличением скорости воздушного потока уменьшается чувствительность термометра сопротивления и точность, поэтому для её повышения необходимо увеличивать электрический ток. Сопротивление провода при нагреве увеличивается согласно зависимости, из которой легко определить температуру поверхности ЧЭ, зависящую от скорости воздушного потока и лучистой составляющей общего теплового потока. Сопротивление термоанемометра можно определить по формуле

$$R = R_0 + \gamma \cdot T_n,$$

где R – сопротивление термоанемометра; R_0 – сопротивление термоанемометра при температуре $0 \text{ }^\circ\text{C}$; γ – коэффициент зависимости сопротивления от температуры; T_n – температура поверхности ЧЭ.

Соответствие между скоростью и температурой ЧЭ определяют в установившемся температурном режиме. В процессе теплообмена участвуют три механизма: конвективный, лучистый и кондуктивный. Участием в теплообмене кондуктивной теплопередачи в местах соприкосновения поверхностей ЧЭ с пазами держателей (см. рис. 1) можно пренебречь, поскольку контакт между поверхностями является точечным и на него оказывает воздействие лишь динамическое давление воздушного потока, которое при максимально допустимой скорости 6 м/с не превышает 20 Па. Во время проведения измерений температура воздушного потока равна температуре стенок зонда и воздухопровода или проточной части воздухопровода и мало отличается от средней температуры поверхностей ограждающих конструкций помещения, в котором проводятся измерения. Поэтому можно предположить, что условия при градуировке зонда и при его использовании во время измерений будут практически одинаковыми. Температура поверхности ЧЭ в этих условиях при изменении скорости воздушного потока от 0,5 до 10 м/с изменяется примерно от 100 до 40 $^\circ\text{C}$, а лучистый тепловой поток – от 12 до 1,4 % от общего теплового потока, рассеиваемого ЧЭ зонда для метода постоянного тока. Метод постоянной температуры, в отличие от предыдущего, сужает диапазон изменения лучистой составляющей теплового потока. При градуировке или во время измерений с использованием данной конструкции зонда следует

учитывать поправку, связанную с лучистым потоком. Сам расчет лучистого теплового потока осуществляется по известной формуле

$$Q = C_s \cdot \varepsilon \cdot F \cdot \left(\left(\frac{T_n}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_b}{100} \right)^4 \right),$$

где C_s – постоянная Стефана-Больцмана; ε – степень черноты, в нашем случае принимается равной 1; F – площадь поверхности ЧЭ; T_b – температура воздуха.

Для исследования влияния продольной и поперечной составляющих вектора теплопроводности, а также волнистой поверхности ЧЭ (рис. 2) на коэффициент теплоотдачи были изготовлены два варианта ЧЭ из гладкой проволоки различной теплопроводности: нержавеющей стали (12,6 Вт/(м·К)) и никеля (58 Вт/(м·К)). В этих конструкциях чувствительные элементы одновременно выполняли функции нагревателя и термометра сопротивления. Сравнение трёх характеристик ЧЭ показало хорошее совпадение результатов (отклонения от зависимости для волнистой поверхности ЧЭ не превысили 3%) [11]. Это позволило сделать вывод о том, что волнистость уменьшила в 0,95 раза поверхность ЧЭ относительно поверхности с измеренным между вершинами волн диаметром (высота волны 0,06 мм соизмерима с толщиной пограничного слоя). При этом волнистость не оказала влияния на градуировочную характеристику ЧЭ зонда. Что касается теплопроводности, то она не оказывает влияния на безразмерные функции теплоотдачи для малых диаметров ЧЭ относительно его длины. Проведенные исследования позволили упростить модель теплового состояния ЧЭ зонда и описать её уравнением

$$Q = I^2 \cdot R = I \cdot U = \alpha \cdot \pi \cdot d \cdot l \cdot (T_n - T_b) + Q_p,$$

где Q – мощность; I – электрический ток; U – электрическое напряжение; R – электрическое сопротивление; d – диаметр ЧЭ; l – длина ЧЭ; α – коэффициент теплоотдачи (конвективный + лучистый); Q_p – потери тепловой мощности через держатели и клеммную колодку.

Измерение скорости воздушного потока с помощью интегрального термоанемометра так же, как и с помощью проволочных датчиков, можно производить как методом постоянного сопротивления ($T_e = \text{const}$), так и методом постоянной силы тока. На практике для термоанемометров чаще пользуются методом постоянной температуры.

В нашем случае измерения проводятся методом постоянной силы тока. Центральная жила термоанемометра изготовлена из манганина или константана, что делает ее сопротивление нечувствительным к температуре. Наличие стабилизированных источников напряжения снимает технические трудности при поддержании нужной силы тока для корректных измерений электрической мощности. При изменении скорости воздушного потока изменяется сопротивление ЧЭ, по измеренному значению которого вычисляется скорость.

Продолжительность измерения включает время установления (порядка 60 с) и время усреднения результата измерения в течение минимум 60 с. В результате в мерном сечении зонда получаем среднеобъемную скорость за этот промежуток времени. Инерционность ЧЭ и высокая теплопроводность медного провода не позволяет проводить измерения пульсационной составляющей скорости.

Градуировка зондов проводится в разомкнутой аэродинамической трубе двумя методами: по показаниям «эталонного» интегрального термоанемометра, сконструированного по описанному выше принципу, и методом баланса электрической и тепловой мощности. В этом случае для устранения влияния радиационных потоков между термоанемометром и струнными интегральными термометрами сопротивления, расположенными перед термоанемометром и после него, установлены гофрированные экраны с отверстиями, которые возвращают радиационные потоки энергии в проточную часть и в конечном итоге увеличивают разницу температур воздушного потока между входом аэродинамической трубы и выходом из нее. При этом измерения расхода воздушного потока проводятся методом постоянной температуры, а измерения температуры воздушного потока – струнными термометрами сопротивления, предназначенными для расчёта расхода методом баланса электрической и тепловой мощности

$$Q = c_p \cdot G_m \cdot (T_{b2} - T_{b1}),$$

где c_p – удельная теплоемкость воздуха при температуре $0,5 \cdot (T_{B2} + T_{B1})$; G_m – массовый расход воздуха; T_{B2} и T_{B1} – температуры воздуха на выходе и входе аэродинамической трубы.

Для увеличения точности измерения температур T_{B2} и T_{B1} собственная мощность тепловыделения эталонного термоанемометра должна быть как можно выше. Поэтому мощность регулируется величиной напряжения до 220 В, при этом она может достигать максимального значения 2 кВт. У градуированных зондов термоанемометров рассеиваемая ЧЭ мощность составляет от 35 до 100 Вт. Градуировка эталонного зонда термоанемометра проводится на сопле Виташинского с помощью трубки Пито-Прандтля и дифманометра, а переносных и стационарных зондов – в зоне установившегося прямолинейного течения воздуха в проточной части аэродинамической трубы.

Показания термоанемометра не позволяют определить направление воздушного потока. Если в проточной части мерного сечения присутствуют локальные циркуляции, обратное течение или закрученный воздушный поток, они вносят погрешность в результаты измерений. Для того чтобы исключить влияние этих факторов, измерения следует проводить на участках воздухопроводов с прямолинейным течением воздушного потока. Например, при определении производительности осевых вентиляторов зонд нельзя устанавливать в нагнетательном канале, так как при угле закрутки потока 30° в 1,3 раза увеличивается коэффициент теплоотдачи по сравнению с режимом прямого (незакрученного) потока [12]. В связи с этим расход необходимо измерять на входе всасывающего канала, где отсутствует закрутка.

Расчетные исследования, проведенные для выяснения влияния несимметричного распределения скорости воздушного потока в сечении канала на погрешность интегрирования, показали, что при коэффициенте неравномерности, равном 3, эта погрешность в диапазоне измерения скорости от 0,5 до 5 м/с не превышает 1 %, причем с увеличением диапазона измерения коэффициент неравномерности уменьшается, а погрешность интегрирования остается постоянной. Это в основном связано с неравномерностью распределения температуры на поверхности ЧЭ. Поскольку поверхностью ЧЭ является медный эмалированный провод диаметром порядка 0,1 мм, то высокая теплопроводность материала делает поверхность чувствительной к тепловым воздействиям, которые вызывают изменение температуры и дальнейшее её выравнивание. Выравнивание температуры поверхности ЧЭ является ответной реакцией на пульсирующие воздействия воздушного потока.

При исследованиях диаметр ЧЭ изменялся от 1,8 до 3,5 мм, а его длина выбиралась исходя из аэродинамического сопротивления зонда, которое, в свою очередь, зависит от загроможденности канала. Для всех зондов было выдержано соотношение площадей живого и общего сечений не менее 0,85. Расположение ЧЭ может быть и радиальным, и окружным. С технологической точки зрения размещать ЧЭ по окружности проще. Для цилиндрических зондов рисунок размещения ЧЭ может иметь форму спирали Архимеда или окружных зигзагов, а для прямоугольных (см. рис. 1) – прямых зигзагов.

Чтобы понять, как происходит процесс интегрирования расхода воздуха, проходящего через мерное сечение зонда, имеющего форму круга, представим его площадь равной площади ленты с одинаковой по всей длине шириной h . Сама лента имеет форму, близкую к спирали Архимеда. Минимальное число витков спирали – 4. Чем больше витков, тем длиннее лента и ЧЭ, а значит, точнее определяется расход. ЧЭ размещается по всей длине центральной линии несуществующей ленты и определяет среднюю скорость воздушного потока по её ширине. Здесь распределённое поле скоростей рассматривается как общая объёмная скорость, состоящая из суммы дискретных объёмных скоростей w_i , проходящих через элементарные площадки (равной площади), на которые условно поделена по всей своей длине лента. Усреднение скорости воздушного потока проводится относительно криволинейной центральной линии i -й элементарной площадки ЧЭ шириной h и единичного участка длины l_i ЧЭ, равного диаметру провода \varnothing (см. рис. 2). Под действием скорости потока воздуха через i -ю элементарную площадку изменяется электрическое сопротивление на i -м участке ЧЭ. Поскольку все участки ЧЭ имеют электрические последовательные соединения между собой и являются единым медным проводом, то все изменения сопротивлений на участках ЧЭ автоматически суммируются и получается общее сопротивление всей длины провода.

Для определения скорости потока необходимо произвести измерения электрического напряжения на концах жилы ЧЭ, температуры потока воздуха и температуры поверхности ЧЭ. Экспериментально были изучены зонды диаметрами 160, 200, 250, 300 и 350 мм. Плотность теплового потока,

приведенная к поверхности ЧЭ, изменялась от 2000 до 12000 Вт/м², что позволило повысить чувствительность в диапазоне измерения поля скорости от 0,5 до 10 м/с.

При измерении коэффициентов теплоотдачи от ЧЭ к воздуху массив экспериментальных данных содержал 87 измерений (три модели, с размещением ЧЭ по спирали Архимеда, диаметрами обечаек 160; 200; 250 мм и шагом между соседними витками 15–30 мм). Исследования показали, что коэффициент теплоотдачи зависит только от диаметра гибкого нагревательного элемента и скорости воздушного потока в живом сечении канала термоанемометра. С уменьшением шага между витками растут загроможденность проточной части зонда термоанемометра и его аэродинамическое сопротивление, что увеличивает скорость воздуха в живом сечении и, соответственно, теплоотдачу. При движении воздуха через проточную часть зонда его пространственная ориентация (горизонтально, вертикально) не влияет на коэффициент теплоотдачи, поскольку ввиду малого диаметра ЧЭ свободная конвекция около него не может заметно исказить характер потоков при малых скоростях из-за того, что их сносит за пределы мерного сечения.

Были исследованы несколько конструкций зондов, соединенных с воздухоборником параболической формы, у которого входное сечение имело диаметр 0,3 м, а выходное – 0,2 м.

Диаметр проходного сечения зонда составлял 0,2 м, а диаметр ЧЭ – 0,0025 м. Чувствительный элемент был размещен в сечении зонда в виде спирали Архимеда с 6 витками. Данная конструкция была разработана для измерения расхода воздуха на выходе анемостата. Благодаря наличию в его конструкции вращающегося клапана тарельчатой формы можно было изменять аэродинамическое сопротивление системы. На рис. 3 представлены результаты измерений для 4 режимов работы: без анемостата и с тремя различными позициями установки тарельчатого клапана.

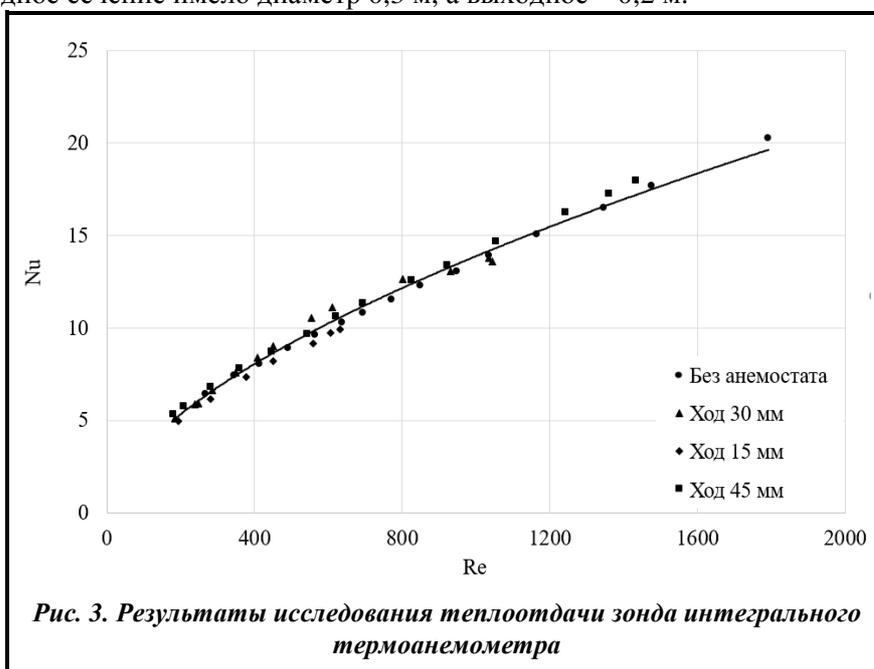


Рис. 3. Результаты исследования теплоотдачи зонда интегрального термоанемометра

Можно сделать вывод, что результаты исследования теплоотдачи в различных режимах практически не отличаются друг от друга и их можно аппроксимировать единой обобщающей зависимостью в безразмерном виде

$$Nu = 0,2282 \cdot Re^{0,5947}, \quad Nu = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda}, \quad Re = \frac{w \cdot d}{\gamma}$$

где λ – коэффициент теплопроводности; w – скорость потока воздуха в живом сечении зонда термоанемометра; γ – кинематическая вязкость.

Области применения формулы по числу Рейнольдса: $180 < Re < 1800$.

Отклонение результатов измерения от аппроксимированной кривой не превышает 4 %.

Применение интегральных термоанемометров

Следует различать два варианта конструктивного исполнения зондов интегрального термоанемометра.

Вариант 1. Стационарный зонд предназначен для контроля и управления расходом воздуха с целью создания требуемого микроклимата в помещениях при минимальных энергетических затратах. Стационарный зонд устанавливается в прямом участке вентиляционного канала в местах, где наблюдается прямоочное течение потока воздуха. Обычно оно характеризуется прямыми участками кана-

ла, закрепленными с помощью фланцевого соединения по обе стороны зонда. Длина каждого участка равна шести гидравлическим диаметрам канала. Сам зонд является участком канала, в срединном поперечном сечении которого размещен чувствительный элемент.

Вариант 2. Переносной зонд предназначен для исследования и настройки системы приточно-вытяжной вентиляции. Измерения расходов воздуха проводятся на выходах и входах анемостатов, диффузоров, вентиляционных решёток и в самих вентиляционных установках. В этих случаях на их выходах наблюдается неравномерная турбулизованный структура воздушного потока, которая может включать как закрученные, так и обратные течения, что ведёт к большим ошибкам при измерении. Так, в [12] проанализировано влияние угла натекания потока на теплоотдачу и показано, что коэффициенты теплоотдачи при прямом и закрученном потоках воздуха могут отличаться более чем в 1,5 раза. Иные причины турбулизации могут вызвать еще большее отклонение от истинных результатов. Чтобы избавиться от этих погрешностей, необходимо преобразовать поток воздуха с помощью воронки (раструба) и выпрямителя, имеющих форму сечения зонда. При выборе размера воронки нужно учитывать тот факт, что воронка совместно с зондом не должна оказывать влияния на измерение расхода воздуха, т.е. она должна иметь ничтожно малое аэродинамическое сопротивление относительно сопротивления между выходами воздухораспределительных устройств и вентиляционной установки. Для выполнения этого условия площадь живого сечения зонда должна быть минимум в 2,5 раза больше площади живого сечения воздухораспределительного устройства.

Подбор и исследование конструкций воздухосборников для измерения параметров воздушного потока на выходе воздухораспределительных устройств будут рассмотрены в следующих работах.

Заключение

Разработанный интегральный термоанемометр может применяться для измерения расхода и температуры воздуха в системах вентиляции. Главное – обеспечить соответствие структуры потока воздуха при градуировке и исследовании на реальном объекте, для чего применяются дополнительные согласующие и выпрямляющие устройства. Конструкции таких воздухосборников совместно с интегральными зондами для различных структур течений требуют дальнейшего проведения исследований с целью минимизации погрешностей, вносимых воздухосборниками в процесс измерения.

Работа выполнена за счет средств бюджетной программы «Поддержка развития приоритетных направлений научных исследований» (КПКВК 6541230).

Литература

1. O'Sullivan J., Ferrua M., Love R., Verboven P., Nicolai B., East A. Airflow measurement techniques for the improvement of forced-air cooling, refrigeration and drying operations. *J. Food Eng.* 2014. Vol. 143. P. 90–101. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2014.06.041>.
2. Ower E., Pankhurst R. C. *The Measurement of Air Flow*. United Kingdom, Oxford: Pergamon, 2014. 384 p.
3. Ikeya Y., Örlü R., Fukagata K., Alfredsson P.H. Towards a theoretical model of heat transfer for hot-wire anemometry close to solid walls. *Intern. J. Heat and Fluid Flow*. 2017. Vol. 68. P. 248–256. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2017.09.002>.
4. Saremi S., Alyari A., Feili D., Seidel H. A MEMS-based hot-film thermal anemometer with wide dynamic measurement range. *Proc. IEEE Conf. on Sensors (SENSORS'2014)*. Valencia, Spain. 2–5 November 2014. P. 420–423. <https://doi.org/10.1109/ICSENS.2014.6985024>.
5. Burgess W. A., Ellenbecker M. J., Treitman R. D. *Airflow measurement techniques. Ventilation for control of the work Environment*. Wiley-Interscience; Hoboken, New Jersey: 2004. 440 p. <https://doi.org/10.1002/0471667056.ch3>.
6. Manshadi M. D., Esfeh M. K. A new approach about heat transfer of hot-wire anemometer. *Appl. Mech. and Materials*. 2012. Vol. 232. P. 747–751. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.232.747>.
7. Örlü R., Vinuesa R. Thermal anemometry. In book: Discetti S., Ianiro A. (eds.) *Experimental Aerodynamics*. USA, Florida: CRC Press, 2017. P. 257–304. <https://doi.org/10.1201/9781315371733-12>.
8. Таратыркин К. Е., Черноиванов Д. В. Оценка точности определения расхода воздуха в системах вентиляции при их паспортизации. *Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика (АВОК)*. 2017. № 3. С. 54–59.
9. Care I., Arenas M. On the impact of anemometer size on the velocity field in a closed wind tunnel. *Flow Measurement and Instrumentation*. 2015. Vol. 44. P. 2–10. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2014.11.007>.

10. Foss J. F., Peabody J. A., Norconk M. J., Lawrenz A. R. Ambient temperature and free stream turbulence effects on the thermal transient anemometer. *Meas. Sci. Technol.* 2006. Vol. 17. No. 9. P. 2519–2526. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/17/9/020>.
11. Цаканян О. С., Кошель С. В. Исследование теплоотдачи и аэродинамического сопротивления проволочных конструкций теплообменных поверхностей. Ч. 1. Спиральные и решетчатые поверхности теплообмена. *Пробл. машиностроения*. 2005. Т. 8. № 3. С. 22–29.
12. Цаканян О. С., Кошель С. В. Теплообмен спирально-тороидальных поверхностей при переменных углах атаки потока. *Пробл. машиностроения*. 2008. Т. 11. № 2. С. 24–31.

Поступила в редакцию 07.05.2020

Інтегральний термоанемометр для вимірювання середньої температури і витрати повітря в каналах, на виходах анемостатів і в вентиляційних решітках

О. С. Цаканян, С. В. Кошель

Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України,
61046, Україна, м. Харків, вул. Пожарського, 2/10

Під час створення систем вентиляції важливо правильно розрахувати обсяги припливу і відпливу повітря. Якщо під час розрахунку допущена помилка або потрібен перерозподіл потоків повітря, без вимірювань не обійтися. Існуючі способи визначення витрати повітря за допомогою точкових вимірювань в перерізі трудомісткі і вимагають значних витрат часу, а зняття показань в різні моменти часу привносить в результат значну похибку. В Інституті проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України розроблений термоанемометр нової конструкції, використання якого значно спрощує вимірювальний процес. Він дозволяє проводити вимірювання середніх значень температури і швидкості (витрати) повітря в перерізі повітропроводів або на входах і виходах решіток і анемостатів. Прилад може використовуватися в режимі реального часу для контролю і керування витратою і температурою повітря в системах вентиляції. Зонд термоанемометра включає порожнистий каркас з направляючими, на які укладено чутливий елемент. Принцип роботи приладу полягає в зміні коефіцієнта тепловіддачі за різної швидкості натікання повітря. Попередньо в лабораторних умовах проводиться градування термоанемометра за різних швидкостей. Отримано градувану залежність, яка може використовуватися під час вимірювань витрати повітря на входах і виходах повітророзподільних пристроїв і безпосередньо в повітропроводах. Для підвищення точності вимірювань необхідно забезпечити кут натікання повітряного потоку на зонд термоанемометра, що дорівнює 90° . Для цього використовуються спеціальні повітрозбірники і випрямлячі повітряного потоку.

Ключові слова: термоанемометр, вимірювання, чутливий елемент.